

Untersuchung der Luftqualität im Stadtbereich Augsburg während zweier Winter

DIPLOMARBEIT

eingereicht am

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND GEOPHYSIK
UNIVERSITÄT INNSBRUCK

zur Erlangung des akademischen Grades

MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN

MARKUS HÖSS

Innsbruck, März 2011

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Ursachen für hohe Luftschadstoffbelastungen in der isoliert im ländlichen Raum liegenden Großstadt Augsburg. Dafür stehen sechs verschiedene Schadstoffmessstationen, ein Ceilometer, drei meteorologische Stationen und die Radiosonde von Oberschleißheim bei München mit zwei Aufstiegen pro Tag zur Verfügung. Es werden die Wetterlagen über Mitteleuropa analysiert und das Untersuchungsgebiet und die Verteilung der verwendeten Messapparaturen beschrieben. Im Anschluß werden die Strömungsverhältnisse anhand von Karten aus dem Archiv der Universität Innsbruck und den Daten der Oberschleißheimer Radiosonde, sowie den Bodenwerten der Augsburger Messstationen untersucht.

Nach Beschreibung der meteorologischen Parameter werden die Windwerte der drei Bodenstationen verglichen. Dabei werden niedrigere Windgeschwindigkeiten im Lee der Stadt festgestellt.

Als Nächstes werden die Mischungsschichthöhen, die das Ceilometer ausgibt mit den Radiosondendaten verglichen. Aus der Radiosonde wird die Höhe der Mischungsschicht über die Richardsonzahl, die potentielle Temperatur, das Mischungsverhältnis und die relative Feuchte berechnet. Dabei stellt man fest, das sich der Gradient der potentiellen Temperatur bei winterlichen Hochdrucklagen am besten eignet, die Richardsonzahl die schlechtesten Ergebnisse liefert.

Anschließend wird die Entwicklung von Stickoxiden und Ozon analysiert. Hierbei wird klar, dass diese Spurengase weniger von Windverhältnissen und Mischungsschichthöhe abhängen, sondern viel mehr durch Einstrahlung und antropogene Emissionen beeinflusst sind.

Abschließend werden die Verläufe von PM10 und UFP (Ultra Feine Partikel) mit Blick auf Wind, Höhe der Mischungsschicht und gesetzliche Vorgaben beschrieben. Dabei stellt sich heraus, das die Verläufe der UFP, je kleiner sie sind, weniger von Wind und Mischungsschicht beeinflusst werden. Die Teilchenkonzentrationen von Partikeln zwischen 50nm und 500nm nehmen mit zunehmender Windgeschwindigkeit oder wachsender Mischungsschichthöhe am deutlichsten ab. Zusätzlich sieht man, dass die Verweildauer der Partikel in der Luft um so kürzer ist, je kleiner sie sind.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Kurzzusammenfassung | i |
| Inhaltsverzeichnis | ii |
| Abkürzungsverzeichnis | vi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung der Arbeit | 2 |
| 2 Meteorologie und Luftschadstoffe | 3 |
| 2.1 Die Grenzschicht | 3 |
| 2.1.1 Die Schichten der Grenzschicht | 4 |
| 2.1.2 Statische Stabilität | 5 |
| 2.1.3 Tagesgang der Grenzschicht an einem Strahlungstag | 7 |
| 2.1.4 Die Grenzschicht über einer Stadt | 8 |
| 2.2 Luftschadstoffe | 9 |
| 2.2.1 Die gemessenen Spurengase | 9 |
| 2.2.2 Feinstaub | 12 |
| 3 Untersuchungsgebiet und Messanordnung | 15 |
| 3.1 Lage und Topographie | 15 |
| 3.2 Anordnung der Messgeräte | 16 |
| 3.3 Beschreibung der Geräte | 19 |
| 3.3.1 Meteorologische Instrumente und Luftschadstoffmessgeräte | 19 |
| 3.3.2 Das Ceilometer | 21 |
| 4 Meteorologische Betrachtung der Messperioden | 25 |
| 4.1 Klassifizierung der Wetterlagen nach Hess Brezowsky | 25 |
| 4.1.1 Untersuchung der beiden Winter 06/07 und 07/08 | 25 |
| 4.1.2 Klassifizierung der Intensivmessphasen | 26 |
| 4.1.3 Der Low Level Jet | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Synoptische Situation im Untersuchungsgebiet | 31 |
| 4.2.1 | Die Strömungsverhältnisse | 31 |
| 4.2.2 | Temperatur | 34 |
| 4.2.3 | relative Feuchte | 36 |
| 4.2.4 | Sonnenscheindauer, Niederschlag und Bewölkung | 37 |
| 4.2.5 | Tabellarischer Überblick über die gemessenen Bodenwerte | 39 |
| 4.3 | Zusammenfassung | 40 |
| 5 | Analyse des Bodenwinds | 41 |
| 5.1 | Die drei Messstationen im Vergleich | 41 |
| 5.1.1 | Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Februar 2007 | 41 |
| 5.1.2 | Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Februar 2008 | 42 |
| 5.2 | Detaillierter Vergleich von DWD-Station und LfU-Station | 44 |
| 5.3 | Zusammenfassung | 46 |
| 6 | Mischungsschichthöhe | 49 |
| 6.1 | Mischungsschicht und synoptische Größen | 49 |
| 6.2 | Ceilometer und Radiosonde | 50 |
| 6.2.1 | Vorstellung der verschiedenen Methoden | 50 |
| 6.2.2 | Ein Beispieltag | 52 |
| 6.3 | Detaillierte Untersuchung der Mischungsschicht | 54 |
| 6.3.1 | Die Mischungsschicht im Februar 2007 | 54 |
| 6.3.2 | Die Mischungsschicht im Februar 2008 | 56 |
| 6.4 | Statistische Abrundung | 59 |
| 6.4.1 | Korrelationen aller Parameter mit der Mischungsschicht | 59 |
| 6.4.2 | Korrelationen der einzelnen Parameter mit der Mischungsschicht | 61 |
| 6.5 | Zusammenfassung | 62 |
| 7 | Stickoxide und Ozon | 65 |
| 7.1 | Stickoxide | 65 |
| 7.1.1 | Datengrundlage und Überblick | 65 |
| 7.1.2 | Stickoxide und Ozon | 69 |
| 7.1.3 | Das NO ₂ /NO _x Verhältnis von Karlstraße und LfU | 70 |
| 7.2 | Stickoxide und Windgeschwindigkeit | 72 |
| 7.3 | Stickoxide und Mischungsschichthöhe | 74 |
| 7.4 | Zusammenfassung | 75 |
| 8 | Feinstaub | 77 |
| 8.1 | Tagesgänge aller Partikel | 77 |
| 8.1.1 | Datengrundlage und Überblick | 77 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 8.1.2 | PM10 | 77 |
| 8.1.3 | UFP | 81 |
| 8.2 | Einfluß des Winds | 85 |
| 8.2.1 | Verteilung von PM10 | 85 |
| 8.2.2 | Verteilung von UFP und FP | 87 |
| 8.3 | Korrelationen aller Partikelgrößen mit meteorologischen Parametern . . . | 90 |
| 8.4 | Zusammenfassung | 91 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 93 |
| | Anhang | 99 |
| A | Tagesverläufe der Mischungsschicht erstellt mit dem CL31-Ceilometer | 99 |
| B | Analyse der Wetterlagen 2007 | 103 |
| C | Analyse der Wetterlagen 2008 | 107 |
| D | Mischungsschicht und Radiosondenaufstiege 2007 | 113 |
| E | Mischungsschicht und Radiosondenaufstiege 2008 | 119 |
| F | Bestimmung der MLH aus Radiosondenaufstiegen 2007 | 127 |
| G | Bestimmung der MLH aus Radiosondenaufstiegen 2008 | 133 |
| H | Tabellen | 141 |
| | Literatur | 145 |
| | Danksagung | 149 |
| | Curriculum Vitae | 151 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------------|---|
| AGL | Above Ground Level (über dem Erdboden) |
| BIfA | Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik |
| $\beta(x, \lambda)$ | Volumenrückstreuungskoeffizient in $\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$ |
| c | Lichtgeschwindigkeit: $2,99 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ |
| CL31 | Ceilometer CL31 |
| DACH | Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| FH | Fachhochschule |
| FP | Feine Partikel |
| FZK | Forschungszentrum Karlsruhe |
| f | Coriolisparameter: 10^{-4} s^{-1} (mittlere Breiten) |
| g | Schwerebeschleunigung: 9.81 m s^{-2} (mittlere Breiten) |
| HNO_3 | Salpetersäure |
| H_2SO_3 | schweflige Säure |
| H_2SO_4 | Schwefelsäure |
| IMGI | Institut für Meteorologie und Geophysik, Innsbruck |
| LfU | Bayerisches Landesamt für Umwelt |
| LLJ | Low-Lever-Jet |
| LÜB | Lufthygienische Landesüberwachungsstation |
| λ | Wellenlänge des emittierten Lidarimpulses |
| MLH | Mixing Layer Height (Mischungsschichthöhe) |
| müNN | Meter über Normal Null |
| NC | Number Concentration |
| N_2 | Stickstoff |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| NO_2 | Stickstoffdioxid |
| NO_x | Stickoxide (NO und NO_2 addiert nach EU-Richtlinie für NO_2) |
| NS | Niederschlag |
| O_2 | Sauerstoff |
| O_3 | Ozon |

| | |
|-----------------|--|
| OH | Hydroxyl-Radikal |
| PM | Particulate Matter |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß (Determinationskoeffizient) |
| Ri | Richardsonzahl |
| RH | relative humidity (Relative Feuchte) |
| SBL | Stable Boundary Layer (Stabile Grenzschicht) |
| SO ₂ | Schwefeldioxid |
| Son. | Sonnenscheindauer |
| Θ | potentielle Temperatur |
| T | Temperatur 2 m über Boden |
| T_0 | Temperatur der Erdoberfläche |
| \bar{T} | mittlere Schichttemperatur |
| UFP | Ultra Feine Partikel |
| UTC | Coordinated Universal Time (koordinierte Weltzeit) |
| u | Horizontale Windkomponente aus West |
| v | Horizontale Windkomponente aus Süd |
| v_g | v-Komponente des geostrophischen Winds |
| VPT | virtuell potentielle Temperatur |

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In vorliegender Arbeit werden die verschiedenen meteorologischen und anthropogenen Einflüsse auf die Luftqualität in der Stadt Augsburg erörtert. Dabei stellt sich vornehmlich die Frage wie die Höhe der Mischungsschicht, sowie die Wind- und Stabilitätsverhältnisse zu hohen Luftschadstoffbelastungen und Grenzwertüberschreitungen bei NO_2 und PM_{10} führen können. Gerade während winterlicher Hochdrucklagen, in denen oft über Tage hinweg kein Austausch der bodennahen Luft erfolgt, treten hohe Luftbelastungen auf. Diese werden durch Verkehr und vermehrtes Heizen mit fossilen Brennstoffen im Winter zusätzlich verstärkt. Die so entstandenen hohen Luftschadstoffbelastungen sind gesundheitsschädlich und deshalb von großem medizinischen Interesse.

Augsburg bietet sich aus vielerlei Gründen zur Untersuchung dieser Fragestellungen an. Die Großstadt liegt isoliert im ländlichen Raum im schwach ausgeprägten Tal von Lech und Wertach. Bei synoptisch störungsfreier Wetterlage bildet sich in Augsburg ein lokales Talwindsystem aus, welches hauptsächlich während winterlicher Hochdrucklagen entsteht. Auch kann man davon ausgehen, dass die Luftqualität über Augsburg während solcher Hochdrucklagen aufgrund ihrer Lage nur durch die Emissionen aus der Stadt selbst beeinflusst wird, da kein Luftmassenaustausch mit anderen Großstädten zu erwarten ist. Des Weiteren bietet sich die Stadt Augsburg an, da ein Ceilometer, sowie drei meteorologische Stationen, sechs Luftschadstoffmessstationen und die Daten der Radiosonde von Oberschleißheim bei München (50 km entfernt) zur Verfügung stehen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Zuerst werden die verschiedenen Wetterlagen während der beiden ausgewählten Episoden herausgearbeitet und es werden die damit verbundenen Strömungsverhältnisse in und über dem Untersuchungsgebiet analysiert. Anschließend werden die Windverhältnisse am Boden analysiert, um den Einfluss der Stadt und der Orographie auf Windgeschwindigkeit und Windrichtung kennen zu lernen.

Dann wird die Mischungsschichthöhe über verschiedene Methoden ermittelt. Zum einen steht ein Ceilometer zur Verfügung, zum anderen wird die Mischungsschichthöhe über verschiedene Gradientenverfahren aus Radiosondenaufstiegen ermittelt. Ziel der Untersuchungen ist zu erkennen, bei welcher Wetterlage sich welche Methode zur Erfassung der Mischungsschichthöhe am besten eignet.

Alle bis dahin erlangten Erkenntnisse werden mit dem Vorkommen von Stickoxiden und Ozon in Kontext gesetzt. Das hat zum Ziel, die Auswirkungen von verschiedenen Einflüssen wie beispielsweise Sonnenstand, Windgeschwindigkeit und Mischungsschichthöhe, genauso wie antropogene Einflüsse auf die genannten Spurengase während der Messperioden zu verstehen. Genauso ist ein Ziel dieser Arbeit, Veränderungen von meteorologischen Parametern und antropogenem Verhalten im Vorkommen von Feinstaub zu finden. Im Besonderen werden Partikel verschiedener Größen analysiert, um zu erkennen, wie unterschiedlich sie auf meteorologische Veränderungen während winterlicher Hochdrucklagen reagieren.

Kapitel 2

Meteorologie und Luftschadstoffe

Dieses Kapitel gibt im ersten Teil einen kurzen Überblick über den Aufbau der Atmosphäre und beschreibt detailliert die Grenzschicht. Ergänzend ist ein kurzer Überblick über statische Stabilität eingebunden.

Der zweite Teil stellt die in dieser Arbeit analysierten Spurengase vor. Abschließend werden die Herkunft von Feinstaub und seine Auswirkungen auf den menschlichen Organismus besprochen.

2.1 Die Grenzschicht

Unsere Atmosphäre wird in mehrere Schichten unterteilt. Nach der “U.S. Standard Atmosphäre 1976” liegen die untersten vier Schichten innerhalb der unten angegebenen Höhenbereiche über dem Erdboden und werden wie folgt benannt:

- Thermosphäre (85 km bis 800 km AGL)
- Mesosphäre (50 km bis 85 km AGL)
- Stratosphäre (11 km bis 50 km AGL)
- Troposphäre (bis 11 km AGL)

In der Thermosphäre herrscht ein Luftdruck von unter 0,0037 hPa und auch in der Mesosphäre ist er nicht höher als 1,11 hPa. Diese Schichten sind demnach sehr weit vom Erdboden und den bodennahen Luftschichten entfernt und für diese Arbeit nicht von Bedeutung. Deshalb wird in der Folge auch nicht näher auf sie eingegangen.

Unter diesen beiden Schichten liegt die Stratosphäre. Ihren Namen verdankt sie der früheren Ansicht, dass sie horizontal homogen geschichtet sei (lat. *stratus*=geschichtet). Die chemischen und physikalischen Prozesse in der Stratosphäre sind für die gesamte Atmosphäre sehr wichtig. Man denke nur an das stratosphärische Ozon. Nach Kraus (2004) schützt es die Organismen unseres Planeten vor der ultravioletten Sonnenstrahlung.

Die unterste Schicht ist die Troposphäre. Sie reicht nach der "U.S. Standard Atmosphäre 1976" im Jahresmittel in den mittleren Breiten bis etwa 11 km über die Erdoberfläche. Nach Kraus (2004) bilden sich in ihr Wolken und Niederschlag und die Temperatur nimmt mit der Höhe um $6,5 \text{ K km}^{-1}$ ab. Da sich in ihr das komplette Wettergeschehen abspielt, wird sie immer wieder durchmischt. Daher kommt der Name Troposphäre (griech. *trepein*=wenden, kehren).

Die Troposphäre wird ihrerseits wieder in zwei Schichten unterteilt:

- freie Atmosphäre (2 km bis 11 km AGL)
- Grenzschicht (bis 2 km AGL)

Als freie Atmosphäre bezeichnet man die gesamte Troposphäre oberhalb der Grenzschicht. Die freie Atmosphäre (auch freie Schicht genannt) ist im wesentlichen bodenreibungsfrei.

Die Grenzschicht ist die Schicht der Atmosphäre, die unmittelbar an die Erdoberfläche angrenzt. Ihre Mächtigkeit ist abhängig von Tageszeit, geographischer Breite und Topographie der Erdoberfläche. Sie erreicht Höhen bis zu 2 km, wobei sie im Winter in der Regel viel flacher ist. Man nimmt an, dass die Luftströmung in der Grenzschicht praktisch immer turbulent ist. Sie ist demnach ständig durchmischt und wird auch als Mischungsschicht bezeichnet.

2.1.1 Die Schichten der Grenzschicht

Die Mischungsschicht unterteilt man in drei Unterschichten unterschiedlicher Charakterisierung (siehe Abbildung: 2.1).

Die bodennächste Schicht ist die **viskose Unterschicht** und misst nur wenige Millimeter. Sie hat auf die dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre fast keinen Einfluß und wird deshalb bei der Betrachtung der Grenzschicht normalerweise außer Acht gelassen. Gleich im Anschluß folgt die **Prandtschicht**, auch bodennahe Grenzschicht genannt. Nach Etling (2002) hängt ihre vertikale Erstreckung von der thermischen Schichtung ab und liegt zwischen 20 m AGL und 100 m AGL. Die turbulenten Flüsse sind annähernd höhenkonstant, sodass vereinfachte Wind- und Temperaturprofile berechnet werden können. Die Corioliskraft hat in diesen Höhen nur geringen Einfluß auf die Windrichtung, sodass man an der Obergrenze der Prandtschicht in etwa die gleiche Windrichtung wie am Boden hat. Die Windgeschwindigkeit steigt in dieser Schicht jedoch auf 70 % bis 80 % der maximalen Windgeschwindigkeit an der Obergrenze der Grenzschicht, da mit zunehmender Höhe die Bodenreibung nachlässt.

Die höchste und mächtigste Schicht innerhalb der Grenzschicht wird als **Ekman-schicht** bezeichnet (Etling (2002)). Sie erreicht im Sommer Höhen von 2000 m AGL, im Winter

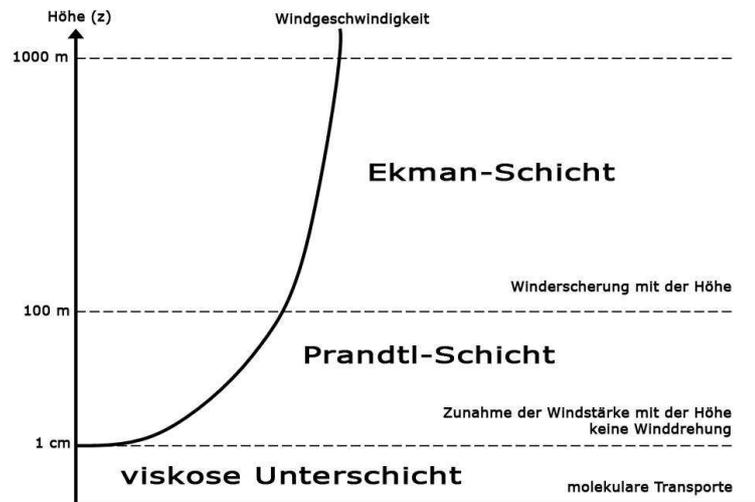


Abbildung 2.1: Die einzelnen Schichten der Grenzschicht (Etling (2010))

liegt sie deutlich niedriger. An ihrer Obergrenze findet man häufig eine laminare Grundströmung vor, weil die turbulenten Flüsse mit zunehmender Entfernung vom Erdboden geringer werden und verschwinden. In der Ekman-Schicht dreht der Wind der Corioliskraft folgend und richtet sich an der Obergrenze der Mischungsschicht gleich dem geostrophischen Wind aus.

2.1.2 Statische Stabilität

Um die Tagesentwicklung der Grenzschicht mit konvektiven Luftpaketen und stabilen Schichten zu verstehen, soll ein kurzer Exkurs zur "statischen Stabilität" helfen. Es gibt grundsätzlich 3 Arten von Luftschichtungen. Sie unterscheiden sich durch die Änderung ihrer Dichte, wenn man Luftpakete aus der jeweiligen Schichtung vertikal auslenkt.

Wenn man ein Paket anhebt und feststellt, dass es in höherer Lage leichter wie seine Umgebungsluft wird, hat die Dichte des Pakets gegenüber der Dichte der Umgebungsluft stärker abgenommen. Das bedeutet, dass das gehobene Paket einen größeren Auftrieb wie seine Umgebung erfährt und von alleine weiter und weiter aufsteigen wird. Es ist labil.

Sinkt ein Paket immer wieder auf sein Ausgangsniveau zurück, hat es eine höhere Dichte wie seine Umgebung und somit zu wenig Auftrieb. Diesem Konzept entsprechend unterscheidet man stabile, neutrale und labile Schichtungen (Etling (2002)).

Ist die Luft **stabil** geschichtet, steigt die potentielle Temperatur Θ mit der Höhe. Wird ein Luftpaket aus einer stabilen Schicht adiabatisch angehoben, nimmt seine potentielle Temperatur Θ stärker ab als das Θ seiner Umgebungsluft. Sobald man das angehobene Luftpaket auslässt, sinkt es so weit ab, bis es wieder das gleiche Θ wie seine

Umgebung hat. Ebenso nimmt das Θ eines Pakets, das aus seiner Ruhelage nach unten bewegt wird, gegenüber der Umgebung weniger stark ab und das Paket erfährt so viel Auftrieb, dass es wieder in seine Ruhelage aufsteigt. Die Abnahme der Temperatur ist bei trockener Luft mindestens 1 K / 100 m, bei komplett feuchter Luft sind es mindestens 0,65 K / 100 m.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} > 0 \text{ und } \frac{\partial T}{\partial z} > -1K/100m$$

Eine **neutral** geschichtete Atmosphäre besitzt in jeder Höhe die gleiche potentielle Temperatur. Wird ein Luftpaket gehoben oder abgesenkt, ändert sich sein Θ nicht und bleibt immer gleich dem seiner Umgebung. Dadurch kehrt es auch nicht in seine ursprüngliche Lage zurück, weil seine neue Umgebung das gleiche Θ wie seine Ruhelage hat. Es erfährt keinen Auftrieb. Eine neutral geschichtete Atmosphäre ist sehr gut durchmischt und erlaubt den Austausch bodennaher Luft mit höhergelegener Luft ohne zusätzlichen thermischen Energieeintrag. Je mächtiger die neutrale Bodenschicht ist, desto besser ist die Luftqualität zu Zeiten hoher Schadstoffemissionen. Der Temperaturgradient bei trockener Luft ist genau 1 K / 100 m, der einer feuchten Schicht 0,65 K / 100 m.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0 \text{ und } \frac{\partial T}{\partial z} = -1K/100m$$

Als dritte Möglichkeit gibt es die **labile** Schichtung. Labil heißt, dass die potentielle Temperatur mit der Höhe abnimmt. Ein Luftpaket, welches aus seiner Ruhelage nach unten gebracht wird, wird weiter sinken, da seine Dichte mit zunehmendem Höhenverlust größer als die seiner Umgebung werden wird. Das Paket wird also schwerer. Genauso wird bei labiler Schichtung ein Paket immer weiter von alleine aufsteigen, wenn es einmal aus seiner Ruhelage angehoben wird, da seine potentielle Temperatur Θ langsamer wie die der Umgebung abnimmt. Seine Dichte wird also immer geringer wie die der Umgebung sein. In diesem Fall nimmt die Temperatur bei vollkommen trockener Luft weniger als 1 K / 100 m ab, bei komplett feuchter Atmosphäre weniger als 0,65 K / 100 m. Zum Entstehen von Konvektion muss die Luft labil geschichtet sein.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} < 0 \text{ und } \frac{\partial T}{\partial z} < -1K/100m$$

Die Schichtung der Atmosphäre ist häufig sehr inhomogen. Die einzelnen Schichtgrenzen sind meist mit einer Änderung der statischen Stabilität verbunden. Als anschauliches Beispiel möge ein Cumulus congestus¹ dienen. Die Luftschicht zwischen Boden und Wolke ist labil geschichtet. So kann bodennahe Luft, in der viel Feuchte in Form von latenter Wärme enthalten ist, vom Boden turbulent aufsteigen und die Wolkenbildung vorantreiben. Die Luft oberhalb der Wolke ist stabil geschichtet. Damit wird die Wolke nach oben hin begrenzt, sonst würden die labilen Pakete weiter und weiter aufsteigen. Das blumenkohlartige Aussehen entsteht, wenn aufsteigende Pakete von unten in die stabile

¹Eine sich aufbauende Haufenwolke, aus der sich im Sommer Gewitter entwickeln können

Deckschicht eindringen und am weiteren Aufstieg gehindert werden.

Ebenso sieht man im Winter häufig Nebel in Tälern, obwohl die Luft darüber glasklar ist. Auch da liegt an der Nebelobergrenze eine Änderung der Stabilität vor, nämlich eine stabile Schicht direkt über der Nebelobergrenze, die den Austausch der Bodenschicht mit der freien Atmosphäre verhindert. In beiden Fällen reicht die Mischungsschicht bis zur Untergrenze der stabilen Deckschicht.

2.1.3 Tagesgang der Grenzschicht an einem Strahlungstag

Der Tagesgang der Grenzschicht wird von verschiedenen Parametern beeinflusst. Vernachlässigt man orographische und synoptische Einflüsse, hängt er im Regelfall nur von der Einstrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche ab.

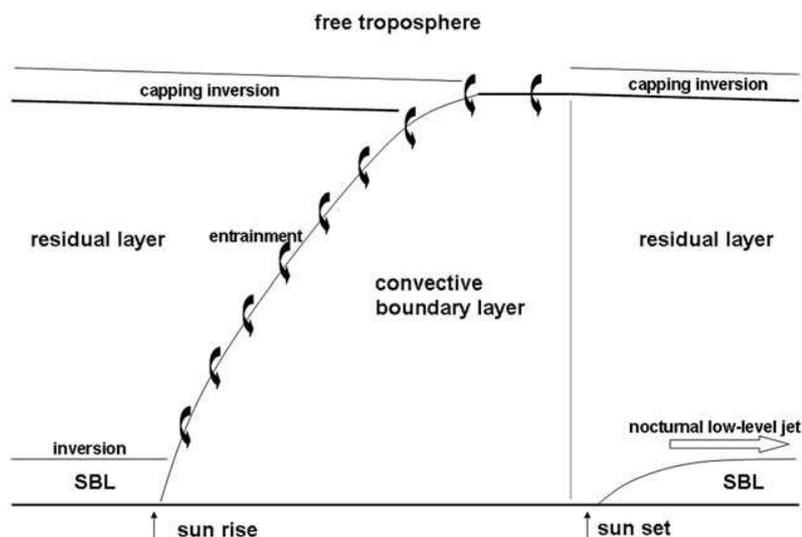


Abbildung 2.2: Schematischer Tagesgang der Grenzschicht (Emeis (2011))

Bei Sonnenaufgang beginnt sich die Atmosphäre vom Boden weg zu durchmischen, da die dem Boden nächste Luftschicht am stärksten erwärmt wird und turbulent aufsteigt. Dadurch wird die Schicht turbulenter Durchmischung bei steigender Einstrahlung am Boden immer mächtiger. Bei Sonnenhöchststand nach Mittag hat die Mischungsschicht ihre maximale Höhe erreicht und behält diese bei, solange die Sonne weiter den Boden erwärmt. Zwischen der Mischungsschicht und der freien Atmosphäre darüber bildet sich eine dünne Trennschicht, die Übergangszone oder "entrainment zone" aus. Sie ist sehr stabil geschichtet und verhindert nach Stull (2000) einen Luftmassenaustausch zwischen Mischungsschicht und freier Atmosphäre.

Sobald die Sonne untergeht, wird der Erdboden nicht weiter erwärmt, sodass die bodennahe Luft nicht länger turbulent aufsteigen und die Atmosphäre durchmischen kann. Durch die langwellige Abstrahlung des Bodens wird der Atmosphäre zusätzlich Energie entzo-

gen. So bildet sich in der Nacht eine stabile Schicht am Boden aus. Sie wird in Abbildung 2.2 mit "SBL" für "Stable Boundary Layer" bezeichnet. Über dieser Bodenschicht bleibt eine neutral geschichtete Restschicht, die sog. "residual layer" erhalten. Diese wird an ihrer Obergrenze von der freien Atmosphäre durch einen Inversionsdeckel, der sog. freien Inversion oder "capping inversion" begrenzt. Zusätzlich sieht man in Abbildung 2.2, dass man über der nächtlichen stabilen Bodenschicht häufig Low-Level-Jets findet. Mehr zu diesen Windbändern folgt in späteren Kapiteln.

2.1.4 Die Grenzschicht über einer Stadt

Da als Untersuchungsgebiet die Stadt Augsburg dient und die Mischungsschicht mit einem Ceilometer in der Stadt detektiert wird, werden an dieser Stelle zusätzlich zur Tagesentwicklung der Mischungsschicht, die Besonderheiten einer städtischen MLH erläutert. Häufig entsteht in der städtischen Grenzschicht ein thermisch bedingtes, sekundäres Windsystem. Es wird durch die Wärmeinsel über der Stadt angetrieben und sorgt für Bodenwinde, die im Stadtkern konvergieren. Dort steigt die Luft durch den Wärmeeintrag vom Boden auf und zieht entlang der Obergrenze der Grenzschicht zu den Stadtrandgebieten, wo sie nach Shreffler (1979) wieder zum Boden absinkt.

Die städtische Oberfläche hat eine große Oberflächenrauigkeit, wenig verfügbare Feuchte am Boden und sie kann durch ihre große Oberfläche viel solare Einstrahlung absorbieren und als fühlbare Wärme abgeben. Dadurch trifft man über einer Stadt häufiger auf Turbulenzen. Auch der fühlbare Wärmestrom ist über einer Stadtfläche größer wie auf dem Land. Somit liegt die MLH über einer Stadt höher als über dem angrenzenden Umland. Zusätzlich zur solaren Einstrahlung werden in einer Stadt $20 - 70 \text{ W m}^{-2}$ antropogene Energie produziert. Diese Menge beträgt etwa 5 - 10% der solaren Einstrahlung. All diese Effekte führen dazu, dass sich eine Stadt am Tag stärker wie das Umland erwärmt und in der Nacht weniger gut auskühlt. Deshalb können sich nachts weniger häufig stabile Bodenschichten ausbilden (Emeis (2011)).

2.2 Luftschadstoffe

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Datenlage legt die zwei Schwerpunkte Spurengase und Feinstaub nahe. Im Folgenden werden zuerst die in dieser Arbeit behandelten Spurengase beschrieben. Es werden die Entstehung von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, sowie der Ozonkreislauf erläutert. Darauf folgt eine allgemeine Beschreibung von Feinstaub.

2.2.1 Die gemessenen Spurengase

Viele der in dieser Arbeit gemessenen Spurengase entstehen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Hobbs (2000)). Gerade die Emissionen des Straßenverkehrs entstehen durch die Verfeuerung kohlenstoffhaltiger Erdölprodukte (Sentuc (2004)).

In dieser Arbeit wird die Summe der Stickoxide NO_x und ihre Summanden NO und NO_2 , sowie die Konzentration von O_3 analysiert. Gerade NO und NO_2 gehören zu den wichtigsten Spurengasen in der Atmosphäre, da sie an vielen chemischen Reaktionen mitwirken. Unter anderem beeinflussen sie die Selbstreinigungsfähigkeit der Luft, indem sie die OH -Konzentration kontrollieren (Crutzen (1998)).

Im Folgenden werden die konkrete Entstehung, sowie die Interaktion dieser Spurengase erläutert. Bei der Verfeuerung fossiler Brennstoffe entsteht NO , ein giftiges, farb- und geruchloses Gas. Bei sehr hohen Temperaturen (mind. 4500 K) oxidiert N_2 zu NO . Die Gleichungen 2.1 bis 2.3 zeigen die vereinfachten Reaktionsgleichungen (Hobbs (2000)).



Die Gleichungen 2.1 bis 2.3 nennt man Gleichgewichtsreaktionen. Da der Reaktionspfeil in beide Richtungen zeigt, gibt es eine Hinreaktion (die Produkte stehen auf der rechten Seite des Reaktionspfeils) und eine Rückreaktion (Produkte auf der linken Seite). Diese chemischen Vorgänge haben ihre größte Intensität bei Temperaturen ≥ 3500 K, sie finden also direkt in der Brennkammer statt. Nachdem sich das Gas nach der Reaktion schnell abkühlt, ist die Rückreaktion weit weniger effektiv, sodass bei der Verbrennung sehr viel NO zurückbleibt (Bilgeri (2009)).

Nach Hobbs (2000) kann NO auch durch Verbrennung stickstoffhaltiger Treibstoffkomponenten entstehen. Der Hauptanteil der Stickoxidproduktion liegt beim Menschen, also in der Industrie, den Energiewerken und dem Verkehr. Es gibt aber auch nicht antropogen entstandene Stickoxide. Bei Blitzschlag wird der Luftstickstoff weit höher erhitzt, als es für die Reaktionen 2.1 bis 2.3 nötig wäre. Auch bestimmte Böden und der Ozean gasen NO und NO_2 aus (Fabian (1992)), doch die vorliegende Arbeit beschäftigt sich nur mit

antropogen entstandenen Stickoxiden.

NO ist in der Atmosphäre relativ kurzlebig, da es mit Ozon zu rotbräunlichem, stechend riechendem und giftigem NO₂ und Sauerstoff wird (2.6). NO₂ verursacht Kopfschmerzen und Übelkeit und ist auf Dauer gesundheitsschädlich. Die Reaktionsgleichungen 2.4 bis 2.6 beschreiben die Photolyse von NO₂, die Entstehung von O₃ und die Reaktion von NO mit Ozon zu NO₂ und Sauerstoff (Hobbs (2000)).



Über die Gleichungen 2.4 bis 2.6, sowie die limitierenden Faktoren Sonne ($h\nu$) und Katalysatoren (in den Reaktionsgleichungen mit M bezeichnet) unterliegen NO, NO₂ und O₃ jeweils einem Tagesgang und beeinflussen sich wechselseitig. Die Ozonkonzentration ist in der Stadt sehr gering, weil das emittierte Stickstoffmonoxid nach Gleichung 2.6 gleich zu Stickstoffdioxid wird (Buchholz (2006)). Abbildung 2.3 zeigt am Beispiel von Los Angeles, wie die drei genannten Spurengase im Tagesverlauf wechselwirken.

Doch NO₂ entsteht nicht nur beim Abbau von NO, sondern auch bereits direkt bei der Abgasausleitung im Fahrzeug. Gerade bei Dieselmotoren mit Oxidationskatalysatoren und in Partikelfiltern entsteht viel NO₂ (Carslaw (2005)).

Gleichung 2.5 und 2.6 zeigen Bildung und Zerfall von O₃. Ozon ist ein farbloses Gas und enthält drei Sauerstoffatome, also ein Atom mehr wie normaler Sauerstoff. Da seine Sauerstoffatome relativ schwach gebunden sind, zerfällt Ozon leicht und reagiert dabei oxidierend. Es ist in unserer Atmosphäre sehr ungleichmäßig verteilt. 90% des O₃ kommen in der Stratosphäre vor und schützen die Erdoberfläche vor ultravioletter Strahlung. Ein bekanntes Problem ist in diesem Zusammenhang die Ausbreitung des Ozonlochs, unter welchem die Erde der solaren UV-Strahlung schutzlos ausgeliefert ist. Die anderen 10% befinden sich in der Troposphäre und schaden den Organismen, da Ozon unter anderem die Atemwege reizt. Die Bildung des bodennahen Ozons hängt stark von Schadstoffausstoß ab, wie man in den Gleichungen 2.4 bis 2.6 sieht (Böllmann (2007)).

Nachdem die Quellen der genannten Spurengase ausführlich beschrieben wurden, werden im Folgenden ihre Senken dargestellt. Im Lee von Stadtgebieten und Ballungsräumen misst man deutlich höhere Konzentrationen von anthropogenen Spurengasen als im Luv (Konrad (2000)). Das heißt, die emittierten Schadstoffe werden vom Wind ins Umland verfrachtet. Während ihres Transports werden sie verdünnt und unterliegen diversen Umwandlungsprozessen.

Bei der Umwandlung von NO und NO₂ mit Wasser entsteht unter anderem Salpetersäure (HNO₃). Sie ist farblos und zu ca. 1/3 für den sauren Regen verantwortlich.

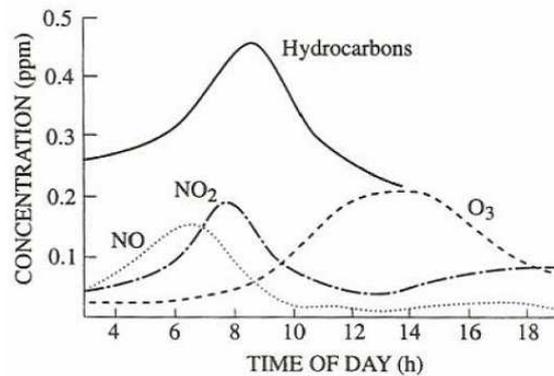


Abbildung 2.3: Photochemischer Smog in Los Angeles nach Hobbs (2000). NO, NO₂ und O₃ haben einen Tagesgang mit jeweils einem ausgeprägten Maximum. Das Maximum von NO findet man am frühen Morgen. Es entsteht durch vermehrtes Verbrennen fossiler Brennstoffe zu Tagesbeginn und da die Abbauprozesse von NO zu NO₂ während dieser Tageszeit nur eingeschränkt funktionieren. Gegen 8 Uhr, also eine gute Stunde später erreicht NO₂ die höchste Konzentration aufgrund zunehmenden Verkehrs und vermehrter Umwandlung von NO zu NO₂. Sobald die Sonne scheint, nimmt die Stickoxidkonzentration ab, weil es photolysiert wird (Gleichungen 2.4 bis 2.6). Das Maximum des O₃ fällt breiter aus und hält den ganzen Nachmittag an, bis die Sonne wieder an Kraft verliert. Das sekundäre Maximum des NO₂ gegen Abend ist zum einen mit einem höheren Verkehrsaufkommen (dem Feierabendverkehr) zu erklären. Zusätzlich nimmt die Sonneneinstrahlung am Boden nach Mittag wieder ab, sodass immer weniger Sonnenlicht zur Zerlegung von NO₂ zu NO und O₂ (siehe Gleichung 2.4) zur Verfügung steht. Des Weiteren erscheinen in dieser Grafik Kohlenwasserstoffe (Hydrocarbons). Sie erreichen ihr Maximum am Vormittag. Da Kohlenwasserstoffe in vorliegender Arbeit nicht behandelt werden, wird an dieser Stelle nicht näher auf sie eingegangen.

Dabei wird das NO₂ mit einem OH-Radikal zu HNO₃ (Gleichung 2.7). Den Rest des sauren Regens macht ein Folgeprodukt des SO₂ aus. Schwefeldioxid (SO₂) ist ein Stoff, der hauptsächlich bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe frei wird. Auch SO₂ reagiert mit Wasser und bildet H₂SO₄ (Gleichungen 2.8 und 2.9). Bei Regen werden diese Säuren nach Fabian (1992) ausgewaschen und belasten die Umwelt.



Wie man sieht, kann NO₂ auf die zwei oben genannten Arten abgebaut werden, nämlich zum einen durch Oxidation zu Salpetersäure und zum anderen durch Photolyse. Es gibt aber noch viele weitere Möglichkeiten, die hier nicht genannt werden.

2.2.2 Feinstaub

Der Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs. Als Schwebstaub werden alle festen und flüssigen Teilchen in der Außenluft bezeichnet, die eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen und nicht sofort zu Boden sinken (UmweltBundesAmt (2005)).

Laut EU-Richtlinie von 1999 werden mit "Feinstaub" alle Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser² kleiner $10\ \mu\text{m}$ bezeichnet. Er wird in "PM" und einer Kennzahl z.B.: 10, zusammengesetzt "PM10" angegeben. Das "PM" steht für **P**articulate **M**atter und die Zahl gibt die limitierende Größe der Partikel an. PM10 beinhaltet also alle Teilchen die einen aerodynamischen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ oder kleiner haben. In der vorliegenden Arbeit wird PM10 als eigenständige Größe angegeben, wie sie an fast allen Messtationen gemessen wird.

Feinstaub lässt sich nach dem UmweltBundesAmt(2005) in drei Unterklassen aufteilen:

| | |
|----------------------|---|
| Ultrafeine Partikel: | Teilchen kleiner als 100 nm |
| Feine Partikel: | Teilchen kleiner als $2,5\ \mu\text{m}$ |
| Grobe Partikel: | Teilchen größer als $2,5\ \mu\text{m}$ aber kleiner als $10\ \mu\text{m}$ |

Die "UFP", also **U**ltra **F**ine **P**articles, auch genannt Nanopartikel haben nur geringe Massenanteile an PM (wenige Prozent), weisen jedoch wegen ihrer großen Zahl (nach UmweltBundesAmt (2005) bis zu 90 % der Staubteilchen) eine erhebliche Teilchenoberfläche auf und besitzen daher eine höhere chemische Reaktivität. Zum einen können sich schädliche Stoffe (zum Beispiel Schwermetalle oder organische Stoffe) anlagern, zum andern gelangen sie aufgrund ihrer geringen Größe sehr leicht in die Bronchien und Lungenbläschen von Mensch und Tier und können nicht wieder ausgeatmet werden. Auch der Ruß aus dem Auspuff moderner Dieselfahrzeuge beinhaltet eine große Anzahl ultrafeiner Teilchen (UmweltBundesAmt (2005)).

Feine und grobe Partikel können auch als "Feine Partikel" zusammengefasst bezeichnet werden. Ähnlich wie PM10 werden auch UFP und FP durch die Abkürzung "NC" für **N**umber **C**oncentration (Anzahl der Teilchen) und eine Größenangabe abgekürzt. Wenn in den folgenden Kapiteln beispielsweise die Bezeichnung NC3-10 erscheint, so ist damit die Anzahl aller Teilchen zwischen 3 nm und 10 nm aerodynamischen Durchmessers in einem Kubikzentimeter bezeichnet. Dabei muss man zwischen "NC" und "PM" unterscheiden, da sich "PM" auf die Masse der Teilchen bezieht und "NC" auf ihre Anzahl.

²Abstrakte Größe um das Verhalten eines in Gas schwebenden Partikels zu beschreiben. Er ist über den Durchmesser einer Kugel mit der normierten Dichte von $1\ \text{g/cm}^3$ definiert, welche die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das Partikel selbst hat.

Herkunft des Feinstaub

Im Jahr 1990 lag der gesamte Staubausschlag Deutschlands bei 1.858.000 Tonnen, bis 1999 konnte er auf insgesamt 259.000 Tonnen Staub reduziert werden, davon ca. 179.000 Tonnen Feinstaub. Der gewaltige Rückgang an Staubproduktion ist jedoch hauptsächlich ein Verdienst der wirtschaftlichen Nachrüstung in den neuen deutschen Bundesländern (Bergamt-Düren (2004)).

Feinstaub hat natürliche und antropogene Quellen. Zusätzlich unterscheidet man primäre und sekundäre Quellen. Primär meint eine direkte Emission von Feinstaub, sekundär bedeutet, dass Gase freigesetzt werden die in der Luft mit anderen Substanzen zu Feinstaub reagieren.

Zu den primären natürlichen Quellen zählen Vulkanausbrüche, Waldbrände, Mineralstäube durch Verwitterung und Bodenerosion (auch Saharastaub). Weiters kann Feinstaub durch organisches Material, zum Beispiel Pollen, Sporen und Mikroorganismen entstehen.

Sekundäre natürliche Quellen setzen reaktionsfähige Gase frei. Über komplexe chemische Reaktionen werden diese Gase in der Atmosphäre zu Staubteilchen umgewandelt. Solche Gase sind beispielsweise Methan aus biologischen Aktivitäten in Böden, Gase aus Vulkanen, sowie Schwefelwasserstoff aus den Meeren und diverse andere Gase (UmweltBundesamt (2005)).

Primäre antropogene Quellen für den Feinstaub sind genauso wie die natürlichen sehr ortsabhängig. Hauptverkehrsadern, aber auch Ballungszentren und spezielle Industriegebiete weisen häufig eine höhere Belastung wie ihre Umgebung auf. Beim Verkehr muss zwischen Straßenverkehr, Schienenverkehr und sonstigem, also Schiffen und Flugzeugen unterschieden werden. Gerade im Straßenverkehr entstehen hohe Feinstaubkonzentrationen durch die Rückstände von Dieselmotoren (innerorts etwa 50%), aber auch durch Reifen-, Brems- und Belagabrieb (innerorts etwa 25%). Die übrigen 25% des innerorts gemessenen Feinstaubs stammen von ferntransportierten Partikeln (UmweltBundesamt (2005)). In der Landwirtschaft entsteht Feinstaub bei der Produktion von Futtermitteln, ebenso bei der Feldbestellung und Tierhaltung. Auch industrielle Feuerung, Schüttgutumschläge, sowie viele Herstellungsprozesse, nicht zu vergessen die Abfallverbrennung tragen zu einer hohen Feinstaubkonzentration bei. Jeder Einzelne kann den Feinstaubausstoß durch bewusstes Heizen, sei es in privaten Feuerstätten mit Holz- und fossilem Brennstoffverbrauch, aber auch durch sparsamen Umgang mit industriell erzeugter Energie drosseln.

Bei sekundären anthropogenen Quellen werden reaktionsfähige Gase frei, die sich über komplexe chemische Reaktionen in der Atmosphäre in sekundäre Staubteilchen umwandeln. Zu diesen gehören Schwefeloxide, Stickstoffoxide und Ammoniak. Die Reaktionsprodukte dieser Stoffe lagern sich an in der Atmosphäre befindlichen feinen

Teilchen (sogenannten Kondensationskernen) an und bilden sekundäre Aerosole (UmweltBundesAmt (2005)).

Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Feinstaub gelangt hauptsächlich über die Atemwege in den menschlichen Körper. Dabei werden die einzelnen Partikel entsprechend ihrer Größe mehr oder weniger gut mechanisch herausgefiltert. Partikel zwischen 5 und 10 μm bleiben meist im Nasen- und Rachenraum zurück. Die Luftröhre erreichen Partikel zwischen 3 und 5 μm und in den Bronchien und Bronchiolen (Verbindung von Bronchien zu Lungenbläschen) findet man Größen von 2 bis 3 μm bzw. 1 bis 2 μm . Teilchen kleiner als 1 μm (aber noch 10mal größer als die UFP) gelangen mühelos bis in die Lungenbläschen (Bergamt-Düren (2004)).

Wir sehen, je tiefer dabei die Luft in die Lunge eindringt, desto kleiner werden die Partikel. Auch wenn in der Vergangenheit viel unternommen wurde, um die Feinstaubemissionen zu reduzieren und das häufig auch gelang, wurde gegen die UFP, die am weitesten in den menschlichen Organismus eindringen und ihn daher am meisten belasten, bisher viel zu wenig getan.

Kapitel 3

Untersuchungsgebiet und Messanordnung

In diesem Kapitel wird das Messgebiet beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Messorte und die dort gemessenen Parameter vorgestellt und zum Schluss werden die verwendeten Messgeräte erläutert.

3.1 Lage und Topographie

Als Untersuchungsgebiet dient die Stadt Augsburg. Die kreisfreie Stadt liegt auf knapp 500 müNN im Südwesten Bayerns und zählt 263000 Einwohner. Damit ist sie die drittgrößte Stadt Bayerns und gleichzeitig die Hauptstadt des Regierungsbezirks Schwaben. Augsburg liegt ca. 50 km westnordwestlich von München und 60 km östlich von Ulm. Die Alpen sind im Süden über 100 km entfernt, die Donau im Norden ca. 40 km. Die Stadt liegt im Lechtal, in welchem die Flüsse Lech und Wertach fließen. Der steile Hügelrand von Friedberg im Osten und die hohen Riedeln im Westen bilden die Seiten des Lechtals. Sie erheben sich bei einer Talbreite von mindestens 10 km nicht mehr als 100 m über das Flußniveau. Deshalb beeinflusst die vorhandene Orographie großskalige synoptische Ereignisse auf das Messgebiet nur kaum.

Die Altstadt sowie die südlichen Stadtviertel liegen auf dem nördlichen Ausläufer einer Hochterrasse. Besonders die Hügel im Westen der Stadt sind stark bewaldet. Nach Süden weitet sich das Lechtal zum Lechfeld, einer von Lech und Wertach angeschwemmten Schotterebene. Augsburg liegt im Naturpark Augsburg - Westliche Wälder, einem großen Waldgebiet. Die Stadt selbst ist ebenfalls stark begrünt und wurde 1997 zur "grünsten und lebenswertesten Stadt" in Europa gewählt.

3.2 Anordnung der Messgeräte

Insgesamt werden im Untersuchungsgebiet an bis zu sieben verschiedenen Orten Daten erhoben.

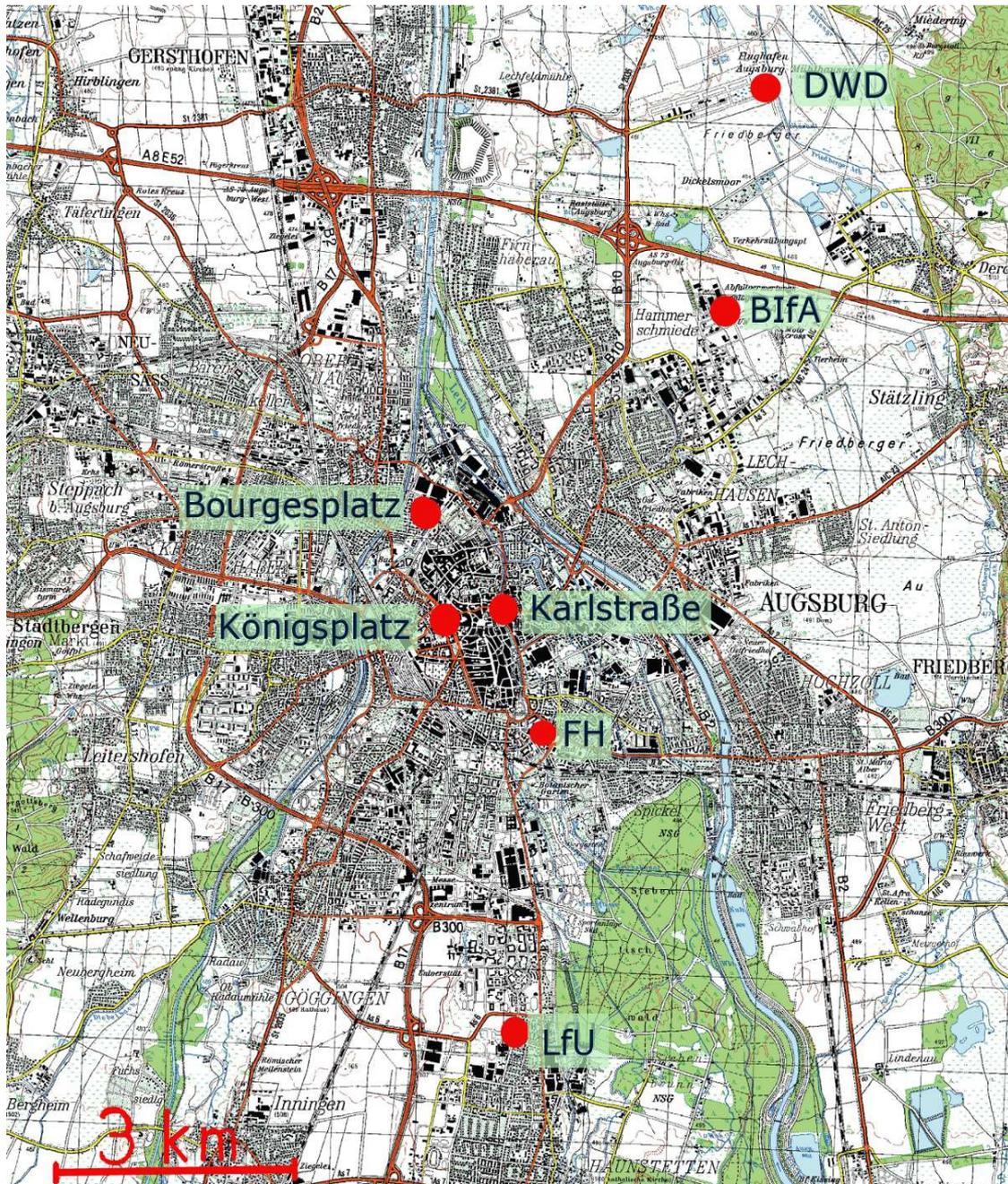


Abbildung 3.1: Die sieben Messstationen in und um Augsburg: die DWD-Station am Flughafen, der Messkontainer an der Fachhochschule (FH) mit einem Windmast, Thermo- und Hygrometern auf dem Containerdach sowie einem Feinstaubmessgerät und dem Ceilometer CL31, die Station an der LfU mit Windmast und Temperatur- und Feuchtegeber sowie diversen Schadstoffmessinstrumenten, der Königsplatz, die Karlstraße, der Bourgesplatz und die Messstation am BIFA

Die drei meteorologischen Messstationen befinden sich im Norden außerhalb der Stadt am Flughafen (**DWD**), im Innenstadtbereich ca. 1,5 km südlich des Stadtkerns an der Fachhochschule (**FH**) und im südlichen Vorort Haunstetten am Landesamt für Umwelt (**LfU**).

Die Luftschadstoffparameter werden an bis zu sechs Stationen erhoben. In der Nähe der Abfallverwertungsanlage am “Bayerischen Institut für angewandte Umweltforschung und -technik” (**Bifa**) wird eine Station für die Messung von Stickoxiden und Feinstaub (PM10) betrieben. Sie liegt am nordöstlichen Stadtrand 800 m südlich der Autobahn München Stuttgart. Das Gelände ist flach und nur locker bebaut.

Die Station **Bourgesplatz** liegt an der Liebigstraße, einer stark frequentierten Ostwestverbindung zwischen den Stadtteilen Neusäß und Lechhausen. An ihr werden PM10 und Stickoxide gemessen. Der Straßenverlauf ist breit und wird im Norden von Wohn- und Geschäftsräumen flankiert, im Süden grenzt eine größere Grünfläche mit lichtem Baumbestand an.

Der **Königsplatz** und die Messstation **Karlstraße** liegen in der Innenstadt. An diesen Stationen werden PM10 und Stickoxide gemessen. Am Königsplatz treffen die stark frequentierten Verkehrsadern Konrad-Adenauer-Allee, Schießgrabenstraße und Hallstraße zusammen. Er ist ein Knotenpunkt aller Straßenbahnlinien in Augsburg, sowie Hauptknotenpunkt für den Busverkehr. Die Fläche um den Königsplatz ist dicht bebaut und hat den Charakter eines klassischen Stadtkerns.

Die **Karlstraße** ist die wichtigste Ost-West Verbindung im Augsburger Straßennetz. Dementsprechend hoch ist ihre Frequentierung. Die seitliche Bebauung ist relativ eng, sodass die Karlstraße einer Straßenschlucht gleichkommt. Zusätzlich wird der Verkehrsfluß durch mehrere Kreuzungen mit Ampelschaltung gehemmt, was den Schadstoffeintrag in die Atmosphäre erhöht.

Die südlichste Messstation steht am Landesamt für Umwelt (**LfU**). Sie ist ungefähr 4 km vom Stadtkern entfernt und liegt am nördlichen Rand des Vororts Haunstetten. Nach Westen grenzen landwirtschaftliche Flächen an, im Osten folgt erst ein Wohn- und dann ein Waldgebiet. An der LfU werden die Windrichtung und -geschwindigkeit in 20 m Höhe mit einem Masten ermittelt, der auf dem Dach des LfU-Gebäudes montiert ist. Die Luftgütedaten und alle anderen meteorologischen Daten werden auf dem Dach eines kleinen Messcontainers erhoben. Er steht an der Grenze zum Nachbargrundstück an einer Hecke. Am LfU werden PM10, NO, NO₂ und zusätzlich Ozon gemessen.

An der Fachhochschule (**FH**) wird neben den meteorologischen Parametern nur Feinstaub gemessen. Dieser wird zusätzlich in 8 Größenklassen von 3 nm bis 10000 nm aerodynamischen Luftwiderstands unterteilt. Sie steht auf dem Gelände der Fachhochschule am östlichen Eck eines vierstöckigen Gebäudes mit quadratischem Grundriß. Im Norden und Osten der Station liegen große Parkflächen, im Süden folgt nach einer kleinen Baumgruppe ein Lagerhallenkomplex. Für die Messungen stehen zwei große

Container bereit. Auf dem Dach des einen werden die meteorologischen Daten erfasst. Das Schalenkreuzanemometer ist auf einem Mast in etwa 8 m Höhe angebracht. Dieser Windmast steht gut 10 m südöstlich eines vierstöckigen Gebäudes und ist im Westen und Südwesten von großen Laubbäumen flankiert. Diese Laubbäume und die Nähe zum Gebäude (11 m) lassen eine deutliche Beeinflussung der Windinformation vermuten. Auf dem anderen Container ist das Ceilometer CL31 installiert. Es analysiert die Atmosphäre über ihm und erkennt Dichtegradienten in der Luft. Diese Gradienten stellen meist einen Schichtübergang dar, der tiefst gelegene häufig die Obergrenze der Mischungsschicht.

| Station | DWD | FH | LfU | BifA | Bourgespl. | Königspl. | Karlstr. |
|---------------------|-----|----|-----|------|------------|-----------|----------|
| Temperatur | x | x | x | | | | |
| relative Feuchte | x | x | x | | | | |
| Windrichtung | x | x | x | | | | |
| Windgeschwindigkeit | x | x | x | | | | |
| Einstrahlung | x | | | | | | |
| Niederschlag | x | | | | | | |
| PM10 | | x | x | x | x | x | x |
| UFP | | x | | | | | |
| NO | | | x | x | x | x | x |
| NO ₂ | | | x | x | x | x | x |
| NO _x | | | x | x | x | x | x |
| O ₃ | | | x | | | | |
| MLH (Ceilometer) | | x | | | | | |

Tabelle 3.1: Überblick über alle Messstationen und die jeweils gemessenen Parameter. Ein x bedeutet, dass der Parameter an dieser Station erfasst wird.

3.3 Beschreibung der Geräte

3.3.1 Meteorologische Instrumente und Luftschadstoffmessgeräte

Die Geräteausstattung der Messstationen hängt in erster Linie vom Betreiber ab. Die Stationen an Bourgesplatz, Karlstraße, Königsplatz und am LfU werden vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz als Lufthygienische Landesüberwachungsstationen (LÜB) betrieben und haben daher auch die gleiche Geräteausstattung. Für die Windmessung wird ein kombinierter Windsensor der Fa. Thies vom Typ: 4.3324.31.000 (Schalenkreuzanemometer) verwendet, ein weiterer Kombisensor der Fa. Thies vom Typ: 1.1005.50.015 ermittelt Temperatur und relative Feuchte. Für die Bestimmung des Feinstaubgehalts ist das Gerät FH62I-R der Fa. Thermo in Gebrauch, ein Gerät, das durch seine hohe zeitliche Auflösung Partikelkonzentrationen in Echtzeit liefert (ESM_Andersen_Instruments (2011)). Die Stickoxide NO und NO₂ werden von einem CLD 700 AL der Fa. Eco-Physics erfasst, über ein Verfahren, das die chemische Lumineszenz der Stickoxide im UV-Licht ausnützt. Zur Berechnung von NO_x wird NO entsprechend der EU-Richtlinie für NO₂-Grenzwerte auf die Molekularmasse von NO₂ bezogen: $\text{NO}_x\text{-IG } [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \text{NO}_2 [\mu\text{g}/\text{m}^3] + \text{NO } [\mu\text{g}/\text{m}^3] / 1,24715 * 1,9123$

Das Ozon wird mit einem Gerät vom Typ: 400 der Firma MLU erfasst.

Die meteorologische Station Augsburg-Mühlhausen am Flughafen liegt auf 461 müNN und wird vom deutschen Wetterdienst betreut. Die Temperatur wird mit einem Widerstandsthermometer Pt100, DIN EN 60751 vom Typ: DLW-1 der Fa. Hartmann & Braun gemessen, die Luftfeuchte mit einem Polymersensor vom Typ: HMP 45 D der Fa. Vaisala. Zur Messung der Globalstrahlung wird ein Pyranometer CM 11 der Fa. Kipp & Zonen verwendet. Als Niederschlagssensor dient ein elektronisches Wägesystem vom Typ: OTT-PLUVIO der Fa. OTT Messtechnik. Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden mit Geräten der Fa. Thies gemessen. Der Richtungssensor vom Typ: 4.3121.32.000 hat ein Schleifringpotentiometer eingebaut, die Geschwindigkeit wird mit einem Schalenkreuzanemometer vom Typ: 4.3303.22.000 erfasst. Zusätzlich zu den Messgeräten ist ein Beobachter zur verbesserten Datenqualität im Einsatz. Die Informationen zur Ausstattung der DWD-Station stammen aus DWD (2001).

Die Station am BifA wird von Mitarbeitern des Forschungszentrums Karlsruhe überwacht, ebenso das Ceilometer. NO und NO₂ werden von einem TE42C von Thermo-Electron Corp. gemessen.

An der FH-Station sind Geräte des Helmholtz-Zentrums München in Betrieb. Dort werden Temperatur- und Feuchtwerte von einem kombinierten Thermo-Hydrogeber gemessen. Windgeschwindigkeit und -richtung werden mit einem zweidimensionalen Ul-

traschallanemometer der Fa. Thies gemessen. Zur Feinstaubmessung am BifA dient das gleiche Gerät wie oben bei den LÜB-Stationen angeführt. Die Stickoxide werden jedoch von einem TE42C TL Gerät der Firma Thermo Electron Corporation gesichert.

Für die Messung der einzelnen Komponenten der Feinstaubs an der FH wird ein von Pitz et al. (2008) beschriebenes “**twin differential mobility particle sizer**” (TDMPS) verwendet. Ein TDMPS besteht aus zwei Teilgeräten, die unterschiedliche Größenspektren abdecken. Partikel mit einer Größe zwischen 3 nm und 23 nm werden von einem “**ultrafine differential mobility analyzer**” (UDMA) in Verbindung mit einem “**condensation particle counter**” (CPC, Modell 3025, TSI Inc., USA) gemessen. Partikel mit einer Größe von 18 nm bis 900 nm werden mit einem “**differential mobility analyzer**” (DMA) in Verbindung mit einem CPC (Modell 3010, TSI Inc., USA) gemessen.

| Station | DWD | FH | LfU |
|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Temperatur | PT100 | Kombisensor | Kombisensor |
| relative Feuchte | Polymersensor | Kombisensor | Kombisensor |
| Windrichtung | Windfahne | Ultraschallanemometer | Windfahne |
| Windgeschwindigkeit | Schalenkreuz | Ultraschallanemometer | Schalenkreuz |
| Sonnenstrahlung | Pyranometer CM 11 | | |
| Niederschlag | Waage | | |
| MLH (Ceilometer) | CL31 Ceilometer | | |

Tabelle 3.2: Überblick über die meteorologischen Parameter und mit welchen Geräten sie erfasst werden

| Station | FH | LfU | BifA | Bourgespl. | Königspl. | Karlstr. |
|-----------------|------------------|------------|-----------|------------|-----------|----------|
| PM10 | FH62I-R TDMPS | FH62I-R | FH62I-R | FH62I-R | | |
| UFP | | | | | | |
| NO | | CLD 700 AL | TE42C | CLD 700 AL | | |
| NO ₂ | | CLD 700 AL | TE42C | CLD 700 AL | | |
| NO _x | | berechnet | berechnet | berechnet | | |
| O ₃ | | MLU 400 | | | | |

Tabelle 3.3: Überblick über die Luftgüteparameter und mit welchen Geräten sie erfasst werden

3.3.2 Das Ceilometer

Ein Ceilometer basiert auf der Arbeitsweise eines Lidars (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Es sendet Laserimpulse in die Atmosphäre, die sich entweder ungehindert ausbreiten können (transmittieren) oder die an Wasser- oder Regentropfen, genauso wie an Partikeln gestreut, absorbiert und reflektiert werden können. Im Ceilometer befindet sich ein Teleskop, das die Photonen, die von verschiedensten Teilchen in der Luft zum Erdboden zurückgestreut und reflektiert werden, erfasst. Das empfangene optische Signal wird in ein elektronisches umgewandelt und über die Zeitdifferenz des ausgesendeten und empfangenen Signals wird über Gleichung 3.1 die Höhe des zurückstreuenden oder reflektierenden Mediums berechnet.

Da das Ceilometer ein optisches Gerät ist, kann es nicht nur Wolkenuntergrenzen erkennen, sondern auch verschiedenste Aerosolpartikel. Haben zwei übereinanderliegende Luftschichten, durch die ein Laserimpuls geschickt wird, eine unterschiedliche Aerosolzusammensetzung, so ändert sich auch die Anzahl an Photonen, die in diesen Schichten gestreut und zum Teil vom Ceilometer am Boden wieder erfasst werden. So kann das Ceilometer aufgrund des unterschiedlichen Aerosolgehalts verschiedener Atmosphärenschichten die einzelnen Schichtübergänge lokalisieren.

Hierbei darf man aber eines nicht vergessen: "optisch" bedeutet auch, sobald ein Laserimpuls an einer dichten Schicht (teil)reflektiert wird, kann das Ceilometer darüber liegende Schichten, die die Laserimpulse weniger stark reflektieren würden, nicht mehr erkennen. Dieser Sachverhalt ist sehr wichtig und darf später bei der Analyse und Interpretation der Mischungsschichtplots nicht vergessen werden. Die Gleichung 3.1 zeigt vereinfacht, wie man aus den Laserimpulsen die Höhe h der reflektierenden Schicht errechnet. c ist die Lichtgeschwindigkeit mit $2,99 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$, und t ist die Laufzeitverschiebung. Durch 2 teilt man, da der Laserimpuls die doppelte Wegstrecke zurücklegen muss.

$$h = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.1)$$

Das Ceilometer an der FH in Augsburg ist vom Typ CL31 und ein Produkt der Fa. Vaisala. Es hat eine maximale Reichweite bis 7,5 km und sendet mit einer Impulsfrequenz von 10 kHz. Für die vorliegende Arbeit werden aber keine Werte höher als 2,5 km verwendet werden, da die Mischungsschicht besonders im Winter nicht höher zu erwarten ist. Das CL31-Ceilometer sendet einen starken, optischen Impuls mit einer Wellenlänge von 905 nm aus. Vergleicht man die Absorptionsbanden aller gängigen Spurengase in der Atmosphäre, so sieht man, dass Licht mit einer Wellenlänge von 905 nm von keinem anderen Gas außer Wasserdampf absorbiert wird. Deshalb sind die Laserimpulse des Ceilometers ideal zur Wolkenerkennung geeignet, da sie durch alle anderen Spurengase transmittieren.

Das CL31 ist ein monostatisches, koaxiales Ceilometer. Das bedeutet, Sender und Empfänger liegen auf einer Achse in einer Einheit. So beginnt der Messbereich bereits

30 m über dem Boden (Emeis (2011)) und es können auch flache Bodeninversionen gemessen werden.

Um einen Einblick in die Arbeitsweise des CL31-Ceilometers zu gewähren, wird die vereinfachte Lidar-Gleichung eingeführt, wie sie auch bei Münkkel (2007) zu finden ist und von ihm verwendet wird:

$$P(x, \lambda) = \frac{c}{2x^2} \underbrace{P_0 A \eta O(x) \Delta t}_{\text{instrument specific attenuated backscatter}} \underbrace{\beta(x, \lambda) \tau^2(x, \lambda)} \quad (3.2)$$

| Parameter | Bezeichnung | [Einheit] |
|---------------------|---|-------------------------------------|
| c | Lichtgeschwindigkeit | [m s ⁻¹] |
| Δt | Impulsdauer | [s] |
| P_0 | Mittlere Leistung eines ausgesendeten Laserpulses | [W] |
| A | Fläche des Empfängerteleskops | [m ²] |
| η | Systemkonstante | [sr] |
| $O(x)$ | Überlappfunktion | [dimensionslos] |
| $\beta(x, \lambda)$ | Volumenrückstreukoeffizient | [sr ⁻¹ m ⁻¹] |
| $\tau(x, \lambda)$ | Transmissionskoeffizient | [m ⁻¹] |
| λ | Wellenlänge des emittierten Lidarimpulses | [m] |
| x | Distanz zwischen Lidar und rückstreuendem Medium | [m] |

Münkkel (2007) zeigt zwei Möglichkeiten, um mit einem Ceilometer die Mischungsschicht zu detektieren. Er nennt die Gradientmethode und die idealisierte Rückstremethode. Das CL31 arbeitet mit der Gradientmethode. Dabei werden Minima des Gradienten $d\beta/dx$ gesucht. Mit anderen Worten: solche Minima zeigen die stärkste Abnahme im Rückstreuprofil, also einen Übergang von einer Schicht mit hohem Aerosolgehalt zu einer Schicht mit niedrigem Aerosolgehalt.

Die Ceilometerplots wurden mit einer Vaisala-eigenen Software erzeugt. Sie wurde von Christoph Münkkel im Verlauf der Auswertungen in Rücksprache mit ihm laufend verbessert. Die Plots für vorliegende Arbeit wurden mit der Version 3.1 erstellt. Diese Software bietet die Möglichkeit, über ein Bedienfenster verschiedene Parameter wie zu analysierende Höhe, den minimalen Rückstreukoeffizienten und viele andere Details einzustellen. Auch kann man sich die MLH als Textfile ausgeben lassen. Diese Textfiles bilden die Arbeitsgrundlage für alle MLH-Grafiken, die nicht mit der CL31-Software generiert wurden. Im Anhang ist zu jedem Beobachtungstag ein Plot zu finden. Zusätzlich kann das Auswerteprogramm für das Ceilometer so eingestellt werden, dass man bis zu fünf vertikal übereinander liegende Schichten an ihren $d\beta/dx$ -Gradienten er-

kennen kann. Es ist sogar möglich, die Wolkenuntergrenze der tiefsten Wolken bei eventueller Bedeckung vom Algorithmus ausgeben zu lassen.

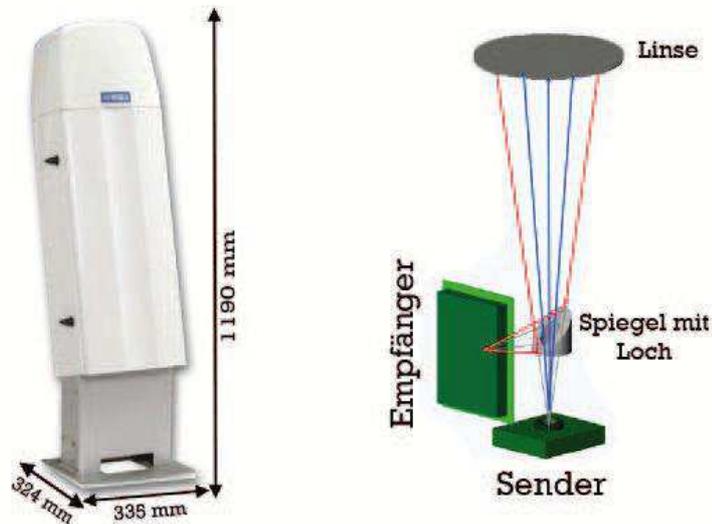


Abbildung 3.2: Links das verwendete CL31 Ceilometer und rechts seine Funktionsweise. Die vom Sender emittierten Laserimpulse (blau) werden von der Linse gebündelt und in die Atmosphäre gesendet. Dort treffen sie auf verschiedenste Aerosole und werden von ihnen absorbiert oder reflektiert. Zum Teil werden die gesendeten Photonen direkt auf die Linse des Ceilometers zurück reflektiert. Diese bündelt die reflektierten Strahlen (rot) abermals und wirft sie auf den Spiegel von dem sie zum Empfänger gespiegelt werden (Schreiter (2010)).

Kapitel 4

Meteorologische Betrachtung der Messperioden

Im folgenden Kapitel werden die Wetterlagen während der Beobachtungszeiträume klassifiziert. Anschließend folgt eine ausführliche Beschreibung der Strömungsverhältnisse in ausgewählten Schichten. Das Kapitel schließt mit den Verläufen von Temperatur, relativer Feuchte, Einstrahlung, Niederschlag und der Bewölkung in den untersuchten Zeiträumen. Die Beobachtungszeiträume erstrecken sich von 16.2.2007 bis 23.2.2007 und von 14.2.2008 bis 24.2.2008. Diese beiden Perioden wurden nach Durchsicht der MLH-Plots ausgewählt, weil sie für Augsburg hohe Luftbelastungen vermuten lassen.

4.1 Klassifizierung der Wetterlagen nach Hess Brezowsky

4.1.1 Untersuchung der beiden Winter 06/07 und 07/08

Um einen Überblick über die meteorologische Situation der beiden Winter 2006/2007 und 2007/2008 zu erhalten, bietet es sich an, sie nach der Häufigkeit auftretender Großwetterlagen zu vergleichen. Diese wurden von Hess und Brezowsky im "KATALOG DER GROSSWETTERLAGEN EUROPAS" (seit 1881) definiert. Dort werden die Witterungscharakteristika für die einzelnen Großwetterlagen anhand von Tageswerten der Lufttemperatur und des Niederschlags an den Stationen Potsdam, Karlsruhe, Hamburg und Hohenpeißenberg beschrieben. Zusätzlich werden die Tagesgänge ausgewählter meteorologischer Größen an der Potsdamer Station analysiert. Die Witterungscharakteristika werden zuerst einer zonalen, meridionalen oder gemischten Zirkulationsform zugeordnet, bevor man sie in eine der 29 verschiedenen Großwetterlagen einordnen kann. Für die vorliegende Arbeit wurden die Großwetterlagen von der offiziellen Internetseite des Deutschen Wetterdienstes abgerufen (Gerstengarbe and Werner (2005)).

Die beiden Beobachtungszeiträume liegen jeweils im Februar. So liegt es nahe, zu Beginn den jeweiligen Winter im Gesamten zu betrachten. Zunächst werden die Häufigkeiten der einzelnen Wetterlagen mit ihrem durchschnittlichen Auftreten pro Monat seit Beginn der Aufzeichnungen verglichen.

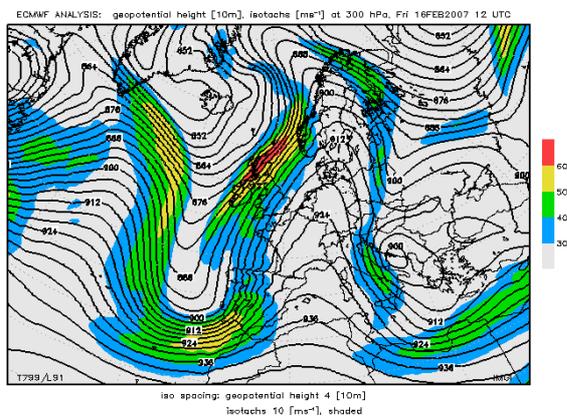
Schnell erkennt man, dass der Anteil aller Westwetterlagen, welcher im langjährigen Mittel knapp 45% aller Winterwetterlagen beträgt, im Winter 06/07 bei gerade mal 30% und im Winter 07/08 bei nur 36% liegt. Im Gegensatz dazu gibt es über Mitteleuropa überdurchschnittlich viele Hochdrucklagen. Im Winter 06/07 liegt deren Anteil bei 30%. Das sind 12% mehr als das langjährige Mittel von knapp 18%. Auch der Winter 07/08 zeigt 6% mehr Hochdruckgebiete und Hochdruckbrücken über Mitteleuropa als das langjährige Mittel.

Man sieht bereits hier, dass der Winter 06/07 mehr Tage mit Hochdruckeinfluß aufweist als der Winter 07/08.

4.1.2 Klassifizierung der Intensivmessphasen

Jede Großwetterlage, die während der Beobachtungszeiträume erscheint, wird exemplarisch mit einer Geopotentialkarte von 12UTC aus dem Niveau 300 hPa dargestellt und einer verkürzten Definition aus dem "KATALOG DER GROSSWETTERLAGEN EUROPAS" präsentiert. Für detailliertere Informationen wird der "KATALOG DER GROSSWETTERLAGEN EUROPAS" empfohlen, welcher auf der Internetseite der Deutschen Wetterdienstes eingesehen werden kann (www.dwd.de).

Nach der Beschreibung der auftretenden Wetterlagen folgt eine kurze Auflistung, wann welche Großwetterlage über dem Messgebiet liegt.



WA: Westlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal.

Die atlantische Frontalzone reicht bis etwa 60° N. Östlich von ihr liegt ein großes Hoch, das seinen Kern nördlich der Azoren hat und dessen Keil bis weit nach Süddeutschland hineinreicht.

Abbildung 4.1: 16.2.2007

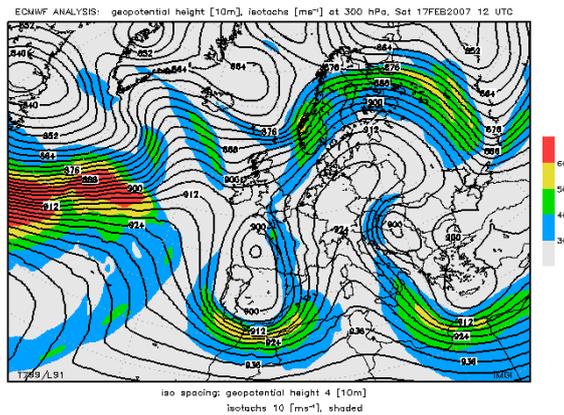


Abbildung 4.2: 17.2.2007

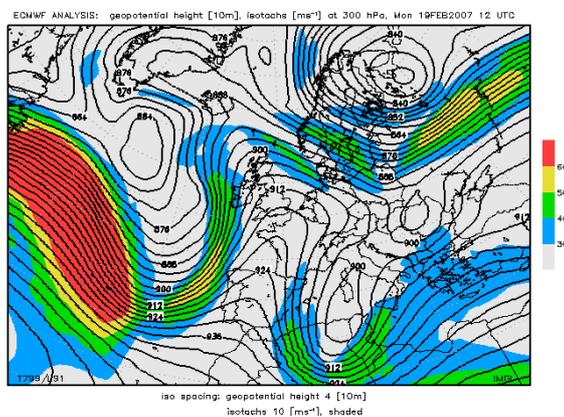


Abbildung 4.3: 19.2.2007

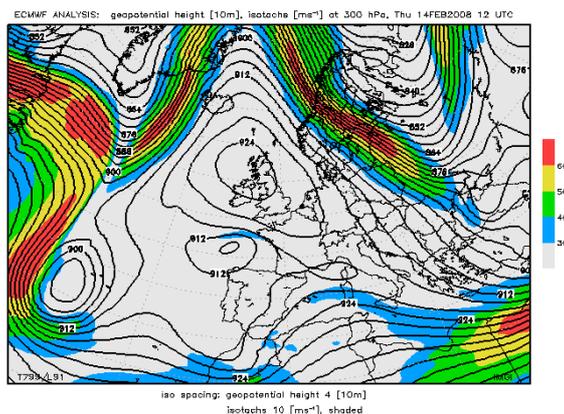


Abbildung 4.4: 14.2.2008

SEA: Südostlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal.

Über dem südlichen Ostatlantik liegt ein kräftiges Zentraltief. Von Südosteuropa erstreckt sich ein Hochdruckrücken über die Ostsee und Südkandinavien zum Nordmeer. Randstörungen dieses Tiefs erfassen im wesentlichen nur Westeuropa und streifen zeitweise das westliche Mitteleuropa.

SWA: Südwestlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal.

Eine von SW nach NO gerichtete Frontalzone liegt zwischen einer Hochdruckzone über Südeuropa und Westrussland sowie einem Tiefdrucksystem über dem mittleren Nordatlantik und dem westlichen Nordmeer. Der größte Teil Mitteleuropas steht unter antizyklonalem Einfluss.

WZ: Westlage über Mitteleuropa überwiegend zyklonal.

Ein zentrales Tief liegt meist nördlich von 60° N über Nordatlantik und europäischem Nordmeer. Einzelstörungen wandern mit eingelagerten Zwischenhochdruckgebieten oder -keilen in einer Frontalzone zwischen 50° und 60° N über Nord- und Ostsee hinweg nach Osteuropa. Ein Azorenhoch reicht meist mit einem Ausläufer bis nach Südfrankreich oder sogar bis in den Alpenraum.

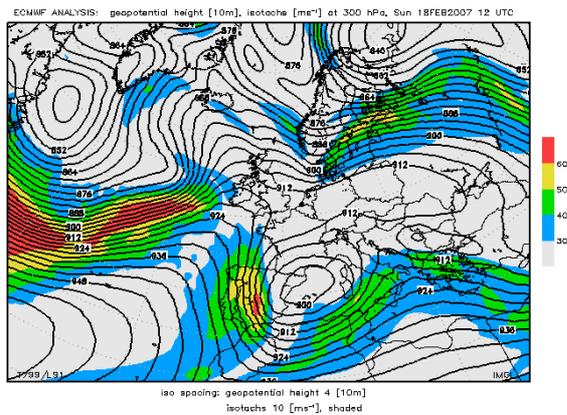


Abbildung 4.5: 18.2.2007

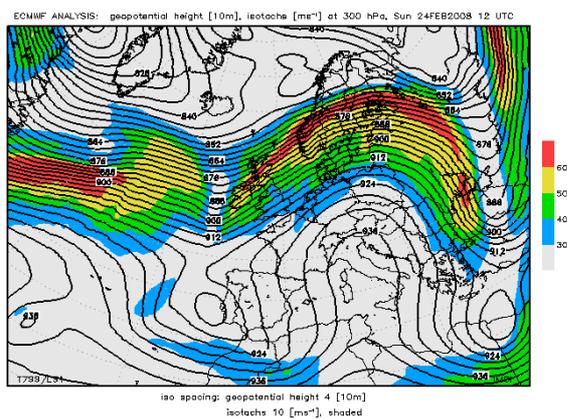


Abbildung 4.6: 24.2.2008

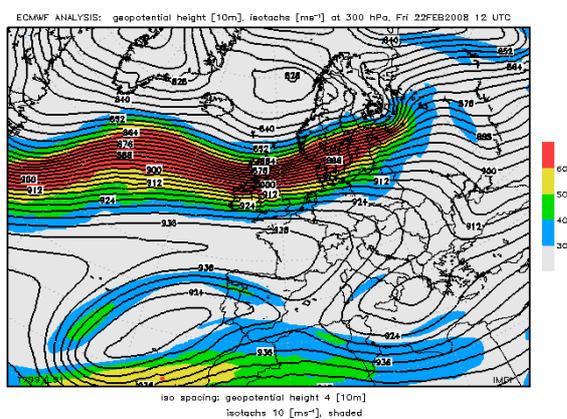


Abbildung 4.7: 22.2.2008

HFZ: Hoch Fennoskandien über Mitteleuropa überwiegend zyklonal.

Über Fennoskandien liegt ein blockierendes Hoch. Zwischen diesem und einem ausgedehnten Höhentiefsystem über dem südlichen Mitteleuropa herrscht eine östliche Luftströmung. Im Winter wandern so zeitweise Kaltlufttropfen westwärts. Die atlantische Frontalzone wird über dem Ostatlantik in Polarjet und Subtropenjet aufgespalten. Störungen greifen zeitweise auf das südliche Mitteleuropa (Alpenvorland) über.

HM: Hoch Mitteleuropa.

Über ganz Mitteleuropa liegt ein ausgedehntes Hochdruckgebiet. Die atlantische Frontalzone verläuft in einem antizyklonal gekrümmten Bogen meist nördlich von 60° N. An der West- und Ostflanke des mitteleuropäischen Hochs befinden sich Tröge über dem Ostatlantik und über Russland. Die Luftdruckgradienten sind oft schwach.

BM: Hochdruckbrücke Mitteleuropa.

Zwischen einem Subtropenhoch und einem osteuropäischen Hoch besteht über Mitteleuropa eine brückenförmige Verbindung. Nordwärts der Hochdruckbrücke verläuft eine von West nach Ost gerichtete Frontalzone. In selteneren Fällen liegt die Achse der Brücke nördlich von 50° N, so dass über ganz Mitteleuropa eine nordöstliche bis östliche Strömung zu beobachten ist.

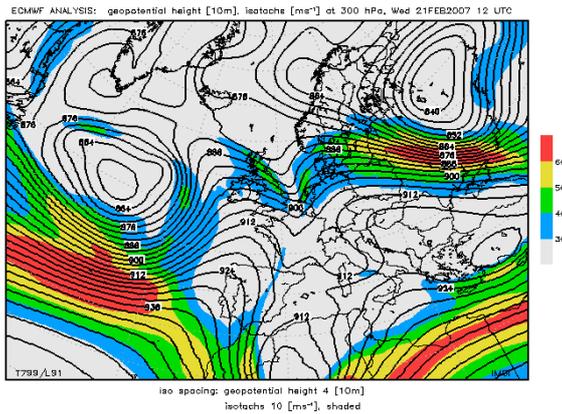


Abbildung 4.8: 21.2.2007

TRW: Trog Westeuropa.

In Trogform erstreckt sich tiefer Luftdruck vom Nordmeer bis zur Iberischen Halbinsel. Flankiert wird dieser Trog von hohem Luftdruck über dem mittleren Atlantik und Westrussland. Eine Frontalzone verläuft vom mittleren Atlantik nach Spanien weiter bis nach Skandinavien. In ihr wandern Einzelstörungen, meist westlich der Alpen entlang, über Mitteleuropa hinweg.

Die Großwetterlagen, die sich an den einzelnen Beobachtungstagen eingestellt haben, sind in den beiden folgenden Tabellen aufgelistet.

| 2007 | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Tag | 16.2. | 17.2. | 18.2. | 19.2. | 20.2. | 21.2. | 22.2. | 23.2. | |
| Abkürzung | WA | SEA | HFZ | SWA | HM | TRW | HM | TRW | |

Tabelle 4.1: Großwetterlagen über Europa während der Messperiode 2007.

Am 16.2.2007 liegt Europa unter einer antizyklonalen Westlage, deren Anströmungsrichtung am 17.2.2007 auf Südost dreht und antizyklonal bleibt. Der 18.2.2007 ist von einem Hoch über Skandinavien geprägt, worauf am 19.2.2007 wieder eine antizyklonale Westlage folgt. Diese bringt für den 20.2.2007 ein Hoch über Mitteleuropa, welches am 21.2.2007 von einem Trog über Westeuropa nach Osten verschoben wird. Das am 22.2.2007 über Mitteleuropa liegende Hoch wird am Folgetag abermals von einem Trog über Westeuropa nach Osten abgedrängt.

| 2008 | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Tag | 14.2. | 15.2. | 16.2. | 17.2. | 18.2. | 19.2. | 20.2. | 21.2. | 22.2. | 23.2. | 24.2. | |
| | WZ | WZ | WZ | SWA | SWA | SWA | TRW | BM | BM | BM | HM | |

Tabelle 4.2: Großwetterlagen über Europa während der Messperiode 2008

Die Messperiode im Februar 2008 ist großskalig betrachtet deutlich homogener wie 2007. Die ersten drei Tage sind von einer zyklonalen Westlage geprägt, die von 17.2.2008 bis 19.2.2008 zu einer antizyklonalen Südwestlage wird. Nach einem Trog am 20.2.2008 liegt Europa für den Rest der Messperiode unter einer Hochdruckbrücke, die am 24.2.2008 zu einem Hoch über Mitteleuropa wird.

4.1.3 Der Low Level Jet

Bei der Analyse der Strömungsverhältnisse über dem Untersuchungsgebiet (siehe folgender Abschnitt) trifft man häufig, besonders in der Nacht auf einen Low-Level-Jet (LLJ). Aus diesem Anlass schafft vorliegender Abschnitt einen Überblick über diese spezielle Windformation.

Nach Rider (1966) treten LLJs häufig in der Nacht unter 1000 m AGL nahe einer nächtlichen Temperaturinversion als scharfes Windmaximum auf. Die Windgeschwindigkeit oberhalb des Jets beträgt dabei höchstens 50 bis 75% des Maximums. Gewöhnlich hat so ein LLJ 200 - 300 km horizontale Ausbreitung und sorgt an seinen horizontalen und vertikalen Randbereichen für starke Scherung, die starke Turbulenzen verursacht. Nach Emeis (2011) transportieren diese Turbulenzen unter anderem Ozon aus der Residualschicht in die Bodenschicht und sorgen für hohe nächtliche Ozonwerte am Boden.

Verschiedene Mechanismen können zu einem LLJ führen. Hier werden die zwei häufigsten vorgestellt:

Nach Blackadar (1957) entsteht durch einstrahlungsbedingte Bodenerwärmung im Tagesverlauf vertikale, turbulente Durchmischung. Diese bremst horizontale Winde in der Mischungsschicht und sorgt für eine träge Oszillation. Bei Sonnenuntergang kühlt die bodennahe Luftschicht durch langwellige Abstrahlung aus und stabilisiert sich. Häufig entkoppelt sie sich dabei von der Schicht über ihr. Diese höhere Schicht kann dann nahezu reibungs- und turbulenzfrei gemäß dem synoptischen Druckgradienten beschleunigen. Eine andere Möglichkeit findet man bei Holton (1967). Er beschreibt den LLJ als Folge von täglicher Erwärmung und Abkühlung von geneigtem Gelände, was zu einer periodischen Änderung vom thermischen Wind und folglich zu einer Oszillation des geostrophischen Winds führt. Dafür wird die Gleichung für den thermischen Wind eingeführt:

$$\frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{g}{f\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \quad (4.1)$$

v_g ist in Gleichung 4.1 die v-Komponente des geostrophischen Winds, g die Schwerebeschleunigung, f der Coriolisparameter und \bar{T} die mittlere Temperatur der Luftschicht.

Bodennahe Luft kühlt schneller ab als höher gelegene. So entsteht über geneigtem Gelände ein horizontaler Temperaturgradient $\frac{\partial T}{\partial x} > 0$, und ein thermischer Wind $\frac{\partial v_g}{\partial z} > 0$. Nach Holton (1967) kann sich oberhalb der Inversionsschicht der thermische Wind wieder umkehren: $\frac{\partial v_g}{\partial z} < 0$.

In Bodennähe bremst die Bodenreibung die Windgeschwindigkeit. Das führt zur Bildung eines Jets in Höhe der nächtlichen Inversion. Der Jet erfährt durch die stabile Luftschicht unter der Inversion zusätzliche Unterstützung.

Die beiden beschriebenen Szenarien können sich durchaus auch ergänzen.

4.2 Synoptische Situation im Untersuchungsgebiet

Als Datengrundlage für diese Untersuchung dienen das Wetterkarten-Analyse-Archiv der Universität Innsbruck für die 300 hPa Geopotentialfläche, die Analysen der äquivalent potentiellen Temperatur in 850 hPa und die geopotentielle Höhe kombiniert mit der Temperatur in 850 hPa. Der Europaausschnitt der beiden Karten in 850 hPa ist der Arbeit im Anhang beigelegt. Die Oberschleißheimer Radiosonde liefert mit ihren Aufstiegsdaten Informationen über die Vertikalstruktur um 0:00Uhr und um 12:00Uhr. Auch diese Radiosondenaufstiege sind im Anhang zu finden. Für die Bodenwerte werden die DWD-Daten des Augsburger Flughafens verwendet. Wird im folgenden Abschnitt von Strömung oder Wind "in der Höhe" ohne genauere Angaben berichtet, so stammt die Information aus den 300 hPa Karten mit der Geopotentialfläche. Sie befindet sich in ca. 9000 müNN.

4.2.1 Die Strömungsverhältnisse

16.2.2007 bis 23.2.2007

Am 16.2.2007 erhält Augsburg auf der Vorderseite eines schwachen Keils Nordanströmung in der Höhe. Schwacher Nordwind in den unteren Atmosphärenschichten dreht im Tagesverlauf auf Ost, bildet mittags in 600 m AGL ein Maximum aus und flaut in der Nacht wieder ab.

Am 17.2.2007 fällt auf, dass die Oberschleißheimer Radiosonde um 0:00Uhr zwischen 400 und 450 m AGL Windgeschwindigkeiten mit bis zu 14 m s^{-1} aus Ost anzeigt. In höheren und tieferen Niveaus ist der Wind deutlich schwächer. Gut 1000 m darüber herrscht sogar Windstille. Im Hinblick auf die MLH muss so ein Geschwindigkeitsmaximum beachtet werden. Auch am Tag gibt es dieses Windmaximum aus Ost (vermutlich ein Low-Level-Jet), wobei es zwischen 900 und 1000 m AGL mit etwas geringeren Geschwindigkeiten erscheint. In der Höhe wird Augsburg von einer Keilachse überquert, wobei sich am Abend ein Hoch mit Zentrum über Mitteldeutschland und Polen aus der Keilspitze abschnürt.

Dieses schwache Hoch wandert am 18.2.2007 nach Osten ab und beschert Augsburg leichte Ostanströmung in der Höhe, wie auch am Boden. In dieser Nacht zeigt das Windprofil wieder einen Low-Level-Jet.

Am 19.2.2007 zieht ein neuer Keil über die französische Atlantikküste nach Osten und abermals liegt Augsburg keilvorderseitig in antizyklonaler, relativ gradientschwacher Höhenströmung. In der Nacht weht der Wind am Boden schwach aus Nord und dreht mit zunehmender Höhe auf West, wo er in 1600 m AGL bis zu 13 m s^{-1} erreicht. Untertags verhält sich der Wind fast gleich, jedoch erreicht er sein Maximum in 1000 m AGL mit 9 m s^{-1} und dreht schwächer werdend auf Nord.

Am 20.2.2007 liegt Augsburg keilvorderseitig, wobei die Keilachse nicht über Augsburg

zieht, sich aber ein Hoch gegen Abend mit Zentrum über den Alpen abschnürt. In der Nacht bildet sich zwischen 50 und 150 m AGL ein scharfes Windmaximum mit 6 m s^{-1} aus Südwest. Nur 200 m höher fällt die Windgeschwindigkeit auf 2 m s^{-1} ab, was wieder einem Low-Level-Jet ähnelt. Am Tag dreht Nordostwind am Boden mit der Höhe auf Nordwest.

Großskalig wandert am 21.2.2007 das Höhenhoch nach Osten ab und die Anströmung dreht am Mittag in der Höhe gradientschwach auf Süd und am Abend auf West. Nachts bildet sich in 350 m AGL wieder ein Windmaximum aus, diesmal mit 6 m s^{-1} und mit Anströmung aus Ost. Bereits auf 750 m AGL herrscht wieder Windstille und erst weiter oben wird die Luft erneut horizontal bewegt. Am Tag tritt ein Windmaximum im 450 m AGL mit 10 m s^{-1} aus Südwest auf, wobei der Wind weiter oben nicht mehr deutlich abnimmt. Von England kommt am 22.2.2007 ein weiterer, kleiner Keil in der Höhe, der für Augsburg im Tagesverlauf westseitige Anströmung bringt und dessen Achse in der Nacht über Augsburg liegen bleibt. Das Windmaximum aus West von 11 m s^{-1} in 250 m AGL deutet auch für diese Nacht auf einen ausgeprägten Low-Level-Jet hin. Am Tag dreht der Wind von Ost über Süd auf West, wobei er mit der Höhe zunimmt.

Am 23.2.2007 liegt über Westeuropa ein Trog, auf dessen Vorderseite Augsburg antizyklonale Höhenströmung aus Südwest erhält. Für diesen Tag ist aufgrund des fehlenden Druckgradienten am Boden nur sehr schwacher Wind feststellbar und deshalb auch keine eindeutige Richtung.

14.2.2008 bis 24.2.2008

Am 14.2.2008 liegt über Augsburg nordwestliche Höhenströmung von einem Tief über den britischen Inseln. Der Wind kommt am Boden allgemein schwach aus Nord und seine Intensität nimmt mit der Höhe zu.

Der 15.2.2008 ist in allen Schichten von Nordwind geprägt, der mit der Höhe zunimmt. Die Höhenströmung bleibt für den 16.2.2008 unverändert, jedoch verstärkt sich der Wind in den mittleren Atmosphärenschichten (bei ca. 2500 m AGL) auf 18 m s^{-1} . Besonders auffällig ist für dieses Datum wieder der Nachtaufstieg, wo in 150 m AGL ein Geschwindigkeitsmaximum von 8 m s^{-1} gemessen wird. Gut 1000 m höher herrscht fast Windstille mit 1 m s^{-1} . Oberhalb dieses Minimums lebt der Wind erneut auf.

Für den 17.2.2008 bringt ein Hoch über Schottland nordöstliche Höhenströmung, die am Nachmittag auf Nordwest dreht. Der Nachtaufstieg zeigt ein weiteres Mal einen Low-Level-Jet, da der Wind in 250 bis 350 m AGL Spitzenwerte von 10 m s^{-1} aus Osten erreicht und 1000 m höher absolute Windstille gemessen wird. Mittags kommt der Wind aus Nordost und nimmt mit der Höhe zu.

Der 18.2.2008 ähnelt großskalig dem Vortag, wobei sich am Abend ein Keil aus Westen annähert. Auch in dieser Nacht gibt es eine dünne Schicht höherer Windgeschwindigkeit mit 6 m s^{-1} 100 m AGL. Nach oben hin lebt der Wind in der Nacht und am Tag auf und

er dreht vom Boden aus westlicher Richtung auf Nord in der Höhe.

Am 19.2.2008 herrscht in der Höhe sehr schwache Nordwestlage, wobei der Gradient der Isohypsen im Tagesverlauf mit Überqueren der Keilachse verschwindet und die Höhenströmung auf West dreht. In der Nacht dreht der Wind mit der Höhe von Nordwest auf Nordost. Auch für diesen Tag ist ein relativ schwacher, nächtlicher Low-Level-Jet 100 m AGL erkennbar. Zur Mittagszeit kommt der Wind relativ höhenkonstant aus Nord bis Nordost und hat auf 700 m AGL einen Spitzenwert von 6 m s^{-1} und auf 1350 m AGL ein Minimum mit 1 m s^{-1} .

Am 20.2.2008 liegt über Augsburg eine gradientschwache Südwestlage, die im Tagesverlauf auf Nordwest dreht. In der Nacht dreht der Wind der unteren Atmosphärenschichten von Nordost über Süd auf Nordwest. Dabei treten 2 jetähnliche Strukturen auf 400 m AGL mit 7 m s^{-1} und auf 1600 m AGL mit 6 m s^{-1} auf. Der Geschwindigkeitspeak auf 400 m AGL bleibt auch am Tag mit leicht geringerer Geschwindigkeit in der selben Höhe erhalten.

Am 21.2.2008 nehmen die Windgeschwindigkeiten am Tag und in der Nacht deutlich zu. Die Anströmung kommt in den unteren Schichten der Atmosphäre konstant aus West, wobei auch hier wieder ein Low-Level-Jet mit 15 m s^{-1} in 500 m AGL bläst. Die Geschwindigkeiten haben sich im Vergleich zum Vortag verdoppelt. Die Höhenströmung dreht von morgens Nordwest auf Nord, da sich aus Westen eine stärker werdende Hochdruckzunge hereinschiebt, unter deren Achse Augsburg liegt.

Am 22.2.2008 liegt Augsburg wieder unter antizyklonaler Westanströmung, da sich der Jetstream nach Süden verlagert. Durch die Annäherung des Jetstreams ändert sich die Wetterlage, die Windrichtung der unteren Schichten bleibt relativ konstant auf West und die Geschwindigkeit nimmt am Tag bis auf 1200 m AGL und in der Nacht bis auf 1700 m AGL mit Spitzen von 20 m s^{-1} zu.

Am 23.2.2008 schiebt sich im Tagesverlauf ein Höhenkeil über Augsburg. Die Windrichtung bleibt in den unteren Schichten auf West und auch die Windgeschwindigkeiten sind weiterhin relativ hoch (20 m s^{-1}), so dass sich in dieser Nacht ebenfalls kein Low-Level-Jet ausbilden kann.

Am 24.2.2008 legen sich die vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeiten wieder und Augsburg liegt am Abend unter einer südwestlichen Höhenströmung. Im Nachtaufstieg kann sich auf 200 m AGL ein Low-Level-Jet mit 6 m s^{-1} ausbilden und die Windrichtung dreht von Südsüdost am Boden über Nordost auf Nordwest in der Höhe. Mittags herrscht in allen Schichten konstant Westwind mit zunehmender Geschwindigkeit vor.

Die detaillierte Analyse der Strömungsverhältnisse für jeden einzelnen Tag soll einen ersten Einblick geben, wie die großräumige synoptische Lage mit den Windverhältnissen direkt am Untersuchungsort zusammenhängt. Die Low-Level-Jets wurden deshalb immer wieder benannt, da sie häufig die Obergrenze der Mischungsschicht darstellen.

4.2.2 Temperatur

Die Temperatur wird an drei Stationen gemessen, am DWD im Norden der Stadt, an der FH südlich des Stadtkerns und an der LfU-Station am südlichen Stadtrand.

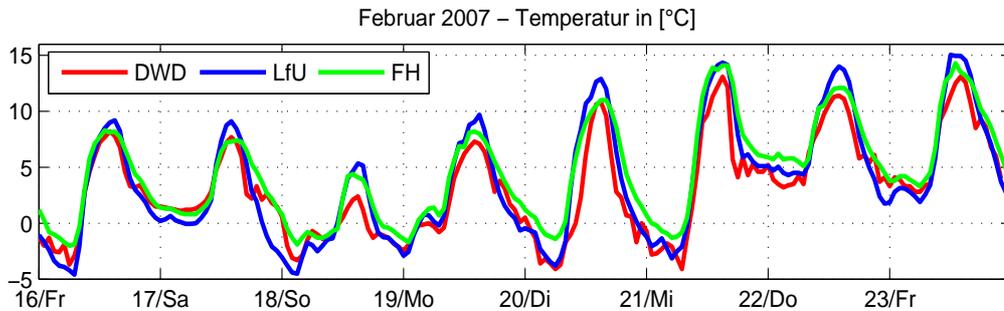


Abbildung 4.9: Temperatur im Februar 2007

Am Anfang der Messperiode 2007 liegt die Temperatur bei -5°C , wobei die FH aufgrund ihrer Stadtlage mindestens 2°C über den anderen Stationen liegt. Das Ceilometer erkennt ab Mitternacht keine Wolken mehr (Abbildung 4.15), sodass die Atmosphäre in dieser Nacht gut auskühlen kann. In der Nacht zum 17.2.2007 fällt die Temperatur nicht unter 0°C , da sich ca. 200 m über dem Boden eine Wolkenschicht befindet, die die langwellige Abstrahlung des Bodens reflektiert und die Auskühlung damit verhindert. Am Tag verschwindet diese Wolkenschicht und die Temperatur kann bis auf 10°C ansteigen. In der Nacht auf Sonntag fällt sie wieder deutlich, wobei die Temperatur in der Stadt bis zu 3°C wärmer bleibt, wie an der LfU. Ebenso dreht am Morgen des 18.2.2007 die Windrichtung von Ost auf West und die Windgeschwindigkeit sinkt auf $2\text{--}3\text{ m s}^{-1}$. Das hat eine Bodennebelschicht zur Folge, die sich erst gegen Abend auflöst und den Tagesgang der Temperatur deutlich abschwächt. In der Nacht zum 19.2.2007 bildet sich der Bodennebel wieder, sodass die nächtliche Auskühlung gering bleibt und die Temperatur nicht so tief wie in der Nacht zuvor fällt. Der Nebel lichtet sich am Tag, die Atmosphäre wird durchmischt und es werden bis zu 10°C gemessen. In den Nächten zum 21.2.2007 und zum 22.2.2007 bildet sich ebenfalls für ein paar Stunden Bodennebel (Abbildung 4.15), der jeweils erst nach Mitternacht entsteht. Dadurch wird die nächtliche Tiefsttemperatur kaum beeinflusst, da die stärkste Auskühlung vor Mitternacht stattfindet. Während des Tages kann die Sonne voll einstrahlen, sodass am Mittwoch bis zu 15°C gemessen werden. Trotz Bewölkung im Tagesverlauf des Donnerstag, ist die Einstrahlung an Donnerstag und Freitag relativ hoch. Die verhältnismäßig hohen Nachttemperaturen sind weder aus der Bewölkung, noch aus der Windrichtung zu erklären. Ein Hinweis findet sich in der Mischungsschicht dieser Tage. Sie ist auch in der Nacht sehr turbulent, sodass wärmere Luft aus höheren Schichten zum Boden gemischt werden kann und die Nachttemperatur deshalb so hoch bleibt.

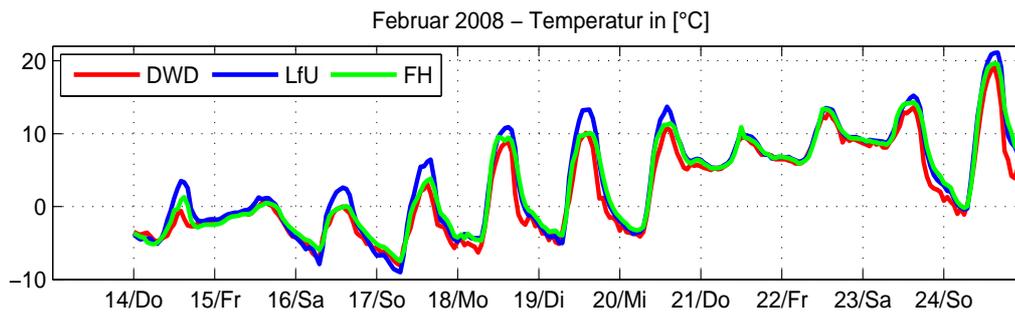


Abbildung 4.10: Temperatur im Februar 2008

Zu Beginn 2008 zeigt die Temperatur fast keinen Tagesgang. Ein Blick in Abbildung 4.16 zeigt die hartnäckige Bodennebelschicht, die sich nur am Nachmittag kurz auflockert. Ebenso sieht man in Abbildung 4.14, dass sich die Einstrahlung am Boden deutlich von Tagen mit klarem Himmel unterscheidet. In der Nacht zum 16.2.2008 lösen sich die Wolken am Himmel auf und die Temperatur fällt bis -8°C . Auch am Tag erreichen die Werte gerade so die Frostgrenze. Ab dem 17.2.2008 erwärmt sich die Atmosphäre stetig bei einem Tagesgang von über 13°C , bis am Abend des 20.2.2008 eine Warmfront aus Westen auf Augsburg trifft. Diese Warmfront hält die Temperatur konstant zwischen 6°C und 14°C und sie fällt erst wieder deutlich in der Nacht auf Sonntag. Dieser letzte Tag des Beobachtungszeitraums hat trotz lockerer Bewölkung einen Tagesgang von fast 20°C .

Vergleichen wir die beiden Messperioden:

Beide Messperioden beginnen relativ zu ihrem Temperaturmittel (2007: $3,1^{\circ}\text{C}$ und 2008: $2,1^{\circ}\text{C}$) kälter und enden wärmer. Ein Blick auf die Temperatur in 850 hPa der Oberschleißheimer Radiosonde schafft Klarheit. Sie liegt am 16.2.2007 um 0:00Uhr bei ca. -6°C und am 22.2.2007 bei knapp unter 0°C . Am 14.2.2008 zeigt die Radiosonde um Mitternacht -2°C , am 24.2.2008 $+5^{\circ}\text{C}$. Die nächtlichen Tiefstwerte vom 16.2.2008 und 17.2.2008 entstehen durch einen arktischen Kaltlufttropfen. Er bringt in 850 hPa Werte bis unter -12°C .

Es ist bekannt, dass die drei Messstationen an unterschiedlichen Orten stehen. Aber wie kann es sein, dass sie bei bedecktem Himmel fast deckungsgleiche Ergebnisse liefern und bei klarem Himmel nicht? Zum einen liegt das an der Stadtlage der FH-Station, da die Temperatur in der Stadt aufgrund des Wärmeinseleffekts grundsätzlich nicht so tief sinken kann, wie an einer Station im Umland (Jacobbeit (1986)). Seltsam ist hingegen, dass die beiden nichtstädtischen Stationen LfU und DWD bei Strahlungswetter nicht die selben Maxima erreichen. Die LfU-Station zeigt bei Strahlungswetter immer höhere Maxima wie DWD- und FH-Station. Dieser Fehler liegt wahrscheinlich an einem mangelhaften Strahlungsschutz.

4.2.3 relative Feuchte

Wie die Temperatur, wird auch die relative Feuchte an drei Stationen gemessen: am DWD im Norden der Stadt, an der FH südlich des Stadtkerns und an der LfU-Station am südlichen Stadtrand.

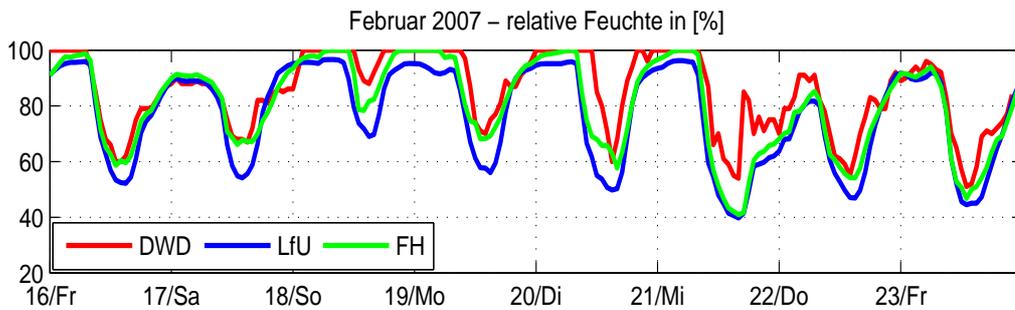


Abbildung 4.11: relative Feuchte im Februar 2007

Der Tagesgang der relativen Feuchte ergibt sich bei synoptisch ungestörten Bedingungen hauptsächlich durch nächtliche Auskühlung der Atmosphäre und Erwärmung im Tagesverlauf. Sinkt die Temperatur in der Nacht, steigt die relative Feuchte an, da kalte Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann. Wenn sich die Atmosphäre am Tag erwärmt, sinkt die relative Feuchte, da warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Dass die relative Feuchte in der Nacht auf 17.2.2007 keine 100% erreicht, liegt an einer Wolkenschicht, durch welche die Atmosphäre nicht weiter auskühlen kann (Abbildung 4.15). Von 18.2.2007 bis 21.2.2007 erreicht sie an DWD und FH jede Nacht 100% und es bildet sich Bodennebel (Abbildung 4.15). Die schwächeren Maxima in der Nacht auf 22.2.2007 und 23.2.2007 sind mit der Temperatur gekoppelt, die während jener Nächte aufgrund der Durchmischung mit höheren Schichten nicht weiter gefallen ist.

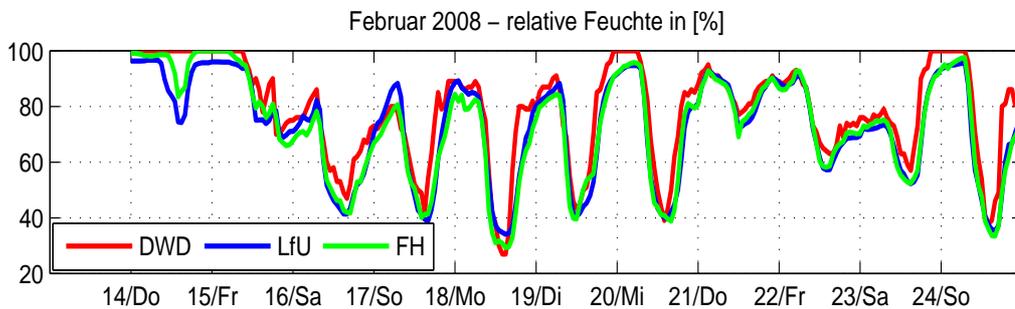


Abbildung 4.12: relative Feuchte im Februar 2008

Nachdem die relative Feuchte am 14.2.2008 und 15.2.2008 aufgrund des Bodennebels auch am Tag sehr hoch ist, reihen sich vom 16.2.2008 bis zum 20.2.2008 fünf Tage mit ausgeprägtem Strahlungswetter aneinander. Diese Strahlungswetterlage sorgt in der

Nacht für eine hohe relative Feuchte und am Tag für eher trockene Luft am Boden. In der Nacht zum 21.2.2008 erreicht die Warmfront Augsburg und bringt insgesamt 1 bis 2 mm Regen (Abbildung 4.14). Schaut man genau auf den Feuchteverlauf, sieht man kurz vor Mitternacht zum 21.2.2008 eine kleine Stufe, nach der die relative Feuchte noch einmal ansteigt. Diese markiert die ersten Regentropfen, die Augsburg erreichen. Den zweiten Niederschlag gibt es in der zweiten Nachthälfte auf 22.2.2008, bevor die relative Feuchte deutlich absinkt. Der 23.2.2008 zeigt nur ein schwaches Tagesminimum, weil die Luftmasse immer noch sehr feucht ist und Durchmischung mit höheren Schichten deshalb keine Abnahme der relativen Feuchte bringt. Man sieht die Feuchte auch noch in der Bewölkung in Abbildung 4.16. Deshalb steigt sie in der Nacht auf 24.2.2008 auf 100%, bevor sie das Tagesminimum eines klassischen Strahlungstags erreicht.

Beim Vergleich der drei Stationen sieht man, dass die Station am LfU gerade 2007 systematisch niedrigere Feuchtwerte liefert. Auch bei der Temperatur (siehe oben) wurde bei den LfU-Werten eine systematische Abweichung festgestellt. Da die Temperatur- und Feuchtwerte an der LfU von einem Kombisensor gemessen werden, ist es durchaus denkbar, dass auch die Werte der relativen Feuchte sprechende Fehler aufweisen.

4.2.4 Sonnenscheindauer, Niederschlag und Bewölkung

Einstrahlung und Niederschlag werden an der DWD-Station gemessen.

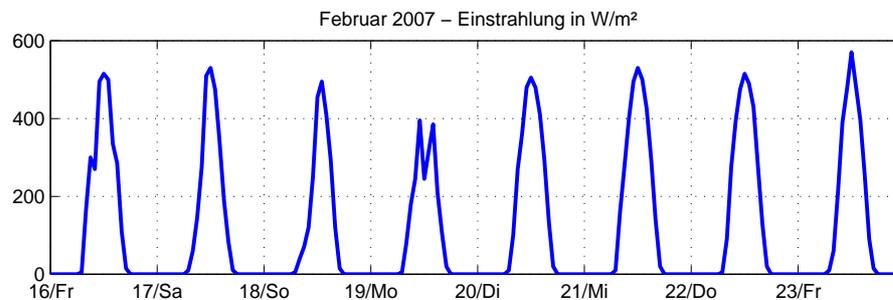


Abbildung 4.13: Einstrahlung im Februar 2007

Am 17.2.2007 ist die Strahlungskurve etwas schmaler, weil sich erst die in der Nacht gebildete Wolkenschicht auflösen muss. Am 18.2.2007 beginnt der Strahlungsverlauf mit einer geringeren Steigung, da erst nach Auflockerung der Bewölkung die zu dieser Jahreszeit maximale Einstrahlung erreicht wird. Am 19.2.2007 ist die Bewölkung zur Mittagszeit so stark, dass sich zwei Maxima bilden. An allen anderen Tagen kann keine Besonderheit festgestellt werden. Sie zeigen einen wolkenfreien Himmel.

2008 gibt der Strahlungsverlauf ein etwas anderes Bild. Am 14.2.2008 und 15.2.2008 kann wegen des Bodennebels wenig solare Strahlung den Boden erreichen. Vom

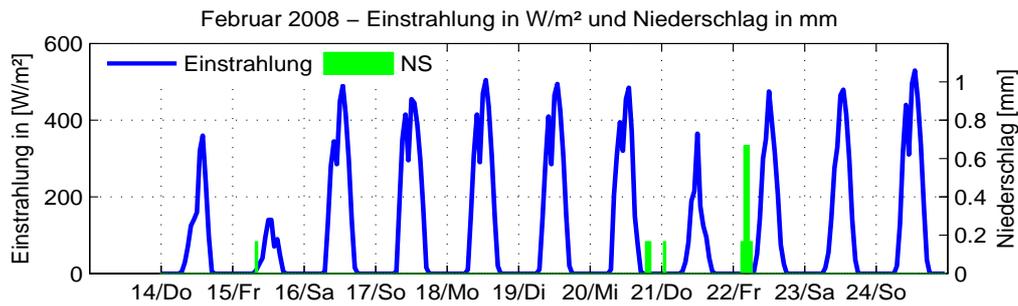


Abbildung 4.14: Einstrahlung und Niederschlag im Februar 2008

16.2.2008 bis zum 20.2.2008 schließen sich fünf Tage mit ausgeprägtem Strahlungswetter an, alle mit einem kleinen sekundären Maximum vor dem Hauptpeak. An allen Tagen liegt die Nachttemperatur deutlich unter Null, sodass sich Reif bilden kann. Das kleine, sekundäre Maximum zu Beginn der täglichen Einstrahlung wird dadurch verursacht, dass Sonnenlicht durch die Reifschicht auf die Messsensorik des Pyranometers scheint. Schmilzt die Reifschicht, hinterlässt sie Wassertropfen auf dem Pyranometer. Diese Tropfen beeinträchtigen die einfallende Sonnenstrahlung. Daher könnte der Einbruch im Graph stammen. Wie bereits erwähnt, zieht von 21.2.2008 bis 23.3.2008 die Kaltfront über Augsburg, deren dichte Bewölkung am 21.2. die Strahlungssumme deutlich reduziert. Der 24.2.2008 ist wieder ein klassischer Strahlungstag.

Der Niederschlag von 20.2.2008 bis 22.2.2008 ist mit großer Sicherheit Regen, da er aus einer Warmfront stammt und die Stationstemperatur zum Fallzeitpunkt nicht unter +5°C liegt. Die 0,1 mm von 15.2.2008 hängen mit einem arktischen Kaltluftvorstoß zusammen. Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von Schneefall auszugehen, da die Kaltfront Augsburg vor Niederschlagsbeginn erreicht haben sollte. Die an der Nachweisgrenze liegende Menge sollte sich aber nicht auf die Messergebnisse der folgenden Tage ausgewirkt haben, da weder für den 15.2.2008, noch für einen anderen Tag der beiden Beobachtungszeiträume eine Schneebedeckung verzeichnet ist. Auch die Tage vor den Beobachtungszeiträumen werden auf Schneelage untersucht. Dabei wird festgestellt, dass keinerlei alter Schnee zu Beginn der Messperioden vorhanden ist (www.wetteronline.de (2011)).

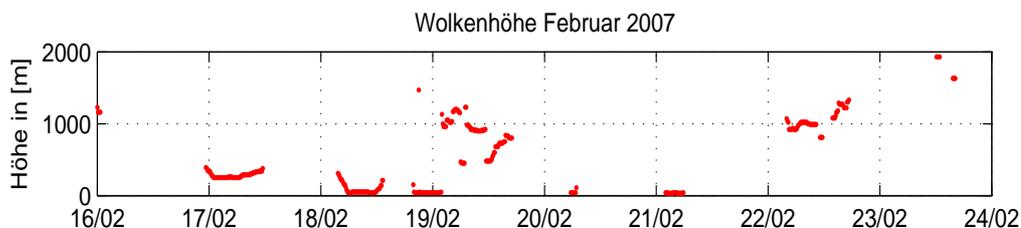


Abbildung 4.15: Wolkenhöhe Februar 2007

Die Entwicklung der Bewölkung wurde oben bereits hinreichend diskutiert. Diese beiden Abbildungen sind zum besseren Verständnis von Temperatur, relativer Feuchte und

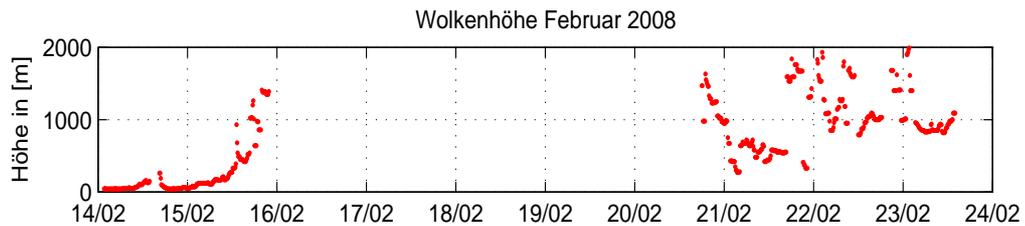


Abbildung 4.16: Wolkenhöhe im Februar 2008

Einstrahlung zu sehen. Gewonnen werden diese Wolkenhöhendaten aus dem Algorithmus des CL31 und stellen nur die Wolkenuntergrenze dar.

4.2.5 Tabellarischer Überblick über die gemessenen Bodenwerte

Um die einzelnen Graphen und Werte noch einmal in einer Übersicht zu sehen, sind die beiden folgenden Tabellen angeführt. Temperatur und relative Feuchte geben jeweils einen Tagesmittelwert an, Sonnenscheindauer und Niederschlag sind als Tagessumme zu sehen.

| 2007 | 16.2. | 17.2. | 18.2. | 19.2. | 20.2. | 21.2. | 22.2. | 23.2. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temp. | 1,9 | 3,1 | 0,1 | 1,4 | 1,9 | 2,6 | 6,4 | 6,5 |
| RH | 83,5 | 81,8 | 97,4 | 90,6 | 92,6 | 82,5 | 77,2 | 77,7 |
| Son. | 569 | 298 | 139 | 103 | 339 | 559 | 435 | 398 |

Tabelle 4.3: Die Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Feuchte und die Tagessumme von Einstrahlung gemessen an der DWD-Station während der Messperiode 2007.

Temp. steht für Temperatur in °C, RH für die relative Feuchte in % und Son. bezeichnet die Sonnenscheindauer in min.

| 2008 | 14.2. | 15.2. | 16.2. | 17.2. | 18.2. | 19.2. | 20.2. | 21.2. | 22.2. | 23.2. | 24.2. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temp. | -3,3 | -1,2 | -3,0 | -3,6 | -0,7 | 0,7 | 1,5 | 6,6 | 8,3 | 9,9 | 6,4 |
| RH | 100,0 | 89,7 | 66,6 | 70,1 | 68,3 | 75,2 | 78,0 | 86,7 | 77,3 | 77,5 | 77,9 |
| Son. | 93 | 20 | 574 | 577 | 581 | 583 | 428 | 83 | 211 | 351 | 601 |
| NS | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 0,1 | 1 | 0 | 0 |

Tabelle 4.4: Die Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Feuchte und die Tagessumme von Sonnenscheindauer und Niederschlag gemessen an der DWD-Station während der Messperiode 2008.

Temp. steht für Temperatur in °C, RH für die relative Feuchte in %, Son. bezeichnet die Sonnenscheindauer in min und NS den Niederschlag in mm.

4.3 Zusammenfassung

Bei der Analyse der Großwetterlagen stellen wir fest, dass beide Winter unterdurchschnittlich viele Westwetterlagen zeigen, dafür um so mehr Hochdrucklagen und -brücken. Obwohl die Großwetterlagen im Beobachtungszeitraum 2007 täglich wechseln, ändern sich die synoptischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet aufgrund der gradientschwachen Lage nur gering. Die Messperiode 2008 wird bis zur Mitte des Beobachtungszeitraums von Westwetterlagen beherrscht, bevor sich nach einem Frontdurchgang ein mächtiges Hoch bildet.

Die angesprochenen Schichten starker Winde wenige 100 m AGL beeinflussen gerade in der Nacht oft die MLH. Sie sind wegen der schwachen großskaligen Strömungen meistens von der Großwetterlage entkoppelt. Diese Low-Level-Jets erreichen in relativ dünnen Schichten hohe Windgeschwindigkeiten (in dieser Arbeit ca. 10 m s^{-1}).

In beiden Wintern erwärmt sich die Atmosphäre zum Ende der Messperiode hin, wobei die Periode 2007 insgesamt um 1°C wärmer wie die Periode 2008 ist. Beim Vergleich der drei meteorologischen Messstationen sieht man an den höheren Temperaturen der Innenstadtstation, dass sich über der Stadt eine Wärmeinsel befindet, die auch von Jacobet (1986) beschrieben wird. Beide Perioden zeigen jeweils mehrere wolkenfreie Tage in Folge, an denen sich keine synoptischen Störungen ereignen. So bildet sich ein deutlich ausgeprägter Tagesgang in der Temperatur, den man auch in der relativen Feuchte sieht. Während der Periode 2007 ist die Atmosphäre etwas feuchter als 2008, sodass sich 2007 häufiger Bodennebel bildet. Während beider Perioden ist keine Schneebedeckung am Erdboden zu erkennen. 2008 zieht eine Warmfront mit sehr wenig Niederschlag über Augsburg.

Kapitel 5

Analyse des Bodenwinds

Dieses Kapitel analysiert die Windregimes während der beiden Messperioden. Dazu werden Windrichtung und -geschwindigkeit der drei meteorologischen Messstationen erörtert und verglichen.

5.1 Die drei Messstationen im Vergleich

Für die Untersuchungen stehen drei Messstationen zur Verfügung: am Flughafen nördlich der Stadt, südlich des Stadtkerns an der Fachhochschule und am Rande des südlichen Vororts Haunstetten am Landesamt für Umwelt. Wie oben schon erwähnt wird die Station am Flughafen vom Deutschen Wetterdienst betreut. Der Windmast an der FH steht sehr knapp an einem hohen Gebäude und ist auf einer Halbseite von Laubbäumen flankiert. Am LfU wird der Wind über Dachniveau an einem Masten in mindestens 20 m Höhe gemessen. Mit Blick auf die lokale Situation der jeweiligen Messstation werden im Folgenden Windrichtung und Windgeschwindigkeit für jeden Messort analysiert.

5.1.1 Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Februar 2007

Zu Beginn der Messperiode weht der Wind an den ersten beiden Tagen doppelt so stark verglichen mit der restlichen Messperiode. Dazu passend ist auch die Windrichtung am 16.2.2007 und besonders am 17.2.2007 sehr konstant, bevor sie für den Rest der Periode meist sehr schwer zu erfassen ist. Bei genauerer Analyse der Windgeschwindigkeit stellt man fest, dass die einzelnen Windspitzen an DWD und LfU trotz einer gewissen Unschärfe doch immer auf den selben Zeitpunkten liegen. Die Werte der FH-Station decken sich weniger gut mit den anderen beiden Stationen. Es ist anzunehmen, dass die Station an der FH zum einen zu stark durch umstehende Gebäude und Bäume beeinflusst wird, zum anderen wird der Luftstrom an einer Innenstadtstation durch die rauhere Oberfläche stärker abgebremst, als in den Stadtrandbereichen.

Ein anderer Zeitraum (21.2.2007) fällt auf, im welchem die Windgeschwindigkeit an der

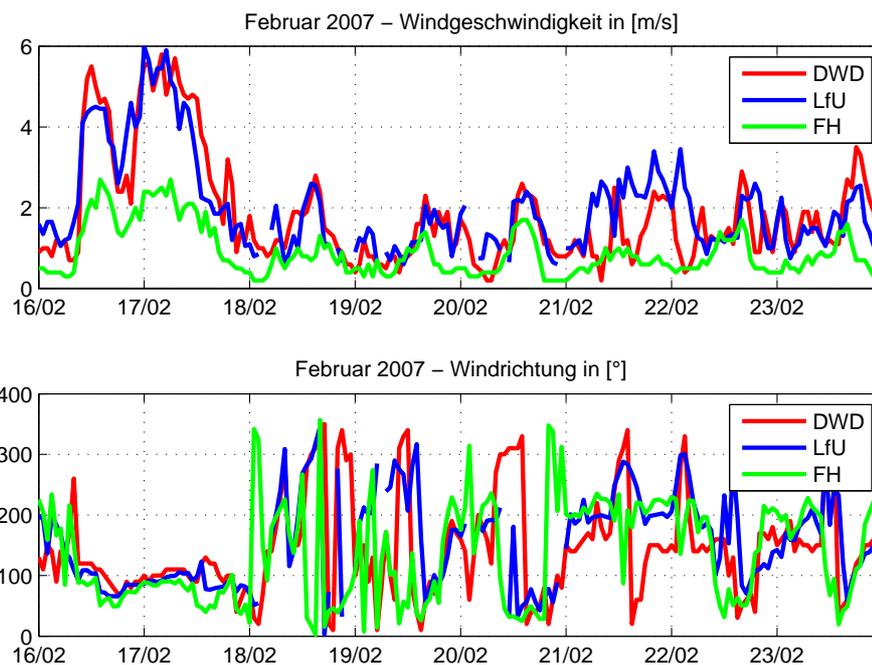


Abbildung 5.1: Beide Zeitreihen erstrecken sich von 16.2.2007 bis 23.2.2007. Das obere Bild zeigt die Windgeschwindigkeit, welche in m s^{-1} angegeben ist. Der untere Plot zeigt die Windrichtung in *Grad*. In rot erscheinen die Werte der DWD-Station, in blau die LfU-Station und in grün die Station an der FH.

LfU im Mittel 1 m s^{-1} höher ist, wie am DWD. Zu dieser Zeit kommt die Anströmung aus Süden, so wird der Wind über der Stadt aufgrund der größeren Oberflächenrauigkeit etwas abgebremst (Rotach (1999)) und weht am Flughafen ein bisschen schwächer. Die Tage 18.2.2007, 19.2.2007 und 20.2.2007 zeigen am Nachmittag jeweils einen geringen Anstieg der Windgeschwindigkeit aus nordöstlicher Richtung. Auch die Mischungsschicht zeigt an besagten Nachmittagen einen deutlichen Anstieg, der sich mit der Windgeschwindigkeit deckt. Somit sorgt die solare Einstrahlung an diesen Tagen nicht nur für ein Anwachsen der Mischungsschicht, sondern auch für schwachen Taleinwind im Lechtal. Allgemein sind solche Talwindssysteme besonders aus engen Gebirgstälern bekannt, können aber auch in schwach ausgeprägten Tälern wie dem Lechtal entstehen (Jacobit (1986)).

5.1.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Februar 2008

Der 14.2.2008 beginnt mit einem halben Tag schwachen Winds, bevor die Anströmung auf Nordost dreht und sich bis zum 17.2.2008 nicht mehr ändert. Der Wind erreicht in dieser Zeit maximal 5 m s^{-1} . Am 17.2.2008 fällt die Windgeschwindigkeit und lässt keine Richtung mehr erkennen. Nachdem der Wind am 18.2.2008 schwach aus Süden weht, stellt sich am 19.2.2008 das bereits oben genannte Talwindssystem wieder ein. Nachts

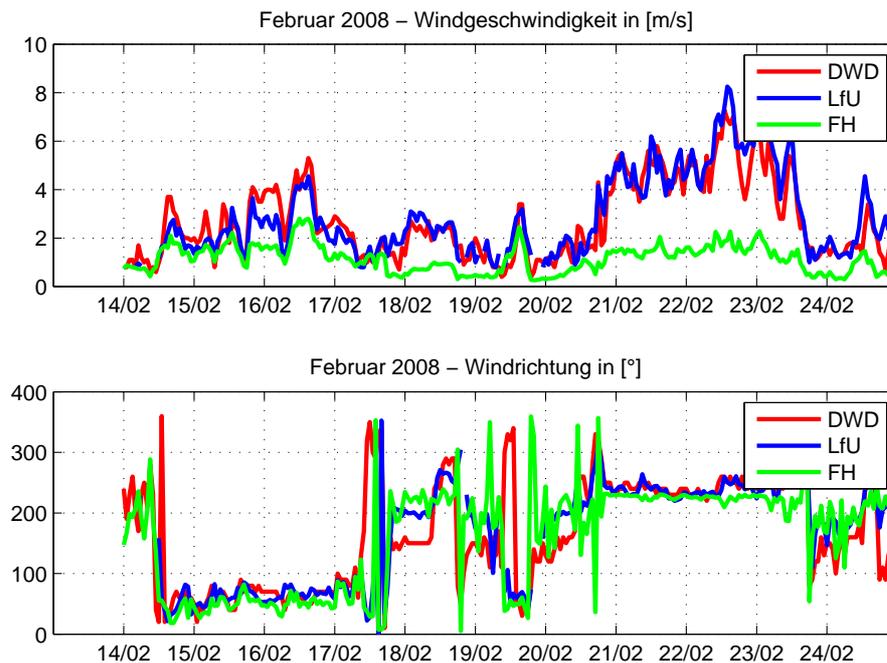


Abbildung 5.2: Beide Zeitreihen erstrecken sich von 14.2.2008 bis 24.2.2008. Das obere Bild zeigt die Windgeschwindigkeit in m s^{-1} . Der untere Plot zeigt die Windrichtung in *Grad*. In rot erscheinen die Werte der DWD-Station, in blau die LfU-Station und in grün die Station an der FH.

kommt die Anströmung aus Süden und der Wind weht sehr schwach, am Nachmittag des 19.2.2008 sieht man wieder eine deutliche Windspitze aus Südost mit über 3 m s^{-1} . Am 20.2.2008 nimmt die Windgeschwindigkeit zu und der Wind kommt von 21.2.2008 bis 23.2.2008 aus Südwesten. In diesem Zeitraum sieht man an der abweichenden Windrichtung, wie stark die FH-Station von den umstehenden Gebäuden und Bäumen abgeschirmt wird. Sie misst nur Windgeschwindigkeiten bis 2 m s^{-1} , die anderen beiden Stationen aber 7 bis 8 m s^{-1} . Aus diesem Grund wird den Windinformationen an der FH in dieser Arbeit mit der nötigen Skepsis begegnet. Am 24.2.2008 herrscht Südanströmung mit bis zu 4 m s^{-1} .

Wie schon 2007 zu erkennen, ist die Windgeschwindigkeit bei Südwind an der LfU höher als beim DWD, bei Anströmung aus Nordosten misst der Flughafen den stärkeren Wind. Auch das ist ein Beweis dafür, dass sich die Oberflächenrauigkeit der Stadt auf die bodennahe Windgeschwindigkeit auswirkt (Rotach (1999)).

5.2 Detaillierter Vergleich von DWD-Station und LfU-Station

In Abbildung 5.3 werden Windrichtung und -geschwindigkeit in Form von vier Windrosen geplottet. Abbildung 5.3a) und 5.3c) zeigen die Windverteilung im Februar 2007, Abbildung 5.3b) und 5.3d) den Februar 2008.

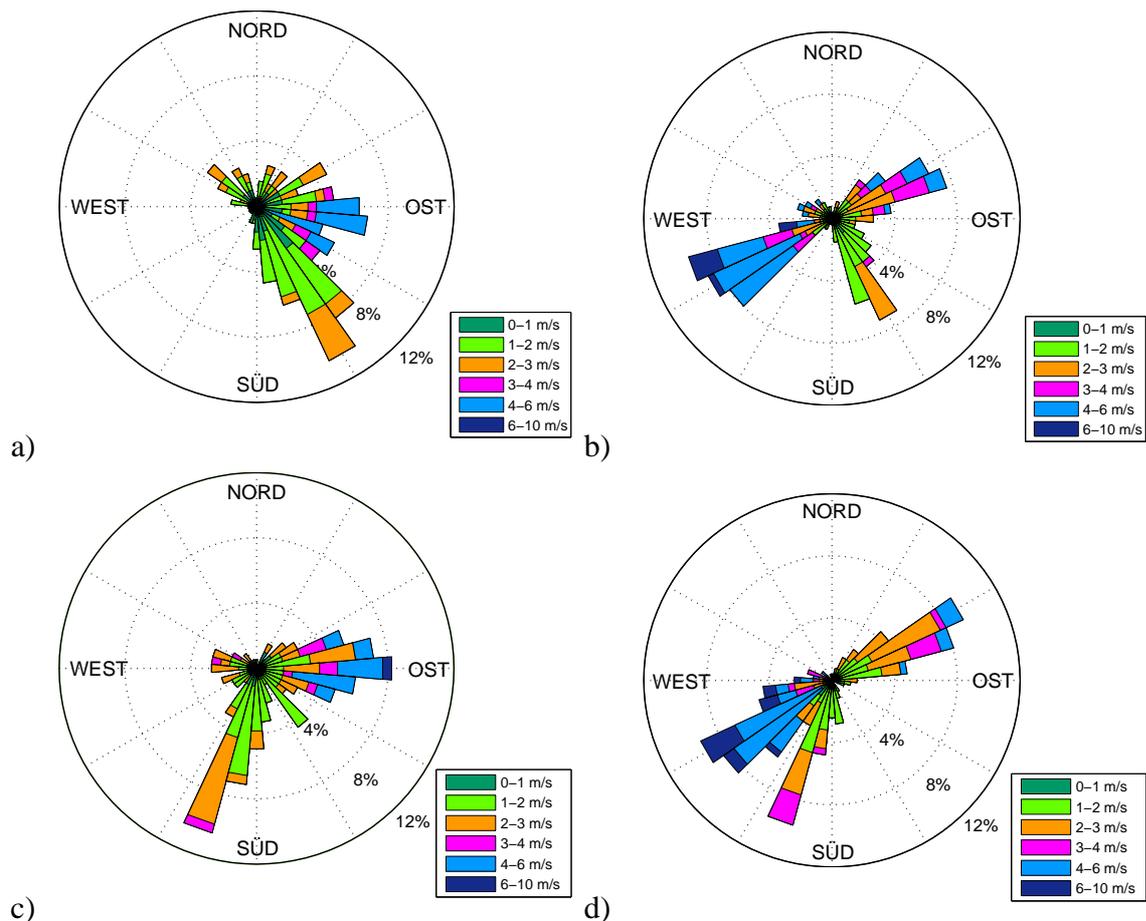


Abbildung 5.3: Windrichtung und Windgeschwindigkeit an DWD-Station (oben) und LfU-Station (unten). Bild a) und c) zeigen Februar 2007, Bild b) und d) Februar 2008. Die Länge der Pfeile geben die Häufigkeit der angezeigten Windrichtung in Prozent an, die Farben zeigen die Geschwindigkeit.

Die Hauptwindrichtungen sind in Augsburg West-Süd-West und Ost-Nord-Ost (Jacobeit (1986)). Diese Windverteilung liegt an der großräumigen Lage Augsburgs in der außertropischen Westwindzone. Regional wird die Anströmung nach Jacobeit (1986) durch die Alpen im Süden und die schwäbische Alp im Nord-Westen beeinflusst. Wie wir in den Bildern 5.3b) und 5.3d) sehen, gibt es im Februar 2008 zufällig genau zwei Windereignisse, die aus diesen Richtungen kommen. Während des Ost-Nord-Ostwinds liegt Mitteleuropa unter einer überwiegend zyklonalen Westlage (**WZ**). Von 21.2.2008

bis 23.2.2008 hat sich eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa (**BM**) gelegt, die an diesen Tagen für West-Süd-Westwind in Augsburg sorgt.

Gemeinsam ist beiden Jahren, dass Winde $< 3 \text{ m s}^{-1}$ mehrheitlich aus Süden kommen, was besonders 2007 gut zu sehen ist. Dieser Effekt schwacher Winde aus Süden liegt an der Tallage Augsburgs (Jacobeit (1986)). Bei einem klassischen Nord-Süd orientierten Tal, das nach Norden abfällt, ist (sofern keine anderen synoptischen Einflüsse vorhanden sind) Nachts bis Vormittags talausfließender Wind aus Süden zu erwarten, am Nachmittag und Abend taleinfließender Wind aus Norden. So ein Talwindssystem bildet sich durch den Talabfall nach Norden und den tagesperiodischen Wechsel von Ein- und Ausstrahlung im Sinne eines Berg-Tal-Windsystems aus.

In Augsburg werden während der beiden Messperioden jedoch fast keine Ereignisse mit Anströmung aus West bis Nord-Nord-Ost gezählt. Somit kann in Augsburg während der beiden Beobachtungszeiträume im Sinne eines Talwindsystem nur eine Windrichtung, nämlich Südwind festgestellt werden. Man sieht, dass der nachmittägliche und abendliche Taleinwind fast gänzlich fehlt. Diese Erscheinung lässt sich durch die im Tagesverlauf besonders über urbanem Gebiet einsetzenden Turbulenzen erklären, die zum einen die MLH anheben, zum anderen für eine Unterbrechung des ohnehin schwach ausgeprägten Talwindsystems verantwortlich sein können (Emeis (2004)). Des Weiteren ist das Lechtal bei Augsburg nur sehr schwach ausgeprägt, wodurch sich ein Talwindssystem nur bei sehr gradientschwachen Wetterlagen ausbilden kann und von stärkeren überregionalen Strömungen sofort zerstört wird.

Eine weitere Beobachtung ist, dass der Wind über der Stadt geringfügig seine Richtung ändert. An der LfU weht schwacher Wind meist aus Süd-Süd-West, am Flughafen eher aus Süd-Süd-Ost.

Die Winde $> 3 \text{ m s}^{-1}$ aus östlichen Richtungen stammen während der ersten Messperiode vom 16.2.2007 und 17.2.2007. Im Beobachtungszeitraum 2008 kommen die beiden Perioden stärkerer Anströmung von einem Kaltlufttropfen ab dem 15.2.2008, welcher Ostwind in Augsburg bringt und von einem Frontdurchgang, der von 21.2.2008 bis 23.2.2008 für Westwind sorgt und sogar Niederschläge bringt.

Welche Details lassen sich mit Hilfe von Tabelle 5.1 erkennen?

2007 liegen 85% der gemessenen Windgeschwindigkeiten unter 3 m s^{-1} , 2008 nur 64%. In Tabelle 5.1 sehen wir, dass 2007 am Flughafen 26.5% der gemessenen Windgeschwindigkeiten unter 1 m s^{-1} liegen, an der LfU lediglich 12.6%. Auch im Winter 2008 werden am Flughafen fast doppelt so viele Ereignisse $< 1 \text{ m s}^{-1}$ wie an der LfU gemessen. Besonders 2007 sieht man, dass die Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten von 2-3 m s^{-1} das prozentuelle Defizit am LfU ausgleichen. Das liegt an den schwachen Talauswinden,

| Windgeschw. m s^{-1} | 0-0.5 | 0.5-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-6 | 6-10 | mittl. Windge. |
|-------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------------------------|
| DWD 2007 % | 3.6 | 22.9 | 41.1 | 17.7 | 3.6 | 10.9 | 0.0 | 1.85 m s^{-1} |
| LfU 2007 % | 0.0 | 12.6 | 45.1 | 26.4 | 5.5 | 9.9 | 0.5 | 2.02 m s^{-1} |
| DWD 2008 % | 0.8 | 7.2 | 34.8 | 21.2 | 11.4 | 21.2 | 3.4 | 2.72 m s^{-1} |
| LfU 2008 % | 0.0 | 4.8 | 33.3 | 25.7 | 8.4 | 21.7 | 6.0 | 2.94 m s^{-1} |

Tabelle 5.1: Vergleich der Windgeschwindigkeitsverteilung in % an DWD-Station und LfU-Station

die durch die größere Rauigkeit der Stadtoberfläche zusätzlich abgebremst werden. Ein weiterer Unterschied liegt in der mittleren Windgeschwindigkeit. Sie ist während der Periode 2007 am DWD 0.17 m s^{-1} niedriger als an der LfU, 2008 sogar 0.22 m s^{-1} . Das liegt unter anderem an der deutlich größeren Messhöhe, in der am Landesamt für Umwelt gemessen wird. Somit wird die Strömung an der DWD-Station in einem Niveau gemessen, in welchem sie stärker von der Bodenreibung gebremst wird, wie an der LfU.

5.3 Zusammenfassung

An drei Stationen werden Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen, wobei die FH-Station, die sich in der Stadt befindet, sehr von umstehenden Bäumen und Gebäuden beeinflusst wird.

Die ersten zwei Tage der Periode 2007 kommt der Wind aus Ost mit bis zu 6 m s^{-1} , dann bildet sich ein leichtes Talwindssystem aus, welches in der Nacht für schwache Windgeschwindigkeiten talauswärts sorgt. Zu Beginn der Periode 2008 weht Ostwind mit 5 m s^{-1} , dann flaut der Wind ab, und es entstehen schwache Talauswinde aus Süden. An den letzten vier Tagen des Beobachtungszeitraums im Februar 2008 sorgt eine Warmfront aus Westen für Windgeschwindigkeiten über 8 m s^{-1} .

In beiden Perioden kommen Windgeschwindigkeiten $> 3 \text{ m s}^{-1}$ aus West-Süd-West oder Ost-Nord-Ost. Schwächere Winde wehen meist entlang der Talrichtung nach Norden. Aufgrund der Talorographie werden bei schwachem Wind an LfU (südlicher Stadtrand) und DWD (Flughafen nördlich der Stadt) geringe Unterschiede in der Windrichtung festgestellt.

Wie bereits Jacobeit (1986) festgestellt hat, sind die Hauptanströmungsrichtungen im Untersuchungsgebiet West-Süd-West und Ost-Nord-Ost. 2008 gibt es zwei Windereignisse mit genau dieser Anströmung. Man erkennt ein Talwindssystem bei synoptisch ruhiger Lage. Dieses Talwindssystem wurde ebenfalls bereits von Jacobeit (1986) beschrieben. In Augsburg kann das Talwindssystem während der Beobachtungszeiträume nur in der Nacht erkannt werden, da die Atmosphäre am Tag durch einstrahlungsbedingte Turbulenzen zu stark durchmischt wird und das Talwindssystem somit gestört wird. Diese Störfaktoren

beschreibt auch Emeis (2004). Der Einfluß der größeren Oberflächenrauigkeit der Stadt, wie ihn Rotach (1999) zeigt, sorgt für ein Abbremsen des Windes und somit für niedrigere Windgeschwindigkeiten im Lee der Stadt.

Kapitel 6

Mischungsschichthöhe

In diesem Kapitel wird die Mischungsschichthöhe mit einem Ceilometer und unter Verwendung diverser Gradientenverfahren aus den Daten der Oberschleißheimer Radiosonde bestimmt. Anschließend wird jeder einzelne Tag auf seine MLH hin untersucht und die Ergebnisse für eine abschließende Statistik verwendet.

6.1 Mischungsschicht und synoptische Größen

In Kapitel 4 wurden bereits die Strömungsverhältnisse während der Beobachtungszeiträume beleuchtet, jetzt wird der direkte Zusammenhang zwischen der vom Ceilometer detektierten Mischungsschichthöhe und den meteorologischen Parametern in der jeweiligen Schicht hergestellt. Dazu schauen wir die Temperatur, die relative Feuchte, das Mischungsverhältnis und die virtuellpotentielle Temperatur, sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit jedes einzelnen Radiosondenaufstiegs an und vergleichen Auffälligkeiten mit den Werten des Ceilometers. Die MLH wird vom Ceilometer in Mittelungen über jeweils 10 Minuten bei einer vertikalen Standardauflösung von 10 m angegeben. Die Radiosonde steigt um 0:00 Uhr und um 12:00 Uhr in Oberschleißheim auf. Oberschleißheim liegt knapp 50 km östlich von Augsburg. Leider ist keine konstante vertikale Auflösung der Radiosondendaten gewährleistet, da sie von der Homepage der “University of Wyoming” (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) stammen und dort nicht der komplette Datensatz verfügbar ist.

Um die Aussagekraft der Ceilometers zu erhöhen, werden die MLH-Werte zum Zeitpunkt jedes Radiosondenaufstiegs über eine Stunde gemittelt. So läuft man nicht Gefahr, bei unruhiger MLH durch einen ausreißenden Wert in die Irre geführt zu werden.

6.2 Ceilometer und Radiosonde

Das Ceilometer ermittelt die MLH über die Laufzeit seines rückgestreuten Lasersignals, wie bereits in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurde. Diese Methode erlaubt es, über ein optisches Messprinzip einen kontinuierlichen Verlauf der MLH zu erfassen.

Die Mischungsschicht kann aber auch durch verschiedene andere Methoden ermittelt werden. Ein Gradient in der potentiellen oder der virtuellpotentiellen Temperatur (also eine Änderung der Stabilität), ebenso ein Sprung in der absoluten Feuchte zeigen einen Schichtübergang an. Auch ein Sprung im Mischungsverhältnis oder ein simpler Richtungswechsel des Windes zeigen den Übergang von einer Schicht zur Nächsten. Die gängigste Methode ist die Bestimmung der Richardsonzahl Ri . Bevor in Abschnitt 6.3 jeder einzelne Tag im Detail untersucht und beschrieben wird, werden die einzelnen Gradientenmethoden erläutert. Dabei sieht man, dass Qualität und Aussagekraft der angewendeten Methoden stark von den synoptischen Verhältnissen abhängen.

6.2.1 Vorstellung der verschiedenen Methoden

Die vier Methoden, die in dieser Arbeit angewendet werden, findet man unter anderem bei Seibert et al. (2000) beschrieben und auch Kollmann (2008) hat diese zum Teil in seiner Diplomarbeit angewendet.

- Richardsonzahl: nach Etling (2002) gibt die Richardsonzahl einen direkten Zusammenhang zwischen Temperaturschichtung und Turbulenzverhalten wieder. Als kritische Richardsonzahl bezeichnet man den Wert 0,25. Gilt $Ri > 0,25$, so ist die vorliegende Schicht dynamisch stabil, bei $Ri < 0,25$ ist die Schichtung dynamisch instabil und turbulent (Stull (2000)). Auch von Baumann-Stanzer and Groehn (2004) und Schreiter (2010) wurde die Richardsonzahl zur Detektierung der MLH verwendet.

Um die Mischungsschichthöhe zu finden, werden bei jedem Radiosondenaufstieg die Richardsonzahlen der einzelnen Schichten berechnet. Eine Schicht erstreckt sich in diesem Fall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten der Radiosonde.

Um anhand der Richardsonzahl die Mischungsschichthöhe zu finden, sucht man vom Boden beginnend die erste Schicht mit $Ri > 0,25$. Um den Graph der Ri anschaulicher zu gestalten, werden bei ihrer Berechnung nur Schichten verwendet, deren Windgeschwindigkeitsänderung innerhalb der Schicht über $0,5 \text{ m s}^{-1}$ liegt. Diese Modifizierung ist vertretbar, da bei zu geringer Windgeschwindigkeit im Nenner der Gleichung 6.1 Ri zu groß wird. In Abbildung 6.2 wird die Richardsonzahl im linken oberen Plot dargestellt.

$$Ri = \frac{g}{T_0} \frac{\frac{\partial \Theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (6.1)$$

- g ... Schwerebeschleunigung in m s^{-2}
 T_0 ... Lufttemperatur 2m über der Erdoberfläche in [K]
 Θ ... Potentielle Temperatur in [K]
 u ... Horizontale Windkomponente aus West in m s^{-1}
 v ... Horizontale Windkomponente aus Süd in m s^{-1}

- Potentielle Temperatur: ist eine thermodynamische Größe eines Luftpakets. Sie wird bestimmt indem man das Paket adiabatisch¹ auf einen Druck von 1000 hPa bringt und dann seine Lufttemperatur bestimmt (Etling (2002)). In einer neutral geschichteten Atmosphäre wäre in jeder Höhe die gleiche potentielle Temperatur vorzufinden.

In dieser Arbeit wird der stärkste Gradient von Θ gesucht, um die MLH zu finden. Die gleiche Methode ist bei Baumann-Stanzer and Groehn (2004) beschrieben. Zusätzlich muss der Gradient von Θ mindestens 5 K km^{-1} betragen und die Inversionsobergrenze 2 K wärmer wie die Inversionsuntergrenze sein (Heffter (1980)). In Abbildung 6.2 ist Θ in der rechten oberen Abbildung geplottet.

- Mischungsverhältnis: es gibt die Masse vorhandenen Wasserdampfs pro Masse trockener Luft an. Da der Wasserdampfgehalt pro Kilogramm Luft im Grammbereich liegt, wird als Einheit [g kg^{-1}] angegeben. An der Obergrenze der Mischungsschicht ist ein deutlicher Gradient des Mischungsverhältnisses zu erwarten. Als Richtwert geben Baumann-Stanzer and Groehn (2004) $0,01 \text{ g kg}^{-1}$ Abnahme des Wasserdampfgehalts an. Das Mischungsverhältnis ist in Abbildung 6.2 links unten zu finden.
- Relative Feuchte: sie gibt den Anteil des Dampfdrucks vom Sättigungsdampfdruck in % an. Sind Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck gleich, ist die Luft zu 100% gesättigt (Etling (2002)).

Für diese Arbeit wird wie bei Hennemuth and Lammert (2006) der maximale Gradient der relativen Feuchte gesucht. Der zugehörige Plot ist in Abbildung 6.2 rechts unten zu finden.

¹adiabatisch kommt aus dem Griechischen und bedeutet "nicht-hindurchgehen". In diesem Fall bedeutet adiabatisch, dass ein Paket seinen Zustand ändert, ohne das dabei thermische Energie mit seiner Umgebung ausgetauscht wird.

6.2.2 Ein Beispieltag

Dieser Abschnitt zeigt anhand der Abbildungen 6.1 und 6.2, welche Grafiken zur Bestimmung der Mischungsschicht in Abschnitt 6.3 verwendet werden. Die einzelnen Tage werden in den Anhängen D, E, F und G abgebildet.

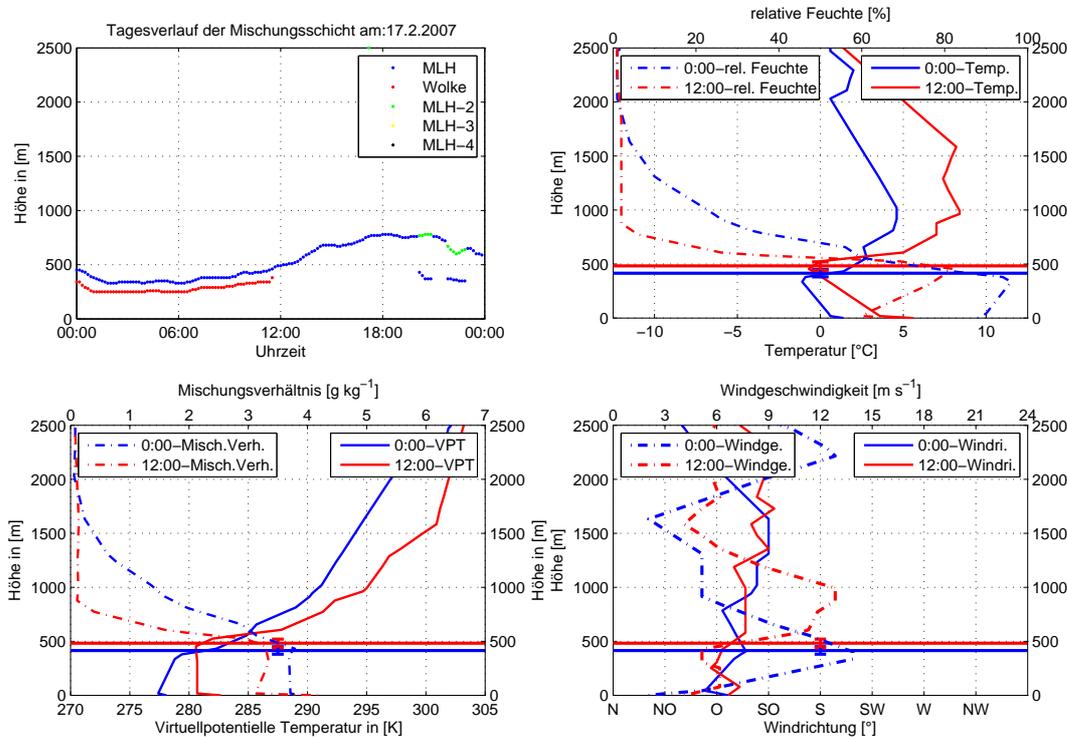


Abbildung 6.1: Zeigt für den 17.2.2007 den Verlauf der Mischungsschichthöhe, wie er von Ceilometer gemessen wird und verschiedene Parameter, die bei den Radiosondenaufstiegen um 0:00UTC (blau) und 12:00UTC (rot) gemessen werden.

Im Plot links oben ist der Tagesgang der Mischungsschicht abgebildet, wie ihn das Ceilometer sieht. MHL bis MLH-4 sind die Minima der Volumenrückstreugradienten (siehe Abschnitt: 3.3.2), wobei die Mischungsschicht unter MLH zu finden ist.

Die durchgezogene Linie im rechten oberen Bild gibt die Temperatur wieder, die unterbrochene Linie die relative Feuchte.

Im Bild links unten ist gestrichelt das Mischungsverhältnis aufgetragen. Die durchgezogene Linie markiert den Verlauf der virtuellpotentiellen Temperatur. Sie wird hier der potentiellen Temperatur vorgezogen, da in der VPT die in der Luft enthaltene Feuchte über den virtuellen Temperaturzuschlag miteinbezogen wird. So kann die VPT bei unterschiedlicher Luftfeuchte wie Θ bei trockener Luft für Stabilitätsanalysen verwendet werden (siehe Abschnitt: 2.1.2).

Der Plot unten rechts zeigt Windgeschwindigkeit (unterbrochene Linie) und Windrichtung (durchgezogene Linie).

Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie zu diesen beiden Zeitpunkten vom Ceilometer detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über die gemittelt wird.

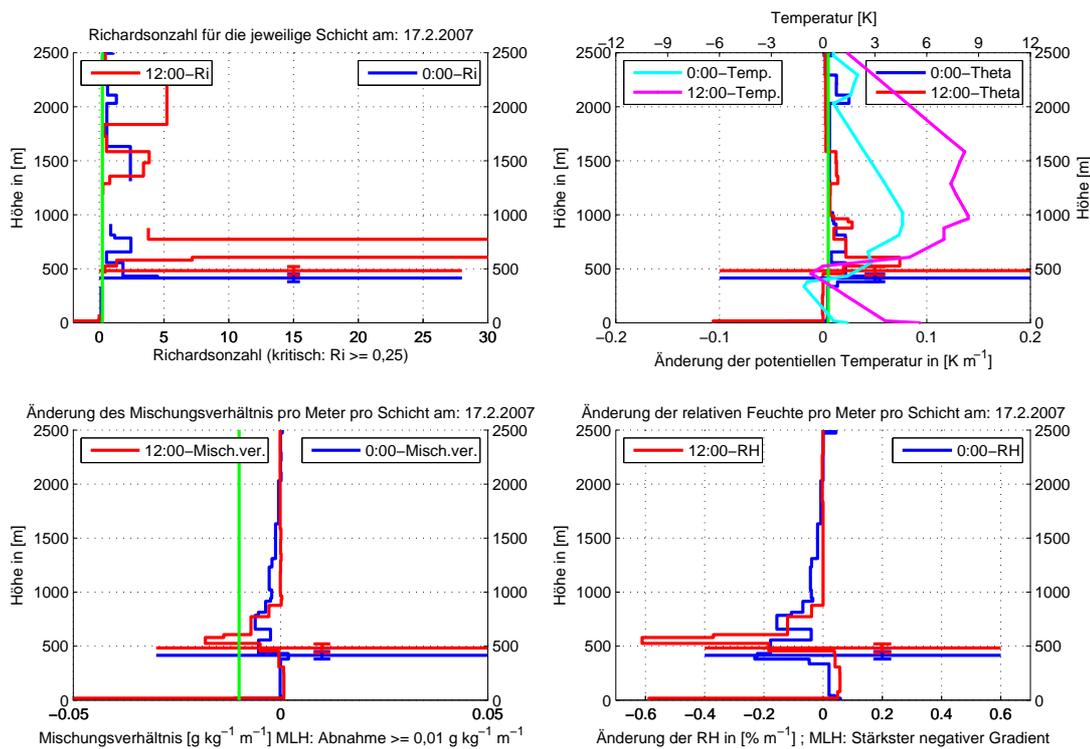


Abbildung 6.2: Zeigt die Radiosondenaufstiege vom 17.2.2007 um 0:00UTC und 12:00UTC mit jeweils einem anderen Kriterium zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe.

Im Plot links oben ist die Richardsonzahl aufgetragen, die kritische Ri wird durch die vertikale grüne Linie markiert. Liegt die Richardsonzahl links der grünen Linie, ist die Schicht, für die Ri berechnet wird instabil, also durchmischt. Ri rechts der grünen Linie ist nach Baumann-Stanzer and Groehn (2004) stabil.

In der Abbildung rechts oben ist die Änderung der potentiellen Temperatur geplottet. Die vertikale grüne Linie markiert den Grenzwert von 5 K km^{-1} , der bei Heffter (1980) als Indikator für die Mischungsschichtgrenze angeführt wird. Zusätzlich ist der Verlauf der Temperatur geplottet, damit die Temperatur bei einem passenden Gradienten an Ober- und Untergrenze der Inversion überprüft werden kann (Heffter (1980)).

Im Bild links unten sind die Gradienten des Mischungsverhältnisses aufgetragen. Hier markiert die vertikale grüne Linie die kritische Abnahme des Mischungsverhältnisses. Sobald die Abnahme des Mischungsverhältnisses $0,01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ist, gilt diese Schicht gemäß ihres Feuchterückgangs als Mischungsschicht (Baumann-Stanzer and Groehn (2004)).

Der Plot unten rechts zeigt die relative Feuchte. Hier gilt nach Hennemuth and Lammert (2006) lediglich der stärkste Gradient.

Die Werte von 0:00UTC sind in blau und die Werte von 12:00UTC in rot aufgetragen. Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie vom Ceilometer zu den beiden Zeitpunkten detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über den gemittelt wird.

6.3 Detaillierte Untersuchung der Mischungsschicht

Im folgenden Abschnitt wird der Verlauf der Mischungsschicht genau analysiert. Dafür werden alle Beobachtungstage wie in Abschnitt 6.2.2 dargestellt und untersucht. Sie sind in Anhang F und G zu finden.

6.3.1 Die Mischungsschicht im Februar 2007

Dieser Abschnitt zeigt den Verlauf von Mischungsschicht und Wolkenhöhe während der Messperiode im Februar 2007. Nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf Abbildung 6.3.

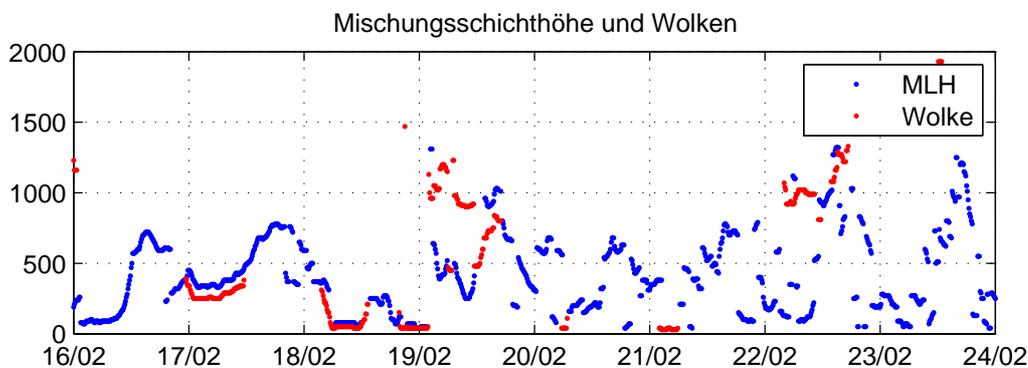


Abbildung 6.3: Verlauf der Mischungsschicht (blau) und der Wolkenuntergrenze (rot), wie sie vom Ceilometer an der FH in Augsburg 2007 gemessen wurden

Am 16.2.2007 wird nachts ein schwaches Windmaximum in 200 m AGL festgestellt. Das Ceilometer sieht die MLH zwischen 100 m AGL und 250 m AGL, folglich liegt der Mittelwert der MLH bei etwa 200 m AGL. Ebenso nimmt der Gradient der virtuell potentiellen Temperatur (VPT) mit der Höhe bei 200 m AGL deutlich ab. Die Ri zeigt in gleicher Höhe eine geringe Stabilitätszunahme, der Gradient von Θ sinkt auf Null, das heißt die Mischungsschichthöhe bildet in der Nacht den Übergang von stabil am Boden zu neutral darüber. Wir folgern daraus eine Bodeninversion. In Mischungsverhältnis und relativer Feuchte ist der Übergang ohne zusätzliche Information nicht zu erkennen. Am späten Vormittag wird die MLH zusätzlich zur tageszeitlichen Einstrahlung durch auflebenden Bodenwind aus Osten sehr rasch von 100 m AGL bis in 500 m AGL zu Mittag gehoben. Am Nachmittag steigt sie weiter bis auf 700 m AGL. Die darüberliegende stabile Sperrschicht ist sehr gut in Θ , sowie in den Gradienten des Mischungsverhältnisses und der RH zu sehen.

Am 17.2.2007 dominiert weiterhin die Ostströmung. Über der MLH, die nachts in 450 m AGL und am Tag nur 50 m höher liegt, hat sich durch starke und warme Ostwinde (bis 14 m s^{-1}) eine massive Inversionsschicht gebildet. Zu Mittag weist die

Inversion einen Gradienten von über $1^{\circ}\text{C} / 10 \text{ m}$ auf. Diese extrem stabile Deckschicht verhindert jedes Aufbrechen und Anwachsen der Mischungsschicht. Auch die Ri zeigt unterhalb der MLH eine turbulent durchmischte Schichtung und oberhalb eine deutliche Stabilitätszunahme an. Weiters stimmen die Nachtwerte von Θ , das Mischungsverhältnis und die RH exakt mit den Werten des Ceilometers überein. Am Tag zeigen sie die Höhe der Deckschicht.

Am 18.2.2007 liegt die MLH in der Nacht auf 570 m AGL. Der starke Wind vom Vortag hat abgenommen und die Windrichtung ist in dieser Höhe von Ost auf Süd gedreht. Deutlich belegen lassen sich die Ceilometerwerte durch einen Temperaturgradientenwechsel von positiv auf negativ und eine Stabilitätsänderung der Einzelschichten in dieser Höhe. Die VPT zeigt unterhalb der MLH stabile Schichtung, die freie Atmosphäre ist neutral geschichtet. Auch Ri und Θ zeigen eine Stabilitätsabnahme in besagter Höhe. Besonders die beiden Feuchteparameter fallen deutlich und zeigen eine starke Aufdrossung. Die Mischungsschicht besteht in dieser Nacht aus einer hochreichenden Bodeninversion, über die eine Schicht warmen Südwind weht. Die Mittagsradiosonde ist am 18.2.2007 leider nicht verfügbar, doch liegt die MLH zu Mittag in einer bodennahen Wolkenschicht.

In der Nacht zum 19.2.2007 liegt die MLH immer noch bodennah in einer Wolkenschicht. Alle Parameter der Radiosonde erkennen die dünne Bodeninversion. Zu Mittag ist die MLH in knapp 500 m AGL zu erwarten. Sie wird vom Ceilometeralgorithmus nicht direkt als MLH erkannt, da das Gerät nur Wolken anzeigt. Die Obergrenze von konvektiven Wolken stellt auch immer eine Schichtgrenze zu einer stabileren Schicht darüber dar. Deshalb kann man bei der Obergrenze von konvektiver Bewölkung durchaus von einer MLH ausgehen. Allerdings sieht das Ceilometer nur die Untergrenze, sodass man die MLH zu Mittag mit den Ceilometerdaten allein schlecht identifizieren kann. Nur ein kleiner Gradient in Mischungsverhältnis und relativer Feuchte decken sich mit der Höhenangabe des Ceilometers.

Am 20.2.2007 ist der Wind allgemein schwach. Trotzdem bildet sich über den ganzen Tag keine eindeutige Obergrenze der MLH aus. Einzig der Verlauf der Richardsonzahl stimmt in der Nacht mit dem Ceilometer überein. Zu Mittag gibt sich die MLH durch eine kleine Temperaturinversion zu erkennen, wobei die eigentlichen Indikatoren die Gradienten in Mischungsverhältnis und RH sind.

Der 21.2.2007 ist wie die Tage vorher relativ windarm und ruhig. Die nächtliche MLH liegt bei 380 m AGL und kann durch eine kleine Windspitze von 6 m s^{-1} verifiziert werden. Zusätzlich gibt es einen kleinen Gradienten in der relativen Feuchte, welcher für sich alleine kein ausreichendes Signal für die MLH bedeutet. Zu Mittag ist die Verifikation deutlich schwieriger. In keinem Profil ist ein überzeugendes Signal für eine MLH erkennbar, einzig die Windgeschwindigkeit nimmt in dieser Höhe um $1 \text{ m s}^{-1} / 100 \text{ m}$ ab. Auch kein Gradientenverfahren liefert einen Anhaltspunkt. Es liegt also ein fast windstillen Strahlungstag vor und dennoch bildet sich kein Mischungsschichtaufbau wie

im Lehrbuch aus.

Am 22.2.2007 ist die MLH aus den Radiosondenwerten wieder deutlicher zu erkennen. In der Nacht liegt sie auf 250 m AGL mitten in einem deutlichen Windmaximum von 11 m s^{-1} und die Stabilitätsänderung in der VPT unterstreicht die Ceilometerwerte. Jedoch stimmt keines der vier Verfahren mit dem Ceilometer überein. Nur im Mischungsverhältnis ist ein Gradient zu sehen, wobei er deutlich unter den Ceilometerwerten liegt. Zu Mittag verraten die VPT und die RH die Höhe der MLH. Zumindest im Verlauf von Ri ist ein passender Gradient vorhanden.

Der 23.2.2007 hat wie der 22.2.2007 einen deutlich erkennbaren Tagesgang in der MLH-Entwicklung. Es liegt nur der 12:00 Uhr Aufstieg vor und daraus lässt sich die MLH aufgrund einer Stabilitätsänderung der VPT in gut 500 m AGL belegen. Ein ergänzender Gradient ist nur bei der potentiellen Temperatur zu finden, wobei er so schwach ist, dass er alleine keine verlässliche Quelle für die MLH darstellt.

6.3.2 Die Mischungsschicht im Februar 2008

Der folgende Abschnitt zeigt den Verlauf von Mischungsschicht und Wolkenhöhe während der Messperiode im Februar 2008. Nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf Abbildung 6.4.

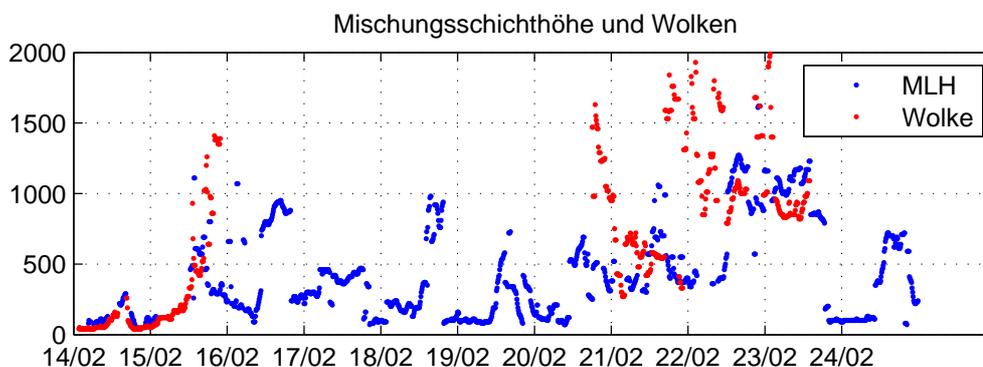


Abbildung 6.4: Verlauf der Mischungsschicht (blau) und der Wolkenuntergrenze (rot), wie sie vom Ceilometer an der FH in Augsburg 2008 gemessen wurden

Am 14.2.2008 zeigen die Temperatur- und Feuchteprofile der Radiosonde, dass den ganzen Tag eine über 200 m dicke Bodennebelschicht über dem Alpenvorland liegt. Der Algorithmus des Ceilometers kann teilweise keine MLH erkennen, da er nur die Wolkenuntergrenze und nicht die Wolkendicke sieht. Besonders auffällig ist der Gradient von Θ , der in der Nacht fast $2 \text{ }^\circ\text{C} / 10\text{m}$ beträgt. Somit befindet sich die MLH an der oberen Grenze der Bodennebelschicht etwa 200 m AGL und wird von einer abgehobenen Inversion gedeckelt, die sich bis auf 700 m AGL erstreckt.

Der 15.2.2008 ist in Bezug auf die MLH ein diffuser Tag. Die Bodennebelschicht vom vorherigen Tag hat an Mächtigkeit zugenommen und misst Mitternachts 500 m Dicke, am Mittag hat sie sich vom Boden gelöst und ihre Obergrenze auf 1250 m AGL angehoben. Das Ceilometer gibt aber jeweils deutlich tiefere Werte für die MLH an, welche eher kritisch betrachtet werden müssen. Schenkt man den Gradienten von Θ und den Feuchtegradienten Glauben, so befindet sich die MLH an der Obergrenze der jeweiligen Wolkenschicht (nachts: 600 m AGL, tags: 1250 m AGL) und nicht an deren Untergrenze. Dieser Umstand lässt sich leicht erklären, da das Ceilometer ein optisches Gerät ist und demnach wie auch wir nicht durch eine dichte Wolke schauen kann.

In der Nacht zum 16.2.2008 herrscht 200 m AGL relativ starker Wind mit 9 m s^{-1} . Dieser sorgt für turbulente Durchmischung, was zu keiner eindeutigen Mischungsschicht am Boden führt. Das Ceilometer zeigt eine Höhe von 400 m AGL an, doch die sechs Werte, über die gemittelt wird, sind auf mehr als 500 m vertikale Distanz verteilt. Ebenfalls lässt keine der Gradientenmethoden oder Ri eine MLH erkennen. Zu Mittag stimmen Ceilometer und Radiosonde wieder besser überein. Die Atmosphäre hat sich beruhigt und das Ceilometer sieht die MLH in 800 m AGL und ebenda lässt sich ein starker Gradient in relativer Feuchte und Mischungsverhältnis erkennen.

Auch am 17.2.2008 zeigt die Radiosonde wie in der Nacht zuvor in 250 m AGL Windgeschwindigkeiten von bis zu 10 m s^{-1} . In diesem Niveau findet auch das Ceilometer die MLH. In beiden Nächten kommt der Wind in Höhe der MLH aus Ost. Am Boden wie auch in den Schichten über der MLH ist der Wind deutlich schwächer. Anscheinend handelt es sich hier um ein lokales Low-Level-Jet Phänomen, das nur durch die Radiosondenanalyse erkannt werden kann und deutlichen Einfluß auf die Entwicklung der Mischungsschicht hat. Die Gradientenmethoden unterstützen diese Vermutung, da die nächtliche MLH weder in der relativen Feuchte, noch im Mischungsverhältnis, und auch nicht im potentiellen Temperaturgradient ersichtlich ist. Am Tag findet das Ceilometer die MLH genau zwischen zwei Inversionsschichten in ca. 400 m AGL. Diese Schichten werden auch von allen Gradientenmethoden angezeigt. Dass das Ceilometer die MLH oberhalb der unteren Inversion sieht könnte daran liegen, dass die obere Inversion die gleiche Luftqualität wie die Luft darunter hat und deshalb optisch kein Unterschied erkennbar ist.

Am 18.2.2008 bildet sich in der Nacht eine Bodeninversion aus, die ab 100 m AGL von einer Schicht mit starker Abnahme des Mischungsverhältnisses gedeckelt wird. Auch die Gradienten der relativen Feuchte und der potentiellen Temperatur zeigen diese Deckenschicht über der stabilen Bodeninversion. Mittags hat sich die Inversion vom Boden gelöst und wird besonders vom RH -Gradienten und vom Mischungsverhältnis herausgestellt. Sogar die Richardsonzahl markiert die Obergrenze dieser abgehobenen Inversion. Die Mischungsschicht ist auf die doppelte Dicke angewachsen.

Am 19.2.2008 bildet sich die nächtliche Bodeninversion noch stärker aus. Sie wird vom Θ -Gradienten, von der relativen Feuchte und sogar von der Richardsonzahl markiert. Bis

zum Mittag hat sie sich wieder vom Boden gelöst, sodass sich die MLH auf 400 m AGL ausdehnen kann. Die abgehobene Inversion ist weiterhin in allen angewendeten Gradientenmethoden gut sichtbar.

Der 20.2.2008 ist nachts von einer bis in 250 m AGL hochreichenden Bodeninversion geprägt. Man sieht sie in Ri und im Gradienten von Θ . Auch am Nachmittag verhindert eine Temperaturinversion in 550 m AGL ein weiteres Anwachsen der MLH. Hier handelt es sich ebenfalls um die vom Boden abgehobene nächtliche Inversion, deren Gradient bei allen Parametern vorliegt. Gegen Abend treffen die Vorboten einer Warmfront über Augsburg ein und sorgen in der Nacht zum 21.2.2008 für geringfügige Niederschläge.

Der 21.2.2008 ist bezüglich der Mischungsschichthöhe ein sehr unruhiger Tag. Nachts bildet sie sich unter einer kleinen Feuchteinversion in etwa 400 m AGL aus. In dieser Nacht werden am Flughafen Spuren von Niederschlag gemessen. Neben dem Gradienten der relativen Feuchte zeigen sich hier die Vorteile der Richardsonzahl-Methode bei inhomogener Atmosphärenschichtung. Das Richardsonkriterium trifft bei beiden Aufstiegen die vom Ceilometer angegebenen Mischungsschichthöhen ziemlich genau. Am Mittag liegen die Einzelwerte für das Stundenmittel der MLH über 400 m vertikale Distanz verteilt. Somit ist ein exaktes Herausstellen der MLH am Mittag relativ schwer. Zusätzlich versagen alle Gradientenmethoden.

Am frühen Morgen des 22.2.2008 fallen dann insgesamt fast 2 mm Niederschlag. Nachts liegt die MLH in 400 m AGL genau in einem präfrontalen Windmaximum von 15 m s^{-1} . Auch hier wird sie nur durch das Richardsonkriterium gefunden. Mittags beruhigt sich die Atmosphäre nach den Niederschlägen und es bilden sich einzelne Schichten aus. Man findet die MLH in einer dünnen Temperaturinversion in 700 m AGL. Am deutlichsten ist diese Schicht im Gradienten der relativen Feuchte zu ausgeprägt.

Der 23.2.2008 hat am Tag und in der Nacht eine klare MLH. Sie geht nachts bis in 1050 m AGL und ist geprägt von starkem postfrontalem Windmaximum aus Westen mit bis zu 19 m s^{-1} . Interessanter Weise ist die MLH in keinem anderen Parameter außer der Windgeschwindigkeit zu erkennen. Am Tag ist die Mischungsschicht sogar bis auf 1100 m AGL ausgedehnt und wird von einer kleinen Temperaturinversion und einem massiven Rückgang der Luftfeuchte gedeckelt. Bei dieser MLH greift zusätzlich das Richardsonkriterium.

Am 24.2.2008 hat sich die Mischungsschicht nach dem Frontdurchgang wieder beruhigt und wird in der Nacht von einer 100 m dicken Bodeninversion gebildet. Sie erscheint in Ri , sowie allen Gradientenmethoden. Am Tag gibt das Ceilometer eine Höhe von 400 m AGL für die MLH aus, obwohl alle anderen Parameter für eine MLH in 300 m AGL sprechen. Da es sich wieder um eine vom Boden abgehobene Inversionsschicht handelt, ist es durchaus denkbar, dass die Luftqualität der Inversionsluft gleich der Luftqualität der Mischungsschicht ist. Somit erkennt das Ceilometer eine Luftqualitätsänderung erst am Oberrand der abgehobenen Inversion.

6.4 Statistische Abrundung

Zum Vergleich: 2007 liegt der Mittelwert der MLH 411 m AGL, 2008 bei 441 m AGL. Wenn man die obige Beschreibung der einzelnen Parameter aufmerksam durchliest, sieht man, dass die MLH mal nur durch einen verwendeten Parameter gefunden werden kann, mal durch die Kombination mehrerer. Das hängt von den kleinskaligen synoptischen Verhältnissen ab und davon, dass sich diese von Tag zu Tag ändern.

Nach Emeis and Türk (2004) gibt es drei Hauptszenarien, die eine charakteristische Höhe der Mischungsschicht mit sich bringen. Bei nächtlichen Bodeninversionen liegt die Mischungsschicht tief, an konvektiven Tagen erreicht sie meist die Obergrenze der konvektiven (durchmischten) Bodenschicht und bei mechanischer Durchmischung durch länger anhaltende Windperioden ist sie in der Nacht und am Tag etwa gleich mächtig.

Man sieht, dass gerade an den stark durchmischten Tagen die Ergebnisse der Richardsonzahl am besten mit dem Ceilometer übereinstimmen, an Tagen mit Inversionsschichten wird die MLH neben anderen Parametern am besten durch die potentielle Temperatur angezeigt. In einzelnen Fällen kann die MLH aber nur aus Windrichtung und -geschwindigkeit der Radiosonde erkannt werden.

Diese mannigfachen Möglichkeiten im Gesamten betrachten zu können, soll im Folgenden eine kleine Statistik helfen.

In sie fließen die bereits bekannte MLH vom Ceilometer ein, die durch Mittelung der Ceilometerwerte über eine Stunde entsteht. Für die MLH-Ermittlung aus der Richardsonzahl wird vom Boden weg die Höhe genommen, wo die Ri das erste mal über 0,25 liegt (Baumann-Stanzer and Groehn (2004)). Bei der potentiellen Temperatur verwenden wir das Kriterium nach Heffter (1980), wie es bei Abbildung ?? beschrieben ist. Beim Mischungsverhältnis wird vom Erdboden weg die erste Schicht, die den Grenzwert $0,01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ erreicht, als Mischungsschichthöhe angegeben (Baumann-Stanzer and Groehn (2004)) und bei der relativen Feuchte zählt nach Hennemuth and Lammert (2006) der stärkste Gradient.

6.4.1 Korrelationen aller Parameter mit der Mischungsschicht

In Abbildung 6.5 sind die vier verwendeten Mischungsschichtindikatoren zusammen dargestellt. Vergleicht man die oberen Bilder, so stellt man fest, dass die Korrelation zwischen Radiosondenwerten und Ceilometerwerten mit zunehmender Höhe schlechter wird. Das liegt daran, dass das Ceilometer die MLH zu den Radiosondenaufstiegszeiten nur selten oberhalb 1000 m AGL findet. Deshalb wird der Wertebereich für weitere Untersuchungen auf 1000 m AGL begrenzt. Zusätzlich erschwert die für diese Arbeit zur Verfügung stehende grobe Auflösung der Radiosondendaten die Anwendbarkeit der verschiedenen Gradientensätze und der Richardsonzahl. Die unteren Bilder von Abbildung 6.5 zeigen

uns die Unterschiede zwischen Tag und Nacht. Wenn in der Nacht auch keine Korrelation vorliegt, so kann man doch am Tag eine ganz passable Übereinstimmung feststellen. Die nichtvorhandene Korrelation in der Nacht begründet sich in manchen Fällen durch die knapp 50 km horizontale Distanz zwischen der Radiosonde in München-Oberschleißheim und dem Ceilometer in Augsburg. So wird man mit der Radiosonde keine nächtlichen Bodeninversionen im Augsburger Becken erkennen können, was dazu führt, dass der nächsthöhere Gradient als MLH identifiziert werden wird. Höherreichende Durchmischung am Tag wird von beiden Geräten schon erkannt und auch in vergleichbarer Höhe gesehen.

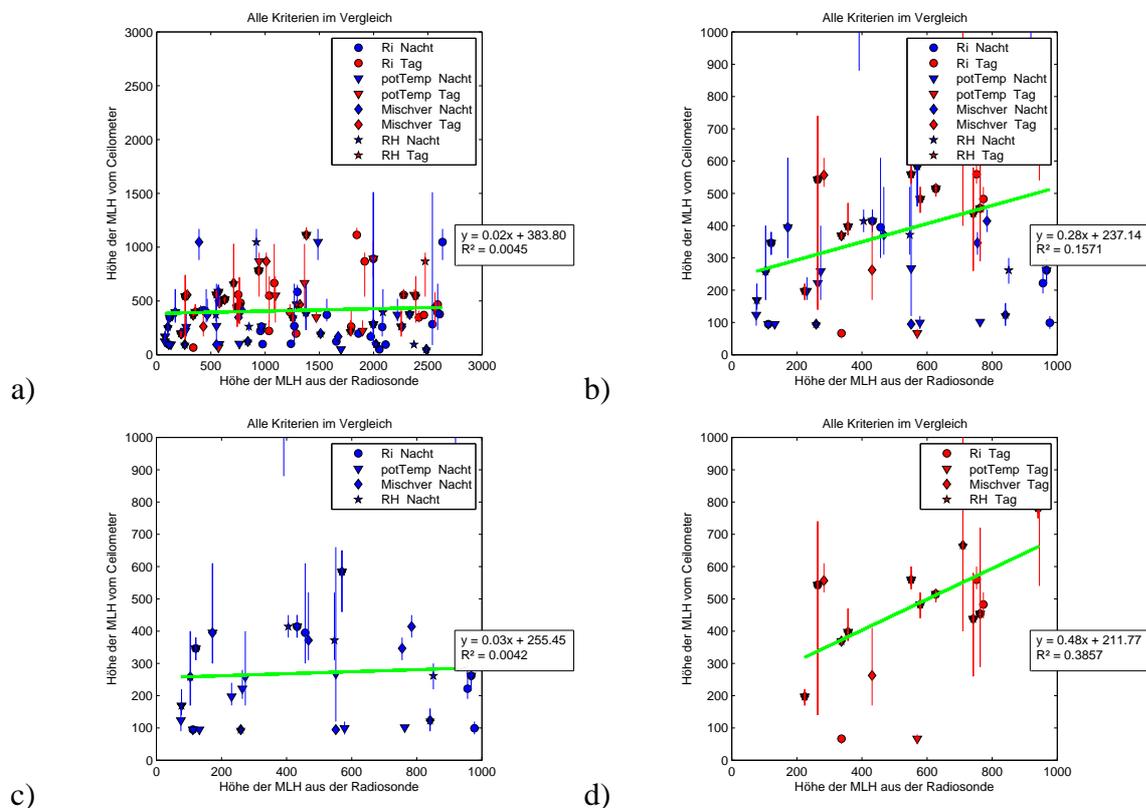


Abbildung 6.5: In jedem Einzelplot ist auf der Abszisse die MLH, wie sie von der Radiosonde erkannt wird, dargestellt, auf der Ordinate die jeweiligen Ceilometerwerte. Die vertikalen Linien bei jedem Messpunkt geben den Bereich an, über den der Ceilometerwert gemittelt wird. Die grüne Gerade ist die Regressionsgerade, deren Gleichung im Kästchen des jeweiligen Einzelplots zu finden ist. Dort wird auch das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Die Bilder a) und b) zeigen das gleiche, links 3000 m AGL und rechts 1000 m AGL, in c) und d) werden Tag (rechts) und Nacht (links) unterschieden.

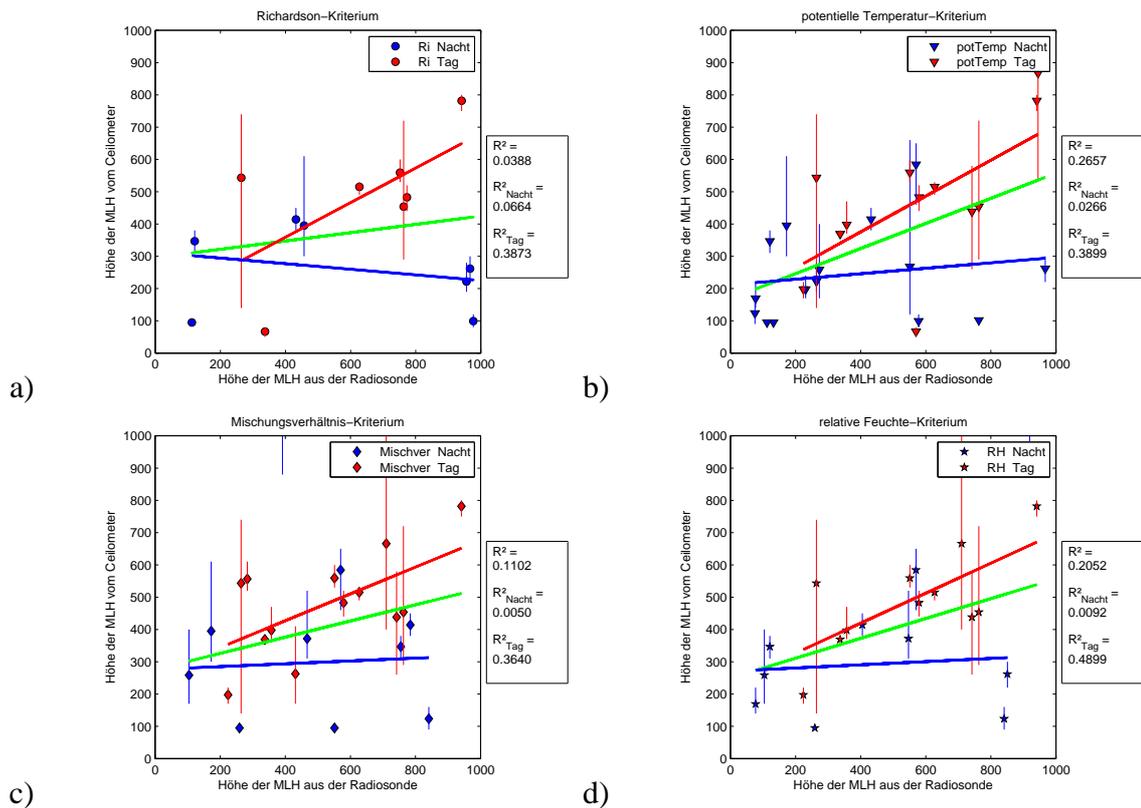


Abbildung 6.6: In den Einzelplots ist auf der Abszisse die MLH aus den Radiosondenwerten, auf der Ordinate aus den Ceilometerwerten angegeben. Die vertikalen Linien bei jedem Messpunkt geben den Bereich an, über den der Ceilometerwert gemittelt wird. Die grüne Gerade ist die Regressionsgerade für alle Werte, rot nur für die Tageswerte und analog blau nur für die Nachtwerte. Das jeweilige R^2 ist im Kästchen zu finden. a) zeigt die Richardsonzahl, b) die potentielle Temperatur, c) das Mischungsverhältnis und d) die relative Feuchte.

6.4.2 Korrelationen der einzelnen Parameter mit der Mischungsschicht

Abbildung 6.6 zeigt auf den ersten Blick die Qualität der einzelnen Parameter, wobei sich die Regressionsgeraden nur auf die abgebildeten Werte beziehen. Der Wertebereich wird auf 1000 m AGL limitiert, sodass die MLH, wenn sie in der Radiosonde oberhalb von 1000 m AGL gesehen wird, nicht in der Statistik erscheint. Damit wird eine deutlich bessere Korrelation von Ceilometer und Radiosondenwerten erreicht.

Um überhaupt ein Verständnis für die Aussagekraft der Abbildung 6.6 zu entwickeln, zählen wir ab, wie viele von allen 34 verfügbaren Radiosonden in jeder Abbildung erscheinen. Bei a) sind es 14 Stück, mit einer Gesamtkorrelation von $R^2 = 0,038$, bei b) 27 Stück mit $R^2 = 0,265$, bei c) sind es 22 Stück mit $R^2 = 0,110$ und bei d) 20 Stück mit $R^2 = 0,205$. Über den Daumen gepeilt hat für den analysierten Zeitraum die potentielle Temperatur doppelt so viele Treffer wie die Ri , obwohl beide fast dasselbe R^2 am Tag

haben. Deshalb kann man die Bestimmtheitsmaße nur unter Vorbehalt mit Bezug auf die vorhandene Situation vergleichen.

Wir stellen fest: das Θ -Kriterium funktioniert von allen verwendeten Kriterien insgesamt am besten. An zweiter Stelle liegt die relative Feuchte, deren Tageskorrelation noch über dem Θ -Kriterium liegen. Auf Platz drei liegt das Mischungsverhältnis, wobei zu bedenken ist, dass es mehr Treffer wie die relative Feuchte erzielt hat. Deshalb sind beide Methoden als relativ gleich gut einzustufen, abgesehen davon liegt ihnen ja der gleiche Parameter (der Wasserdampfgehalt der Luft) zugrunde. Das R_i -Kriterium scheidet mit Abstand am schlechtesten ab, was neben dem grundsätzlichen Problem der zu geringen Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe während der Messperioden, sicher auch an den Wetterlagen und den Messintervallen der Radiosonde liegt.

6.5 Zusammenfassung

Die Mischungsschicht wird in dieser Arbeit einerseits mit einem CL31-Ceilometer detektiert, zum anderen werden vier verschiedene Methoden zur Bestimmung der MLH aus einem Radiosondenaufstieg verwendet. Die Radiosonde startet zu Mitternacht und Mittags in Oberschleißheim bei München (50 km Distanz zum Ceilometer). Die verschiedenen Methoden wurden bereits von Seibert et al. (2000) beschrieben.

Die Richardsonzahl wird nach Etling (2002) und Stull (2000) bestimmt. Wie die Gradienten der potentiellen Temperatur auf die MLH schließen lassen, ist bei Baumann-Stanzer and Groehn (2004) und Heffter (1980) beschrieben. Die MLH-Bestimmung über den Gradienten des Mischungsverhältnisses wird ebenfalls wie bei Baumann-Stanzer and Groehn (2004) versucht und wie man die MLH über die Gradienten der relativen Feuchte errechnet, ist bei Hennemuth and Lammert (2006) zu finden.

Beim Vergleich der beiden Messperioden liegt die MLH 2007 im Mittel bei 411 m AGL, 2008 bei 441 m AGL. Bei der detaillierten Analyse jedes einzelnen Beobachtungstages werden die vielfältigen Einflüsse auf die Entwicklung der Mischungsschicht deutlich. Es können drei Hauptszenarien für die Mischungsschicht festgestellt werden. Bei nächtlichen Bodeninversionen liegt die Mischungsschicht tief, an konvektiven Tagen erreicht sie meist die Obergrenze der konvektiven (durchmischten) Bodenschicht und bei mechanischer Durchmischung durch länger anhaltende Windperioden ist sie in der Nacht und am Tag etwa gleich mächtig. Diese drei Szenarien haben auch Emeis and Türk (2004) bereits herausgefunden.

Abschließend liefert eine Statistik einen Überblick, mit welchen Methoden sich die Mischungsschicht am besten während einer winterlichen Hochdruckwetterlage detektieren lässt. Dabei erweist sich der Gradient der potentiellen Temperatur als am besten geeignet, wie auch Kollmann (2008) in seiner Arbeit bestätigen kann. In vorliegender Arbeit erscheinen Mischungsverhältnis und relative Feuchte als ähnlich gute Indikatoren und

zeigen Tageskorrelationen von 0.36 beziehungsweise 0.48. In der Nacht sind diese Korrelationen allerdings deutlich schlechter, als Schreiter (2010) herausgefunden hat. Die Bestimmung der kritischen Richardsonzahl zur Analyse der MLH erweist sich als am wenigsten zutreffend. Auch Kollmann (2008) kann das bestätigen. Diese Ergebnisse stehen natürlich hauptsächlich unter dem Einfluß der vorherrschenden winterlichen Hochdruckwetterlage. Des Weiteren spielen sicher die geringe Höhenauflösung der Radiosonde und die horizontale Distanz zwischen Radiosonde und Ceilometer keine zu vernachlässigende Rolle, nicht zu vergessen die statistische Aussagekraft von insgesamt 18 Messtagen.

Kapitel 7

Stickoxide und Ozon

Das nachfolgende Kapitel beschreibt den Verlauf der Stickoxide, ihre Wechselwirkung mit Ozon, das NO_2/NO_x -Verhältnis und die Immissionen an einer Stadtrandstation und einer Innenstadtstation. Weiters werden die Auswirkungen von Wind und Mischungsschichthöhe auf das Verhalten der Stickoxide besprochen.

7.1 Stickoxide

Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben, stehen bis zu sechs verschiedene Luftgütemessstationen zur Verfügung. Die gemessenen Luftgüteparameter werden im Folgenden dargestellt. Zuerst widmen wir uns den Stickoxiden, ihren Verläufen und Mittelwerten und versuchen später, Zusammenhänge der Immissionen mit Wetterlage und Windrichtung herzustellen. Dabei werden die Stickoxide zusätzlich in Verbindung mit Ozon betrachtet.

7.1.1 Datengrundlage und Überblick

Stickoxidmessungen liegen an fünf verschiedenen Stationen vor: Sie werden am LfU, am BifA und an den drei Stadtstationen Königsplatz, Bourgesplatz und Karlstraße gemessen. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die Mittelwerte der gemessenen Immissionen an den verschiedenen Stationen.

Anhand der Mittelwerte über den jeweiligen Messzeitraum lassen sich mit Tabelle 7.1 die Unterschiede der fünf Stationen herausstellen. Dabei bestätigt sich, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben wurde, dass die Station am LfU im Süden relativ verkehrsberuhigt ist, da sie die mit Abstand niedrigsten Immissionswerte vermeldet.

Die Stationen an BifA und Bourgesplatz zeigen ähnliche Werte, lediglich im Februar 2007 verzeichnet die Station am BifA relativ geringe NO_x -Werte. An der Spitze liegt die Station Karlstraße, dicht gefolgt vom Königsplatz. Beide Messstationen zeichnen sich durch hohes Verkehrsaufkommen aus. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass außer der Station am BifA alle Stationen während der Periode 2007 etwas höhere Immissionen vermelden wie

| Messort | | LfU | BifA | Königspl. | Bourgespl. | Karlstr. |
|------------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|------------|----------|
| NO _x mg m ⁻³ | Feb. 2007 | 0.0650 | 0.0817 | 0.1701 | 0.0969 | 0.2059 |
| | Feb. 2008 | 0.0552 | 0.1462 | 0.1706 | 0.0805 | 0.1950 |
| NO mg m ⁻³ | Feb. 2007 | 0.0202 | 0.0281 | 0.0704 | 0.0319 | 0.0876 |
| | Feb. 2008 | 0.0161 | 0.0474 | 0.0751 | 0.0256 | 0.0819 |
| NO ₂ mg m ⁻³ | Feb. 2007 | 0.0340 | 0.0386 | 0.0621 | 0.0481 | 0.0715 |
| | Feb. 2008 | 0.0306 | 0.0735 | 0.0555 | 0.0416 | 0.0694 |

Tabelle 7.1: Mittelwerte der jeweiligen Luftschadstoffe während angegebener Messperiode

2008.

Exemplarisch für alle Stickoxidmessstationen greifen wir die Station Karlstraße heraus. Hier werden die höchsten Stickoxidbelastungen gemessen. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, ist die Karlstraße eine stark frequentierte Ost-Westverbindung und sie ist auf beiden Seiten von hohen Häuserfluchten flankiert. Sie bildet also eine klassische Straßenschlucht. In einer solchen Straßenschlucht sind höhere Immissionen zu erwarten, als auf einer freien Fläche. Das liegt hauptsächlich an der hohen Verkehrsdichte und daran, dass die Luft in einer Straßenschlucht bei schwachem Wind nur schwer ausgetauscht werden kann. Hinzu kommt, dass die Karlstraße viele Ampeln hat, sodass die Fahrzeugemissionen durch vermehrtes Beschleunigen zusätzlich steigen.

Da nach Schäfer et al. (2006) die Luftbelastung in einer Straßenschlucht bei ruhiger Wetterlage nicht direkt mit der Mischungsschichthöhe zusammenhängt, eignet sich die Karlstraße als Beispielstation, um die Entwicklung des Stickoxidgehalts der Luft über mehrere aufeinanderfolgende Tage zu verfolgen.

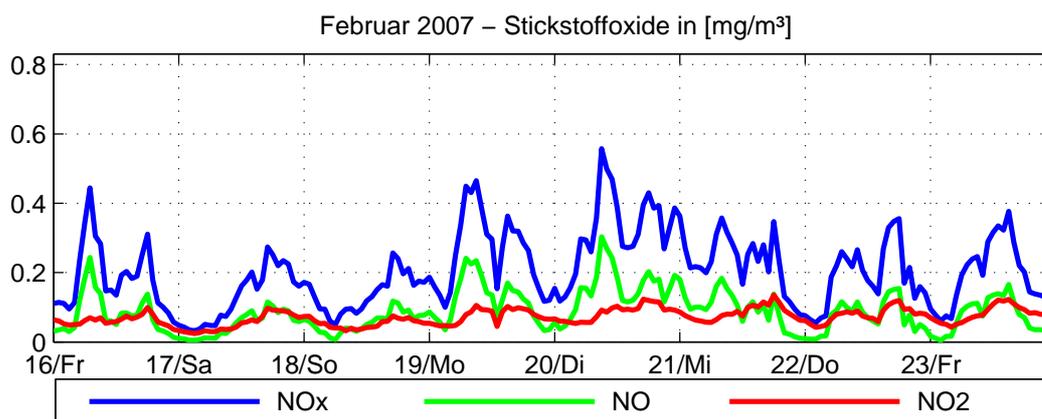


Abbildung 7.1: Verlauf von NO_x, NO und NO₂ an der Station Karlstraße während der Messperiode im Februar 2007

Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die Entwicklung der Stickoxidkonzentration über mehrere Tage hinweg. 2007 sehen wir im NO_x an den beiden Wochenendtagen jeweils einen deutlichen Nachmittagspeak. Der NO_x-Verlauf am Wochenende unterscheidet sich

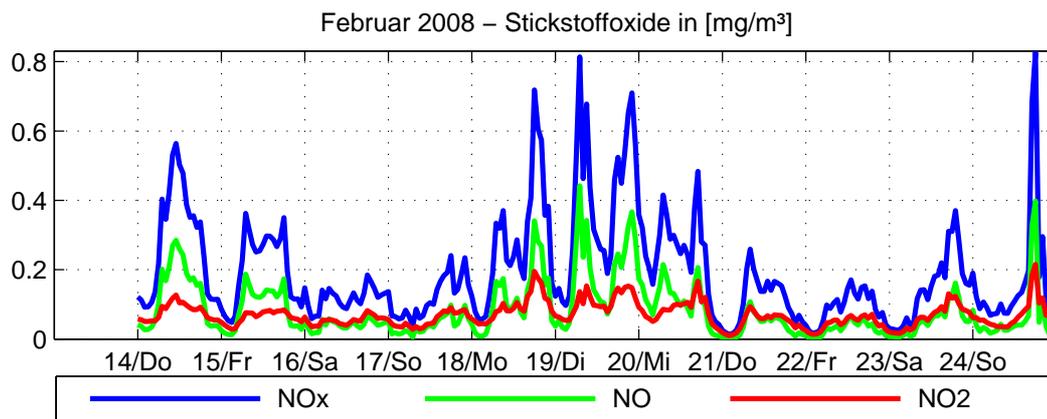


Abbildung 7.2: Verlauf von NO_x, NO und NO₂ an der Station Karlstraße während der Messperiode im Februar 2008

von dem unter der Woche ganz markant durch die Verteilung der Immissionsspitzen. Am Wochenende fehlt der Peak des Frühverkehrs, weil die meisten Leute nicht zur Arbeit fahren müssen. Im Unterschied dazu zeigen die Immissionen an den Arbeitstagen häufig zwei Spitzen, nämlich am Morgen und am Nachmittag. Auch 2008 lässt sich diese zweigipflige Verteilung der NO_x-Maxima besonders von Montag bis Mittwoch gut erkennen.

Die Immissionen sollen aber nicht nur in Bezug auf die anthropogenen Emissionen, sondern auch mit Blick auf die meteorologischen Gegebenheiten untersucht werden. Dazu werden die Stickoxidverläufe an der LfU-Station untersucht, da sie durch ihre Lage am Stadtrand weniger von anthropogenen Emissionen und stärker von der meteorologischen Situation beeinflusst ist. Bei der Analyse der Temperaturverläufe und der relativen Feuchte (Abschnitt: 4.2.2 und 4.2.3) stellt man fest, dass sich ihre Tagesgänge und die der Stickoxidkonzentrationen gegenseitig nicht beeinflussen. Allerdings zeigen Tage mit großen Temperaturamplituden auch große Amplituden bei den Stickoxidkonzentrationen. Diese Gemeinsamkeit liegt allerdings nicht an einer gegenseitigen Beeinflussung. Vielmehr hängen sie mit der Windgeschwindigkeit und der Mächtigkeit der Mischungsschicht zusammen.

In den Abbildungen 7.3 und 7.4 sieht man, wie die Stickoxidkonzentration deutlich mit der Mächtigkeit der Mischungsschicht in Verbindung steht. Dabei muss vorab geklärt werden, welcher Mechanismus für die Höhe der Mischungsschicht verantwortlich ist. Wird die Mischungsschicht durch relativ hohe Windgeschwindigkeiten mechanisch durchmischt (wie an 16. und 17.2.2007, an 15. bis 17.2.2008 und an 21. bis 23.2.2008), so führt der Wind auch zu einer Durchmischung der bodennahen Luftschichten und verhindert, dass sich der Stickoxidgehalt in der bodennahen Luft stark erhöht. An solchen Tagen zeigt die Mischungsschicht weniger Abhängigkeit von der Tageszeit. Ein weiteres

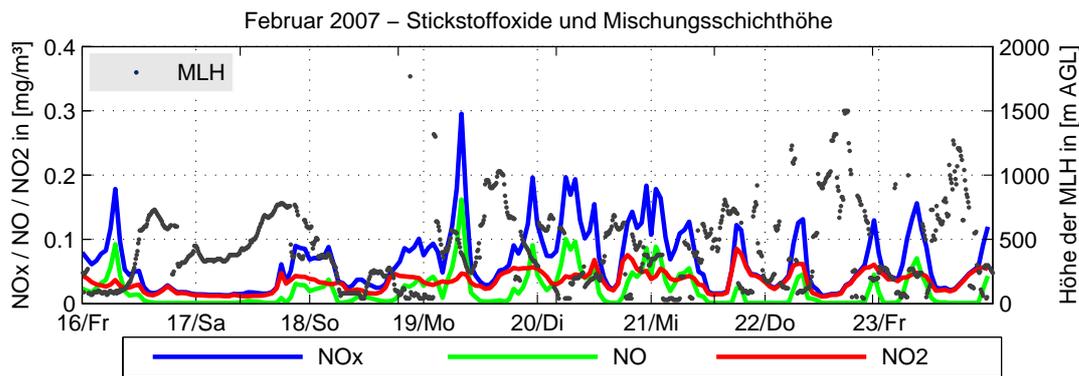


Abbildung 7.3: Verlauf von NO_x , NO, NO_2 an der Station LfU und der MLH 2007

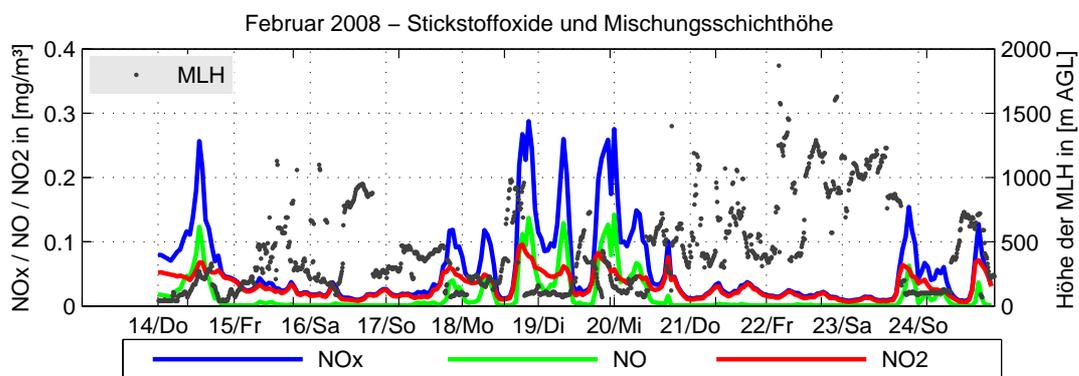


Abbildung 7.4: Verlauf von NO_x , NO, NO_2 an der Station LfU und der MLH 2008

Indiz für höhere Windgeschwindigkeiten ist, dass die MLH auch in der Nacht nie unter eine gewisse Höhe absinkt.

In windarmen Zeiten sieht man hingegen gut, wie sich in jeder Nacht eine Bodeninversion ausbilden kann. Am Tag wächst die MLH aufgrund zunehmender Labilisierung der bodennahen Luft und turbulenter Durchmischung an und somit werden Teile der bodennahen, stickoxidreichen Luft in höhere Lagen gemischt. Besonders von 20. bis 23.2.2007 kann man die einstrahlungsbedingte Durchmischung der Mischungsschicht und die damit einhergehenden Konzentrationsschwankungen der Stickoxide sehen. Aber Vorsicht: Die Stickoxidkonzentration hängt viel weniger von der Mischungsschicht ab, als Abbildung 7.3 glauben machen möchte. Hauptsächlich ist sie antropogen beeinflusst. Abschnitt 7.3 beschäftigt sich eingehender mit der Korrelation von Mischungsschichthöhe und Stickoxiden.

Ein kurzer Ausblick auf das Verhalten bei höherer Windgeschwindigkeit: Vergleicht man die Station an der Karlstraße mit der LfU-Station (Abbildungen 7.3 und 7.4), so gehen die Immissionen bei einem Windereignis in der Stadt zwar zurück, zeigen aber nach wie vor ihren charakteristischen Tagesgang. Zur gleichen Zeit ist an der LfU praktisch kein Tagesgang mehr feststellbar.

Mehr dazu folgt unten. Nun wird der Einfluß von Ozon auf die Umwandlung von NO zu

NO_2 erläutert, wie bereits in Kapitel 2 allgemein beschrieben wurde.

7.1.2 Stickoxide und Ozon

Für eine Untersuchung der Stickoxide in Zusammenhang mit der Entwicklung von Ozon dient die Station an der LfU. Die Abbildungen 7.5 und 7.6 zeigen aus zwei Gründen die LfU. Zum einen werden dort Stickoxide und Ozon am selben Ort gemessen und da die Konzentrationen von NO zu NO_2 räumlich variieren, müssen alle Parameter an einer Station vorliegen. Zum anderen wird die LfU gewählt, da sie relativ verkehrsberuhigt am Stadtrand liegt. So misst sie die städtische Hintergrundbelastung und zeigt ein Gleichgewicht zwischen lokalen und regionalen Emittenten zum einen und der Schadstofftransmission (Transport und chemische Umwandlung) zum anderen (Buchholz (2006)).

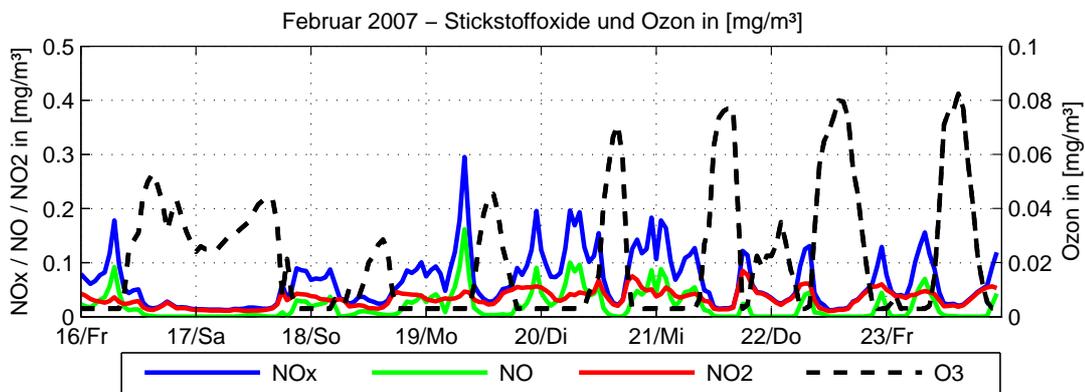


Abbildung 7.5: Verlauf von NO_x , NO , NO_2 und Ozon an der Station LfU 2007

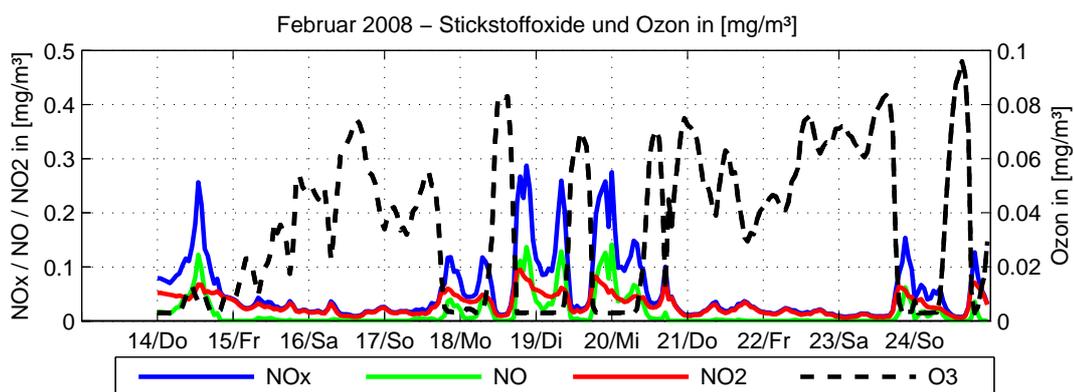


Abbildung 7.6: Verlauf von NO_x , NO , NO_2 und Ozon an der Station LfU 2008

In Abschnitt 2.2.1 wurde bereits über frühere Forschungen zur Interaktion von Stickoxiden und Ozon (vor allem von Hobbs (2000)) berichtet. Bild 2.3 zeigt deren Tagesverlauf. Versuchen wir die in Bild 2.3 dargestellten Tagesgänge auch in Augsburg zu finden. Die zweite Hälfte der Messperiode 2007 zeigt eine schöne Übereinstimmung mit

der Grafik von Hobbs (2000). Jeden Nachmittag erreicht der Ozongehalt sein Maximum, während die NO-Konzentration sehr tief fällt. Zu diesen Zeiten wird also nach Gleichung 2.6 viel NO zu NO₂ oxidiert. Zur Erinnerung: der Ozonpeak entsteht deshalb am Nachmittag, weil das bodennahe Ozon unter Einfluß von Sonnenlicht nach Gleichung 2.4 aus dem Zerfall von NO₂ entsteht. Auch 18.2. bis 20.2. und er 24.2.2008 zeigen das bekannte Bild.

Wie verhält es sich aber mit den Ozonwerten zu den anderen Zeitpunkten?

Wir erinnern uns noch einmal an die in Kapitel 5 analysierten Windverhältnisse während der Beobachtungszeiträume. 2007 bläst an den ersten beiden Beobachtungstagen Ostwind mit bis zu 6 m s⁻¹, die restliche Zeit bildet sich das bereits benannte schwachwindige Talwindssystem aus. 2008 kommt der Wind am 15.2. und 16.2. aus Osten, von 21.2. bis 23.2. aus Westen und erreicht Spitzenwerte von 8 m s⁻¹.

Vergleicht man die Tage mit geringer Windgeschwindigkeit mit denen höherer Windgeschwindigkeit, so sieht man, dass das Ozonminimum an schwachwindigen Tagen deutlich tiefer liegt als an windigen. Die klassischen Nachmittagspeaks sind meist erkennbar, auch wenn sie nicht dieselbe Höhe wie an schwachwindigen Tagen erreichen. Daraus ist zu schließen: ist die Atmosphäre ruhig, so bildet sich der klassische Tagesgang von Ozon mit einem starken Konzentrationsanstieg am Morgen und einem starken Abfall am Abend aus. Die hohe Ozonkonzentration am Nachmittag stammt dabei ausschließlich aus den chemischen Umwandlungsprozessen (Gleichung 2.4 bis 2.6).

An Tagen mit spürbarem Wind fällt die nächtliche Ozonkonzentration jedoch maximal 50% unter die Tageswerte. Das bedeutet, in der Nacht muss mehr Ozon verfügbar sein, als mit Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid reagieren kann. Die sehr niedrigen NO-Werte an windigen Tagen unterstützen die Annahme, dass an solchen Tagen ein Überangebot an Ozon vorhanden ist, welches das NO umgehend in NO₂ umwandelt. Die niedrigen NO₂-Konzentrationen liegen mit Sicherheit am Wind. Somit muss es mindestens eine weitere Ozonquelle an windigen Tagen geben. Es liegt nahe, dass das gemessene Ozon aus höheren Schichten heruntergemischt wird (Alföldy et al. (2007)). Diese Möglichkeit ist auch von Buchholz (2006) beschrieben.

7.1.3 Das NO₂/NO_x Verhältnis von Karlstraße und LfU

Vergleichen wir die Innenstadtstation Karlstraße (Abbildung 7.1 und 7.2) mit der LfU (Abbildung 7.5 und 7.6) so sehen wir deutlich niedrigere Stickoxidwerte außerhalb der Stadt. Besonders schön zu sehen sind die fast regelmäßigen Tagesgänge von NO_x und NO an der Karlstraße, ganz im Gegensatz dazu verhalten sich die Tagesgänge an der LfU. Ein Blick auf Tabelle 7.1 verrät uns, dass die NO_x-Konzentration in der Karlstraße im Schnitt drei bis vier Mal so hoch liegt wie an der LfU. Auch die NO₂-Konzentration ist an der Innenstadtstation mindestens doppelt so hoch wie an der LfU. Am größten ist der

Unterschied jedoch beim NO. Dort verzeichnet die LfU im Februar 2008 sogar weniger als 20% der Innenstadtkonzentration.

Um die oben genannten Anteile der einzelnen Stickoxidkomponenten objektiv beurteilen und vergleichen zu können, sollen die Abbildungen 7.7 und 7.8 helfen, die das NO_2/NO_x -Verhältnis für beide Stationen zeigen. Denn je größer das Verhältnis ist, desto höher ist der NO_2 -Anteil und desto mehr Reaktionspartner sind vorhanden. Je kleiner das Verhältnis ist, desto weniger NO_2 -Anteil und desto weniger Reaktionspartner sind vorhanden (Gurgiser (2009)).

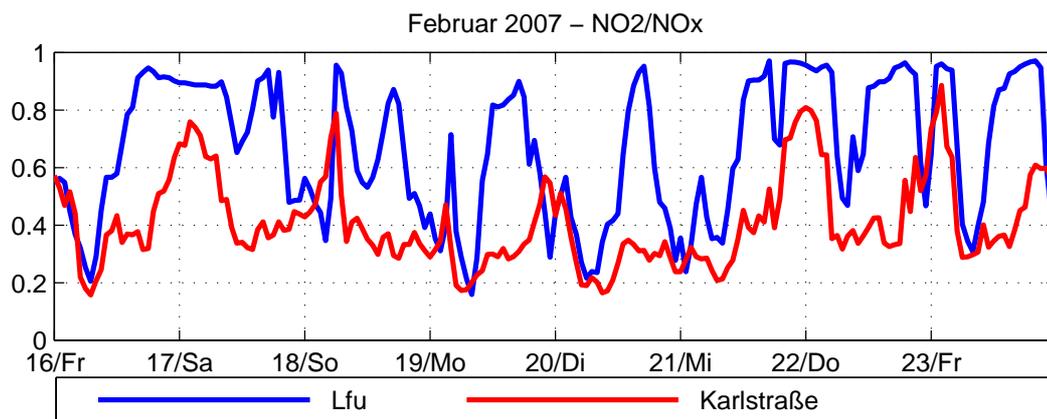


Abbildung 7.7: Verhältnis von NO_2 zu NO_x an den Stationen LfU und Karlstraße im Februar 2007

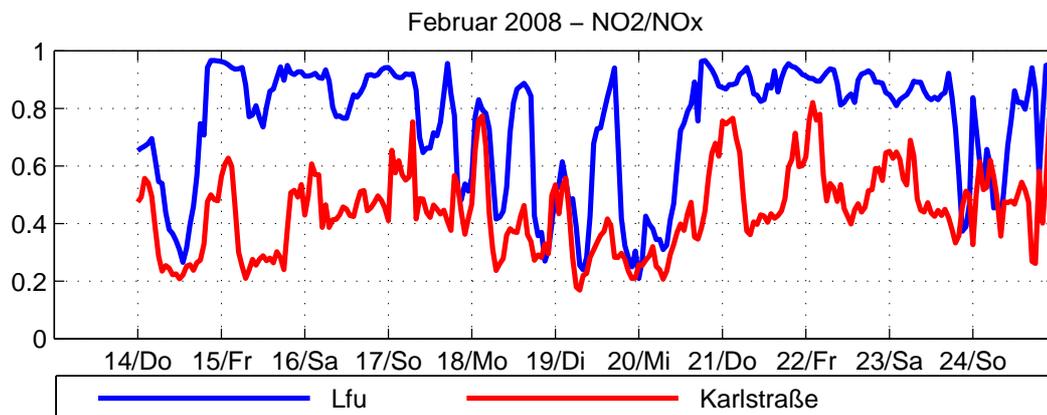


Abbildung 7.8: Verhältnis von NO_2 zu NO_x an den Stationen LfU und Karlstraße im Februar 2008

In Zahlen liegt der mittlere Anteil von NO_2 am NO_x an der LfU bei 71%, an der Karlstraße bei nur 43%. Das lässt auf die hohen Verkehrsemissionen in der Karlstraße schließen, welche an der LfU fehlen. Der besonders hohe NO-Unterschied zwischen Karlstraße und LfU ist ein Indiz dafür, dass die Menge des ausgestoßenen Stickstoffmonoxid zu groß ist, um sofort zu NO_2 umgewandelt zu werden. Deshalb ist die Verweildauer von

NO in der Luft im Stadtgebiet länger als an der LfU. Hinzu kommt, dass bei den Umwandlungsprozessen von NO zu NO₂ auch die solare Einstrahlung eine bedeutende Rolle spielt. Im Winter steht die Sonne jedoch tiefer als im Sommer und erreicht nur selten die schadstoffreiche, bodennahe Luft in einer Straßenschlucht.

Abschließend wird auf die Amplituden der Grafiken 7.7 und 7.8 eingegangen. In beiden Jahren reagiert die Amplitude an der LfU deutlicher auf verschiedene Windgeschwindigkeiten wie an der Karlstraße. Das heißt an der LfU unterliegt das NO₂/NO_x-Verhältnis in windarmen Zeiträumen deutlichen, tageszeitlichen Schwankungen. In windreichen Zeitspannen sind nur schwache periodische Abläufe zu erkennen und das Immissionsverhältnis bleibt ungefähr gleich. Im Gegensatz dazu steht die Karlstraße. Bei ihr ändert sich das NO₂/NO_x-Verhältnis kaum in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, wohl aber im Tagesverlauf.

Die Straßenschlucht der Karlstraße ist an der Messstation ca. 150 m lang und Ost-West ausgerichtet. Da während der Messperioden alle drei Windereignisse entweder von Osten oder von Westen kommen, müssen sie die Luftmasse in der Straßenschlucht ausgetauscht haben. Entweder die Windgeschwindigkeit ist zu gering, oder der Stickoxidausstoß ist derart hoch, dass die Windgeschwindigkeit keinen direkten Einfluß auf die Luftqualität in der Straßenschlucht hat.

7.2 Stickoxide und Windgeschwindigkeit

Bislang wurden nur die beiden Stationen an LfU und Karlstraße analysiert. In diesem Abschnitt wird versucht, einen Zusammenhang zwischen den Einzelstationen zu erkennen. Da die Anströmung während der beiden Windereignisse entweder aus Osten oder Westen kamen, werden die Stationen Karlstraße und Königsplatz für einen Vergleich ausgewählt. Sie liegen beide in der Innenstadt und in etwa auf derselben geographischen Breite, so dass bei den Windereignissen ein direkter Austausch der Luftmassen zwischen den beiden Stationen zu erwarten ist. Als Analysezeitraum bietet sich die Messperiode 2008 an, da sie zwei gegeneinander wehende Windregimes hatte. Zur Untersuchung dienen die beiden Spurengase NO_x und NO₂.

Nach logischer Überlegung wird bei Ostwind die Luft von der Karlstraße zum Königsplatz advehiert. Auf diesem Weg kann sich im idealen Fall NO abbauen und NO₂ aufbauen, ergo muss bei Ostwind die NO_x-Konzentration von der Karlstraße zum Königsplatz abnehmen, die NO₂-Konzentration zunehmen. Bei genauer Betrachtung der Abbildung 7.9 kann man diese Verhältnisänderung von 15.2.2008 bis 17.2.2008 beobachten. Bei Grafik 7.10 sieht man, dass sich das Verhältnis zu Gunsten des NO₂ am Königsplatz geändert hat. Dass nach wie vor höhere NO₂-Werte an der Karlstraße gemessen werden, liegt an den höheren Emissionen in der Karlstraße. Ideale Voraussetzungen für derartige Vergleiche wären keine störenden Emissionsquellen zwischen beiden Messpunkten und

gleiche Schadstoffimmissionen.

Um die Beweisführung zu komplettieren, muss man natürlich auch die Gegenwindrichtung (aus Westen) beachten und die in diesem Fall vorherrschenden Konzentrationsverhältnisse unter die Lupe nehmen. Wie erwartet zeigt die Karlstraße mehr NO_2 wie der Königsplatz und dieser zeigt wiederum mehr NO_x als die Karlstraße.

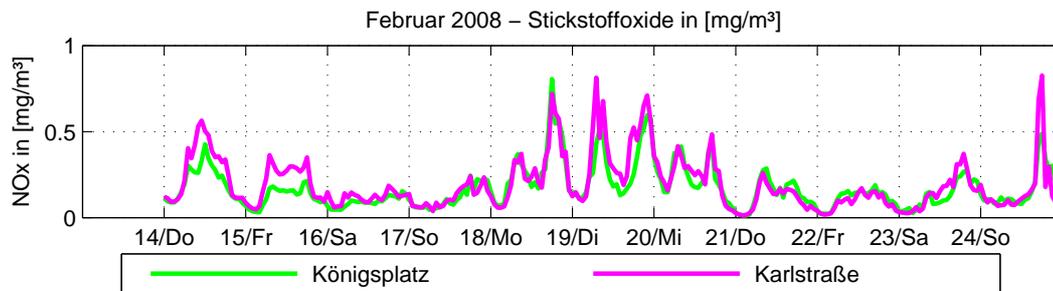


Abbildung 7.9: NO_x gemessen an Königsplatz und Karlstraße im Februar 2008

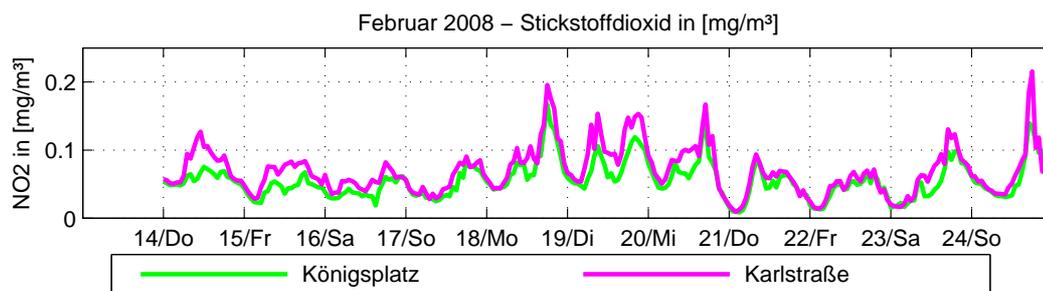


Abbildung 7.10: NO_2 gemessen an Königsplatz und Karlstraße im Februar 2008

Aufgrund der vorliegenden Datenlage ist eine exakte, lokale Verfolgung weiterer Spurengase eher spekulativ, denn begründbar. Deshalb schließt dieser Abschnitt mit einem Scatterplot, der die Korrelation von Windgeschwindigkeit gemessen am DWD und Stickstoffdioxid gemessen an allen Stationen darstellen wird.

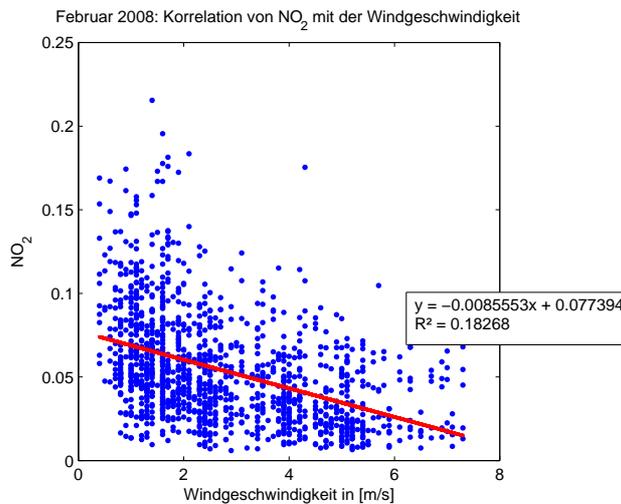


Abbildung 7.11: NO₂ aller Stationen korreliert mit der Windgeschwindigkeit gemessen am DWD

Im Bild links ist die NO₂-Konzentration aller Messstationen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dargestellt. Die eingehenden Daten erstrecken sich nur über die Messperiode im Februar 2008. Im rechten Kästchen sind die Geradengleichung der Regressionsgerade und das Bestimmtheitsmaß R^2 mit 0.18 angegeben. Die Korrelation ist ziemlich schlecht, auch wenn deutlich wird, dass die NO₂-Konzentration mit zunehmender Windgeschwindigkeit in der Stadt abnimmt.

7.3 Stickoxide und Mischungsschichthöhe

Für diese Untersuchung eignet sich am besten wieder ein Scatterplot. In Abbildung 7.12 werden die Zusammenhänge der MLH-Stundenmittelwerte mit den Stickstoffdioxidwerten aller Messstationen ermittelt. Dabei werden auch Nachtwerte (19:00 Uhr bis 6:00 Uhr) und Tagwerte (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) unterschieden.

Im Beobachtungszeitraum 2007 gibt es bekanntlich nur ein Windereignis, 2008 zwei. Somit wäre 2007 besser zur Verhaltensuntersuchung von NO₂ bei einer winterlichen Hochdrucklage geeignet, da die bodennahe Grenzschicht allgemein ruhiger war. Gut zu erkennen sind einige Fälle, besonders in der Nacht, an denen bei niedriger MLH eine hohe Stickstoffdioxidbelastung vorliegt. Diese Situationen ergeben sich, wenn die Luftmasse über mehrere Tage gleich bleibt und ständig zusätzlich Schadstoff emittiert wird. Davon abgesehen lässt sich 2007 keine nennenswerte Beeinflussung des NO₂-Gehalts durch die Mischungsschichthöhe erkennen.

2008 stellt sich das Bild etwas anders dar. Je höher die Mischungsschicht, desto geringer der NO₂-Gehalt der bodennahen Luft. Dieser Zusammenhang klingt logisch. Doch ist eher davon auszugehen, dass beide Vorgänge eine andere Ursache haben, nämlich eine Änderung der Windgeschwindigkeit, die die MLH beeinflusst und ebenso die Stickoxidmissionen von urbanen auf ländliche Flächen umverteilt. Nur durch die Information aus den Scatterplots in Abbildung 7.12 kann keine direkte Wechselwirkung zwischen Mischungsschicht und Spurengasen herausgestellt werden.

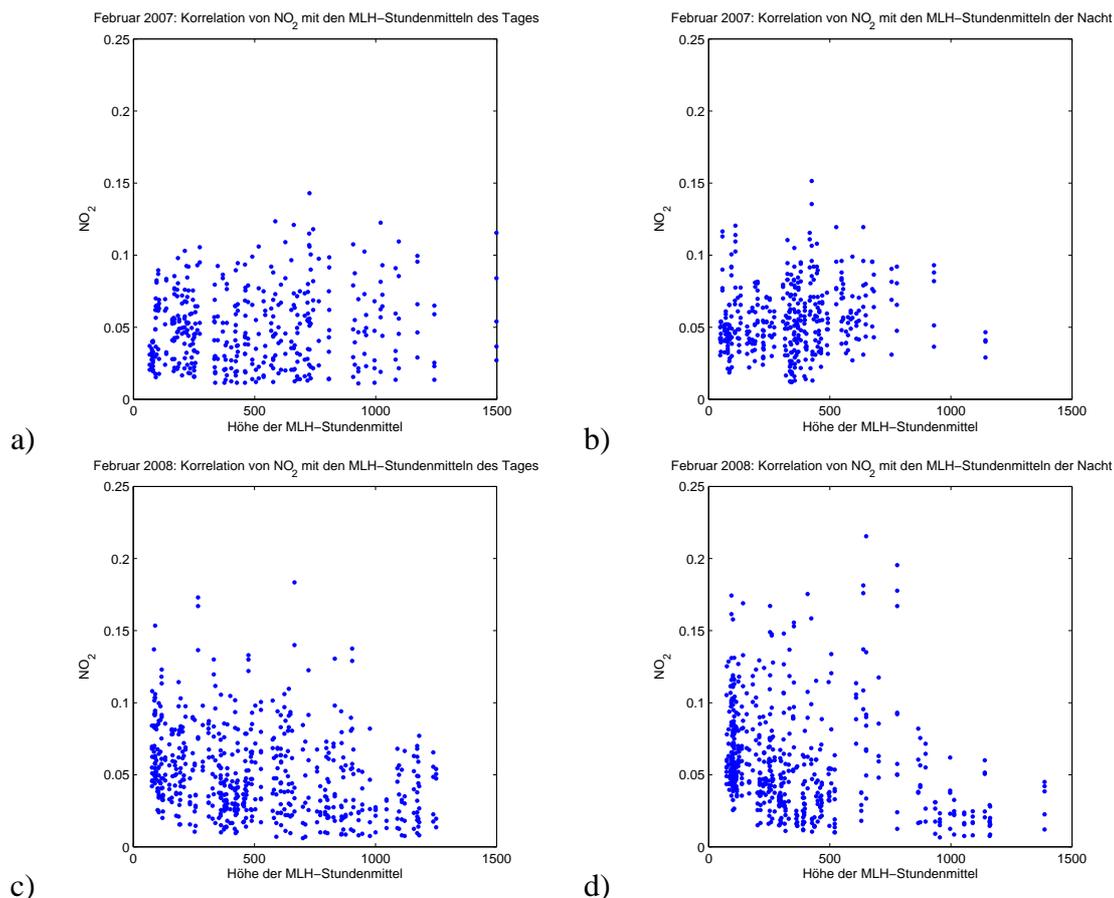


Abbildung 7.12: Bild a) zeigt die Übereinstimmung aller gemessenen Tageswerte von NO₂ der Periode 2007 mit der MLH, Bild b) zeigt die Nachtwerte während der Messperiode 2007. Die Bilder c) und d) stellen das gleiche wie a) und b), aber für die Messperiode 2008 dar.

Alle vier Einzelplots zeigen die NO₂-Werte in [mg m⁻³] aller 5 Messstationen aufgeteilt in Tag- und Nachtwerte. Jeder Plot stellt dabei den Zusammenhang der ausgesuchten NO₂-Werte mit der Mischungsschichthöhe, wie sie an der FH ermittelt wird, dar.

7.4 Zusammenfassung

Stickoxidmessungen liegen an fünf verschiedenen Stationen vor. Zwei Stationen sind stark vom Straßenverkehr beeinflusst und zeigen hohe Belastungen, die anderen drei zeigen deutlich geringere Belastungen. Als repräsentative Station für Stickoxidverläufe dient die Station an der Karlstraße. Sie liegt in einer Straßenschlucht und zeigt einen merklichen Unterschied zwischen Werktagsbelastung und Wochenendimmissionen. Mit Blick auf die meteorologischen Parameter stellt man fest, dass die Stickoxidwerte außerhalb der Stadt deutlich von der Mischungsschichthöhe abhängen, während an Stationen in der Stadt kein Einfluss der MLH erkennbar ist. Das haben bereits Schäfer et al. (2006) herausgefunden. Anders bei Windgeschwindigkeit und -richtung: auch Stationen in der Stadt zeigen Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, vorausgesetzt,

sie können barrierefrei angeströmt werden.

Zusätzlich zu den Stickoxiden, wird die Ozonbelastung analysiert. Ihre Konzentration hängt von Tageszeit und Windgeschwindigkeit ab. In windschwachen Perioden werden am Tag hohe, in der Nacht geringe Ozonwerte gemessen (siehe auch Hobbs (2000)). Perioden mit stärkerem Wind zeigen ähnlich hohe Tageswerte wie windschwache Tage. In der Nacht fällt die Konzentration jedoch nur auf 50% des Tageswerts und liegt damit deutlich über den Nachtwerten windschwacher Tage, da die stärkeren Windgeschwindigkeiten (unter anderem Low-Level-Jets) durch vertikale Turbulenzen atmosphärisches Ozon aus höheren Schichten zum Boden mischen. Dieser Effekt wird auch bei Emeis (2011), Buchholz (2006) und Alföldy et al. (2007) beschrieben.

Das NO_2/NO_x -Verhältnis zeigt einen weiteren Unterschied zwischen einer Innenstadtstation und dem Stadtrand. In der Stadt sind die NO -Konzentrationen deutlich höher, als am Rand, da in der Innenstadt deutlich mehr NO ausgestoßen wird und nicht genügend Reaktionspartner vorhanden sind, um daraus sofort NO_2 werden zu lassen. Es ändert sich das NO_2/NO_x -Verhältnis in der Stadt nur in Abhängigkeit von den tageszeitlich verschiedenen Immissionen, am Stadtrand hängt es jedoch deutlich von der Windgeschwindigkeit ab.

Weiters wird gezeigt, dass die Stickoxidimmissionen durch die Windrichtung beeinflusst werden. Dabei sollte man eher von einem Trend als von einer Korrelation sprechen, demnach die Stickoxidimmissionen mit zunehmender Windgeschwindigkeit zurückgehen.

Kapitel 8

Feinstaub

Dieses Kapitel zeigt die Tagesgänge der verschiedenen Partikel, ihre Tagesmittelwerte mit Blick auf die gesetzlichen Grenzwerte und im Speziellen die Entwicklung der UFP. Wie im vorherigen Kapitel werden auch hier die Einflüsse von Wind und Mischungsschicht bestimmt. Das Kapitel schließt mit einer Korrelationsanalyse.

8.1 Tagesgänge aller Partikel

8.1.1 Datengrundlage und Überblick

Feinstaubdaten liegen in Augsburg an allen Stationen (ausgenommen dem Flughafen) vor. Dabei wird einheitlich PM10 gemessen. Eine Ausnahme bildet die Fachhochschule. Dort werden die gesammelten Partikel in acht fein aufgegliederte Größenklassen unterteilt. Somit steht zusätzlich zum PM10-Gehalt eine detailliertere Analysemöglichkeit zur Verfügung. Die kleinsten Partikel werden ab einem aerodynamischen Durchmesser von 3 nm erfasst, die größten bis 10 μm .

Dieses Kapitel beschäftigt sich im ersten Teil mit den Verläufen von PM10, FP (Fine Particle) und UFP (Ultra Fine Particle). Anschließend wird gezeigt, in welcher Verbindung sie mit Windgeschwindigkeit und -richtung stehen, bevor das Kapitel mit einer Korrelationsübersicht schließt.

8.1.2 PM10

Tabelle 8.1 zeigt uns die Mittelwerte für die jeweilige Messperiode. Die Messperiode 2007 wartet an jeder Station mit den höchsten Immissionswerten auf. In beiden Perioden hat der Königsplatz mit Abstand die höchsten Belastungswerte, die Karlstraße die zweithöchsten. Erinnern wir uns an Kapitel 7: dort wurde festgestellt, dass die höchsten NO_x -Konzentrationen an der Karlstraße gemessen wurden, die zweithöchsten am Königsplatz.

| PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | LfU | FH | BIfA | Königsplatz | Bourgesplatz | Karlstraße |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------------|--------------|------------|
| Februar 2007 | 38.57 | 39.24 | 36.04 | 57.99 | 47.03 | 49.02 |
| Februar 2008 | 32.03 | 30.25 | 33.98 | 55.21 | 36.70 | 43.99 |

Tabelle 8.1: Mittelwerte der Massenkonzentration von PM10 gemittelt über die jeweilige Messperiode und für jede Station

Weiters verrät uns Tabelle 8.1, dass die drei Stationen LfU, FH und BIfA entweder am Stadtrand oder weit von den Hauptemissionsquellen entfernt liegen. Die drei Stationen Königsplatz, Bourgesplatz und Karlstraße liegen zum Teil direkt in der Innenstadt oder an stark frequentierten Plätzen.

Nach UmweltBundesAmt (2005) gelten gemäß der Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft nach der 22. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) vom 11. September 2002 folgende Grenzwerte.

Ab dem 1.1.2005 beträgt der einzuhaltende Tagesmittelwert für PM10 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und darf pro Jahr nur 35 mal überschritten werden.

Der Jahresmittelwert ab 2005 beträgt für PM10 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Sollten diese Grenzwerte überschritten werden, ist kurzfristig ein sogenannter Aktionsplan aufzustellen, mit dessen Weisungen die PM10-Belastungen abgeschwächt werden sollen (UmweltBundesAmt (2005)).

Die Abbildungen 8.2 und 8.4 zeigen den direkten Vergleich der Immissionstagesmittelwerte aller Stationen.

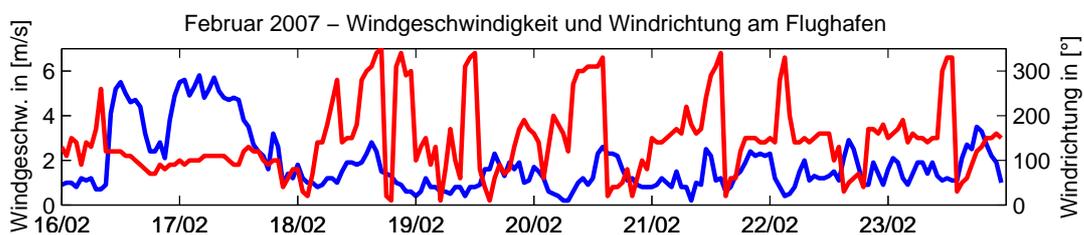


Abbildung 8.1: Windrichtung(rot) und Windgeschwindigkeit(blau) am Flughafen während der Periode 2007

Der Messperiode 2007 zeigt zu Beginn der Messungen Immissionswerte, die selbst an den Innenstadtstationen unter dem gesetzlichen Jahresmittel von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen. Am 17.2.2007 reduzieren sich die Tagesmittel in der Innenstadt gegenüber dem Vortag nochmals, während die Stationen am Stadtrand und an der FH keine weitere Änderung anzeigen. Wir erinnern uns, in Kapitel 5 wurde bereits gezeigt, dass am 17.2.2007 die maximale

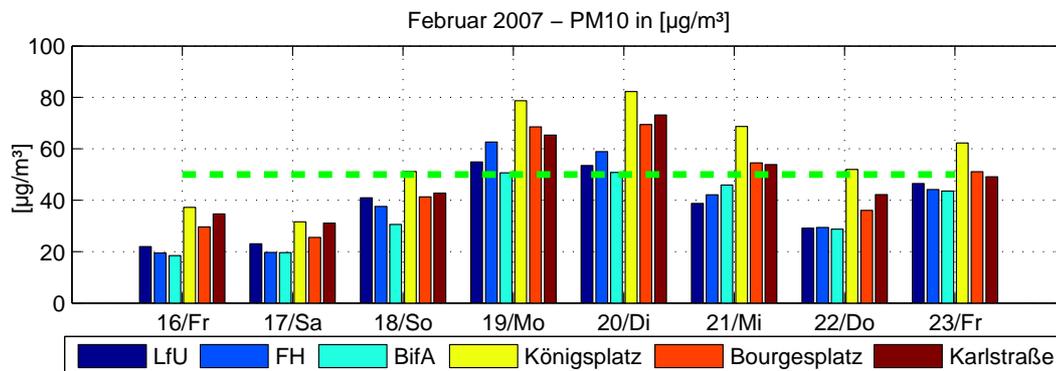


Abbildung 8.2: PM10-Tagesmittelwerte, grün der gesetzliche Höchstwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der an höchstens 35 Tagen pro Jahr überschritten werden darf

Windgeschwindigkeit in diesem Beobachtungszeitraum erreicht wurde (siehe auch Abbildung 8.1). Ab dem 18.2.2007 steigt die Feinstaubbelastung in Augsburg merklich an, da die Windgeschwindigkeit unter 3 m s^{-1} fällt und teilweise bis an die Nachweisgrenze sinkt. Dadurch wird die Luftmasse im Tal nicht mehr ausreichend ausgetauscht. Zusätzlich zu dieser Phase erhöhter Belastung kommt der Arbeits- und Lieferverkehr an den Werktagen. Diese Grafik gibt noch keine ergänzende Information über die Mischungschichthöhe, die aber keinesfalls vergessen werden darf. Mehr dazu an späterer Stelle.

Warum gehen die Mittelwerte gegen Ende der Woche, besonders am Donnerstag (22.2.2007) wieder derart zurück? Die Antwort lässt sich weder in der Windgeschwindigkeit, die sich nicht merklich erhöht hat, noch in der Windrichtung und dergleichen finden. Vielmehr liegt der Rückgang der PM10-Konzentration am Herannahen eines Kaltlufttropfens in der Höhe, der die Atmosphäre labilisiert. Dadurch kann sie am Donnerstag (22.2.2007) durch solare Einstrahlung bis auf über 1000 m AGL durchmischen. Zum Vergleich: an keinem anderen Tag erreicht die MLH Höchstwerte über 750 m AGL (siehe Abbildung: 6.3).

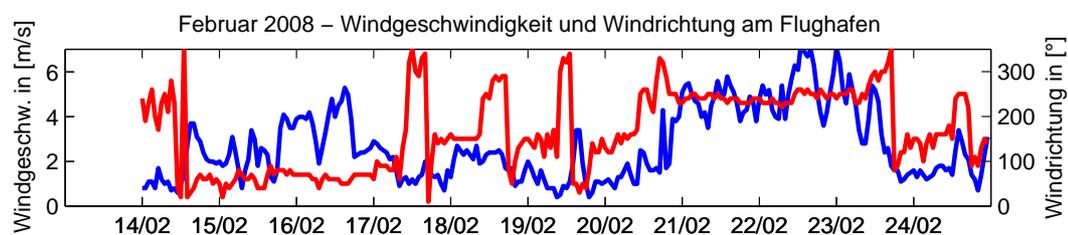


Abbildung 8.3: Windrichtung(rot) und Windgeschwindigkeit(blau) am Flughafen während der Messperiode 2008

Die Messperiode 2008 weist bekanntlich zwei Abschnitte höherer Windgeschwindigkeiten auf (Abbildung 8.3). Am 14.2.2008 ist die Grenzschicht ruhig und sehr stabil

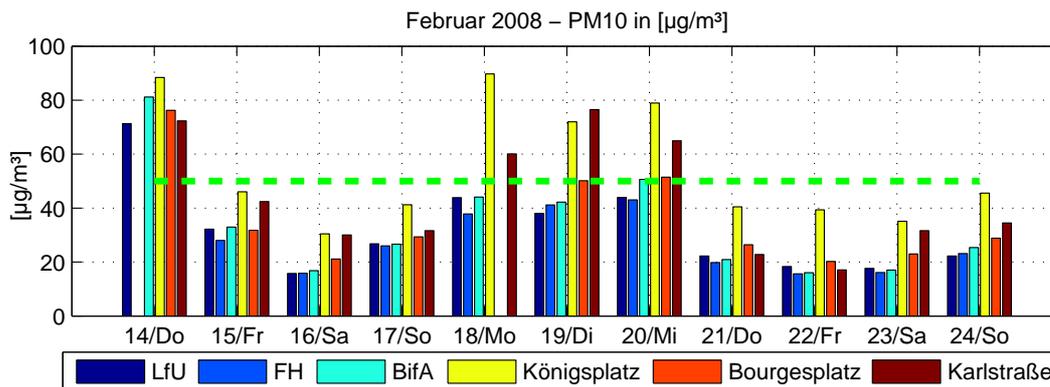


Abbildung 8.4: PM10-Tagesmittelwerte, grün der gesetzliche Höchstwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der an höchstens 35 Tagen pro Jahr überschritten werden darf

geschichtet, sodass fast kein Luftaustausch mit der Umgebung stattfindet. Von 15.2.2008 bis 17.2.2008 weht Ostwind und die damit verbundenen Turbulenzen durchmischen die Talatmosphäre ausreichend, um den städtischen PM10-Gehalt deutlich zu reduzieren. Die von 18.2.2008 bis 20.2.2008 dauernde Episode hoher Luftbelastung ergibt sich durch die gradientschwache Lage und die nächtlichen Bodeninversionen. Diese Inversionen sind sehr stabil geschichtet, sodass sie auch am Tag knapp über dem Boden bleiben und sich nur zaghaf zu abgehobenen Inversionen entwickeln. Von 21.2.2008 bis 23.2.2008 weht lebhafter Westwind in Augsburg, der die Bodeninversion mechanisch aufbricht, sodass die Mischungsschicht mächtiger wird und die Belastung am Boden deutlich abnimmt. Am 24.2.2008 hat sich der Westwind gelegt, und man kann beobachten, dass die Belastung an den Innenstadtstationen sogleich deutlich ansteigt.

Vergleicht man die beiden Perioden 2007 und 2008, so erkennt man deutliche Unterschiede gerade bei den Innenstadtstationen. Wiesen 2007 Königsplatz, Bourgesplatz und Karlstraße keine großen Unterschiede auf, so haben sich 2008 die Emissionen am Königsplatz deutlich gegenüber den anderen beiden Stationen erhöht. Die Stadtrandstationen und die FH zeigen keine deutlichen Änderungen.

Ein weiterer Unterschied sind die Zahl der Tage mit Grenzwertüberschreitung: 2007 wurde an 75% der Messtage mindestens an einer Station der Grenzwert überschritten, 2008 an nur 35%.

Des Weiteren sieht man, dass die Änderung der gemessenen Immissionswerte nicht direkt mit einer Windgeschwindigkeitsänderung einher geht, sondern zeitlich um etwa einen halben Tag versetzt. Das lässt sich erklären: Wenn die Windgeschwindigkeit gesunken ist, hat sich im selben Moment ja noch keine bodennahe stabile Mischungsschicht ausgebildet, in welcher sich der emittierte Feinstaub anreichern kann. Auch dauert es, bis genug Feinstaub emittiert worden ist, dass ein entsprechender Konzentrationsanstieg merkbar wird. Schneller funktioniert hingegen das Auflösen einer Inversion. Je höher die Windgeschwindigkeit ist und je weniger stabil die Inversion ausgeprägt ist, desto schneller kann

sie durch vertikale Turbulenzen bei aufkommendem Wind aufgebrochen werden.

8.1.3 UFP

Die **Ultra Fine Particles** sind wie der Name schon sagt sehr klein und haben einen aerodynamischen Durchmesser von höchstens 100 nm. Die PM10-Werte, die an allen Stationen bestimmt werden, sind in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben, im Gegensatz dazu werden die an der FH ermittelten verschiedenen Feinstaubunterklassen in Teilchen pro Volumen angegeben [$\text{particle}/\text{cm}^3$]. Diese Maßeinheit macht besonders aus medizinischer Sicht Sinn, da für chemische Reaktionen die Anzahl der Teilchen interessant ist und weniger die Masse.

Ein weiterer Grund, die Partikelanzahl und nicht die Masse anzugeben, ist die schwache Korrelation zwischen Massenkonzentration und Teilchenkonzentration der Partikel (Tuch et al. (1997)).

Die in den Abbildungen 8.5 bis 8.8 geplotteten Werte zeigen nicht die tatsächlichen Partikelzahlen, sondern das Verhältnis ihrer Stundenmittel zum Durchschnittswert der jeweiligen Messperiode. Somit können die verschiedenen Größenklassen gemeinsam in einem Plot dargestellt werden, obwohl sich ihre Partikelanzahlen pro Kubikcentimeter stark unterscheiden. Die durchschnittlichen Partikelanzahlen sind in den Tabellen 8.2 und 8.3 noch einmal extra angegeben.

| Partikel/ cm^3 | NC3-10 | NC10-30 | NC30-50 | NC50-100 |
|-------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Februar 2007 | 587 | 4386 | 3649 | 4986 |
| Februar 2008 | 1072 | 4938 | 4327 | 5965 |

Tabelle 8.2: Anzahl der Teilchen/ cm^3 der einzelnen Größenklassen der Ultra Feinen Partikel gemittelt über die jeweilige Messperiode

| Partikel/ cm^3 | NC100-500 | NC500-1000 | NC1000-2500 | NC2500-10000 |
|-------------------------|-----------|------------|-------------|--------------|
| Februar 2007 | 4228 | 49 | 0.86 | 0.08 |
| Februar 2008 | 4512 | 55 | 0.92 | 0.07 |

Tabelle 8.3: Anzahl der Teilchen/ cm^3 der einzelnen Größenklassen der Feinen Partikel gemittelt über die jeweilige Messperiode

Vergleichen wir zu Beginn die UFP mit den FP der einzelnen Perioden. Ein Blick auf Tabelle 8.2 und 8.3 zeigt uns, dass Partikel zwischen 10 nm und 500 nm sehr häufig messbar sind, wobei die größte Partikelkonzentration bei einer Größe zwischen 50 nm und 100 nm anzutreffen ist. Je größer die Partikel werden, desto seltener sind sie anzutreffen. Hierbei muss natürlich beachtet werden, dass es sich um Teilchenzahlen handelt

und nicht um Massenangaben.

Die Masse der UFP spielt bei der Gesamtmasse an Feinstaub nur eine sehr untergeordnete Rolle. Sie hat sich in den letzten Jahren sogar noch erhöht, da immer mehr Dieselfahrzeuge auf der Straße sind. Auch der dieselbetriebene Schwerlastverkehr hat deutlich zugenommen. Doch gerade die UFP dringen am tiefsten in den menschlichen Organismus ein (siehe Abschnitt: 2.2.2).

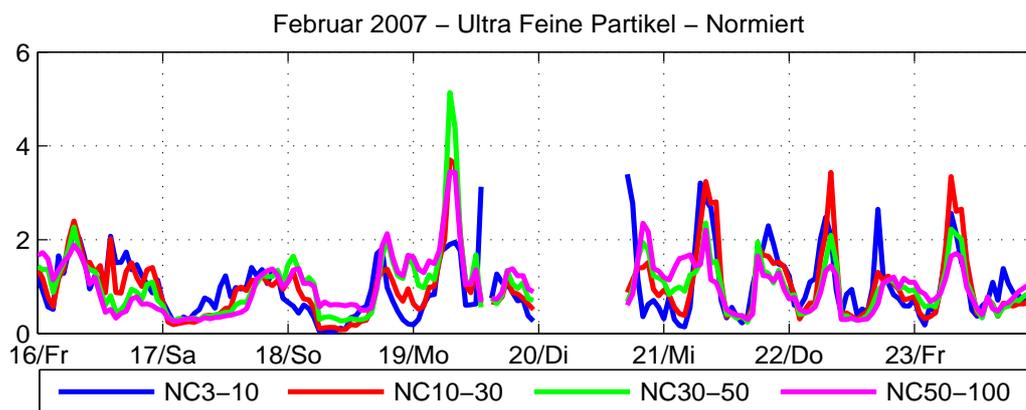


Abbildung 8.5: Ultra Feine Partikel im Februar 2007 - Normiert mit ihrem Mittelwert

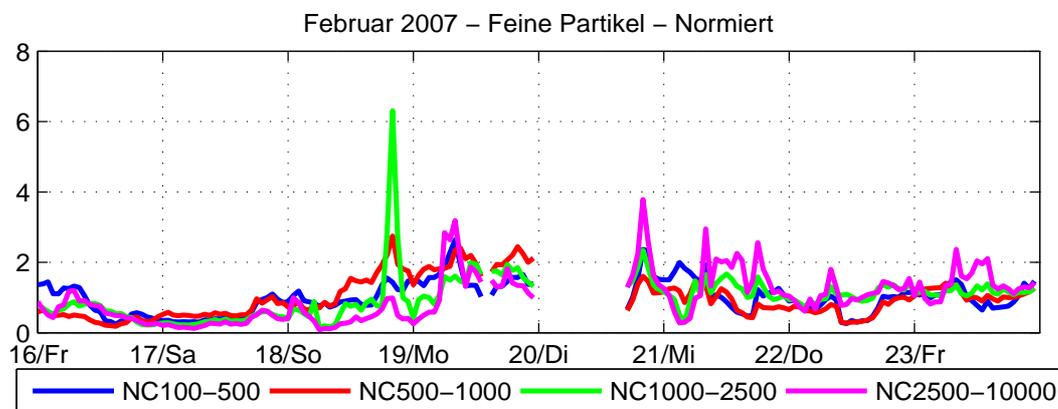


Abbildung 8.6: Feine Partikel im Februar 2007 - Normiert mit ihrem Mittelwert

Nun zur Analyse der Partikelverläufe. In Abbildung 8.5 sind die normierten Verläufe der UFP im Februar 2007 geplottet, in Abbildung 8.6 die FP. Normiert werden die Partikelanzahlen, indem man die Teilchenanzahl einer Größenklasse zu einem Messzeitpunkt nimmt und sie durch die mittlere Partikelanzahl dieser Größenklasse teilt. Die mittleren Partikelanzahlen, durch die geteilt wird, sind in den Tabellen 8.2 und 8.3 zu finden. Je kleiner die Partikel sind, desto unabhängiger ist ihr Tagesgang von äußeren Einflüssen. Am 16.2.2007 und 17.2.2007 zeigen die UFP durchaus einen Tagesgang, obwohl in dieser Zeit Ostwind mit bis zu 6 m s^{-1} wehte. Vergleicht man die UFP mit den FP, so zeigen die FP für diesen Zeitraum keine erkennbare Entwicklung. Nachdem sich am 18.2.2007 der

Wind gelegt hat, bildet sich in allen Partikelgrößen ein Peak aus, wobei das Maximum der FP den UFP zeitlich ein bisschen nachhängt. Am Montag Morgen (19.2.2007) erreichen Teile der UFP die fünffache Partikelkonzentration wie ihr Mittelwert. Auch am Nachmittag ist der Einfluß des Berufsverkehr deutlich zu sehen. An den anderen Werktagen sehen wir ebenfalls einen Tagesgang mit zwei Spitzen, wobei der Nachmittagspeak immer niedriger als der Morgenpeak ist. Dieser Effekt liegt eindeutig an der Entwicklung der MLH, die sich am Nachmittag höher befindet als am Vormittag und sich die bodennahen Luftschichten somit turbulent durchmischen können. Somit verteilen sich die emittierten Partikel in einem größeren Luftvolumen und die Konzentration sinkt.

Wie verhalten sich die Partikel untereinander? Schauen wir zuerst die FP an. Der Ostwind zu Beginn der Messperiode wirkt sich deutlich auf ihre Tagesentwicklung aus. Aufgrund der niedrigen MLH steigt an den Folgetagen der Feinstaubanteil in der Luft, ohne einen konkreten Tagesgang erkennen zu lassen. Vermutlich wird Feinstaub mit zunehmender Größe träger, sodass man das nachmittägliche Anheben der MLH in der Partikelkonzentration nur noch zum Teil erkennen kann. Partikel mit 100 nm bis 1000 nm zeigen von 21.2.2007 bis 23.2.2007 ein Absinken der Konzentration am Nachmittag, bei größeren Partikeln ist keine derartige Beeinflußung sichtbar.

Kommen wir nun zu den UFP: Sie zeigen einen viel deutlicheren Tagesgang wie die FP. Des Weiteren sind die Konzentrationsspitzen und -senken meist leicht verschoben. An den meisten Tagen steigt zuerst die Konzentration der kleinsten erfassten Partikel, die der größten UFP steigt zuletzt. Genauso verhält es sich mit dem Konzentrationsrückgang. Gerade an den Nachmittagen sieht man öfteren, dass die Anzahl der kleinsten Partikel am abruptesten zurückgeht. Je größer die Partikel werden, desto langsamer fällt ihre Konzentration. Da wir hier Immissionswerte vorliegen haben, können wir nicht davon ausgehen, dass die Partikel so emittiert wurden, wie sie gemessen werden. Allgemein entstehen UFP durch Umwandlung von Gasen zu Partikeln oder bei der Verbrennung. Sie koagulieren in Abhängigkeit von ihrer Konzentration und den thermodynamischen Bedingungen in der Umgebung (Tuch et al. (2000)). Diese Tatsache erklärt auch den langsameren Rückgang größerer Partikel, da sie zum Teil erst in der Luft auf Kosten der kleineren Partikel entstehen können.

Nach ausgebiger Betrachtung der Feinstaubverläufe während der Periode 2007 widmen wir uns jetzt der Periode 2008:

Am 14.2.2008 liegt eine ca. 200 m dicke Bodennebelschicht im Lechtal. Auch im Tagesverlauf kann sie sich fast nicht vom Boden abheben, sodass jegliche Durchmischung mit höheren Schichten verhindert wird. Dadurch kommen die hohen Konzentrationen bei den FP zustande. Obwohl die erste Hälfte des 14.2.2008 praktisch windstill verläuft, sind die Konzentrationen der Teilchen < 50 nm höchstens halb so hoch wie an den windschwachen Tagen in der Mitte des Beobachtungszeitraums. Doch diese Erscheinung wirkt wieder logisch, wenn man bedenkt, dass Augsburg unter einem dichten Bodennebel

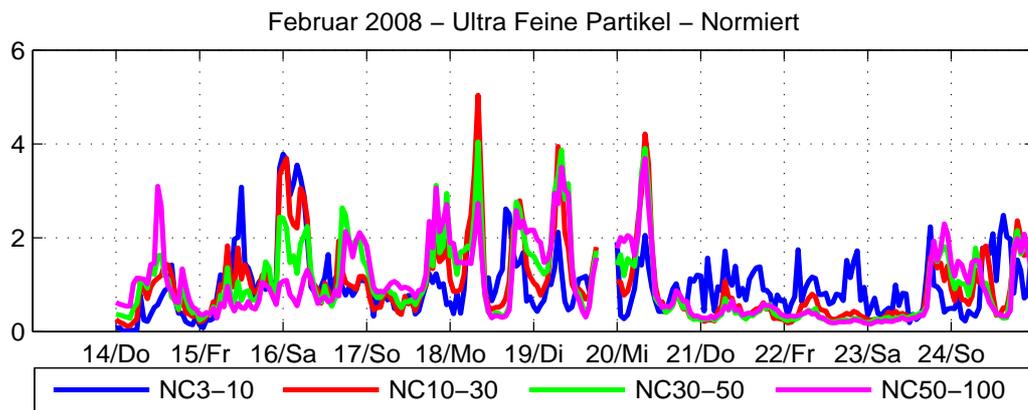


Abbildung 8.7: Ultra Feine Partikel im Februar 2008 - Normiert mit ihrem Mittelwert

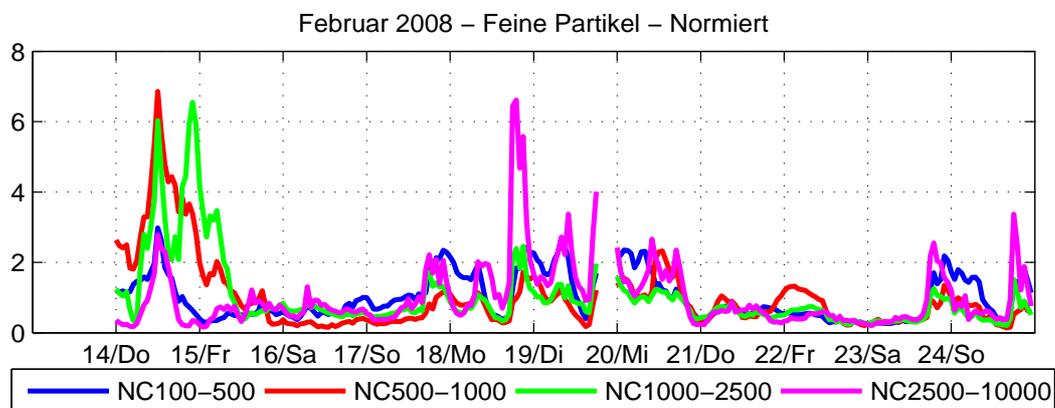


Abbildung 8.8: Feine Partikel im Februar 2008 - Normiert mit ihrem Mittelwert

liegt. Wie oben gerade erörtert, sind die kleinsten Teilchen sehr reaktionsfreudig und da viele UFP hygroskopisch¹ sind, koagulieren² sie mit dem Bodennebel zu größeren Teilchen. Im vom 15.2.2008 bis zum 17.2.2008 andauernden Nordostwind sind bei den UFP normale Tagesgänge zu beobachten, wie sie für die Messperiode im Februar 2007 bereits beschrieben wurden. Die Anzahl der FP wächst über die Tage hinweg. Vom 18.2.2008 bis zum 21.2.2008 ist die Windgeschwindigkeit gering und die MLH liegt knapp über dem Boden, sodass besonders die Zahl der Partikel $> 2,5\mu\text{m}$ deutlich ansteigt. Der Peak am Abend des 18.2.2008 könnte durch eine Windrichtungsänderung zu erklären sein, da der Wind am 18.2.2008 schwach aus Westen kommt. Das würde heißen, dass die Luftmassen, die von 15.2.2008 bis 17.2.2008 von der Stadt mit Feinstaub angereichert wurden und nach Westen transportiert wurden, wieder zurückgekommen wären. Da die MLH genau zum Zeitpunkt des Peaks bis auf 1000 m AGL durchmischt hat, ist es aber wahrscheinlicher, dass aus höheren Schichten ausnahmsweise Luft mit höherem Parti-

¹hygros "feucht, nass" und skopein "anschauen" bezeichnet die Eigenschaft eines Stoffes, Feuchtigkeit aus der Umgebung zu binden. Meist stammt die Feuchtigkeit von Wasserdampf in der Luft.

²die Zusammenballung kleiner Teilchen oder Wassertropfen beim Teilchen- oder Tröpfchenwachstum.

kelgehalt zum Boden gemischt wird. Bei den UFP sieht man für 18.2.2008 bis 20.2.2008 ähnliche Strukturen wie im Vorjahr, nämlich eine leichte Verschiebung der einzelnen Maxima. Häufig haben die kleineren Teilchen ihr Immissionsmaximum ein bisschen vor den größeren und ihre Konzentration fällt dementsprechend schneller wieder ab. Neu sieht man, dass die Tagesentwicklung der Teilchen bis 10 nm vom starken Wind (21.2.2008 bis 23.2.2008) fast nicht beeinflusst wird. Partikel ab 30 nm zeigen hingegen kaum noch einen Tagesgang. In der Nacht auf 24.2.2008 ist die Windgeschwindigkeit wieder fast bis zur Nachweisgrenze gefallen, wodurch sich in der Nacht eine bodennahe Mischungsschicht ausbilden kann. Passend dazu steigen die Partikelkonzentrationen und die FP fallen am Sonntag mit turbulentem Anwachsen der Mischungsschicht. Besonders schön sieht man in der Nacht auf Sonntag wieder den Rückgang der einzelnen Komponenten der UFP. Zuerst geht die Anzahl der kleinsten Teilchen zurück und am Schluß die der größten.

Die beiden Messperioden unterscheiden sich neben den höheren Windgeschwindigkeiten ab dem 21.2.2008 zusätzlich durch zwei Niederschlagsereignisse. Diese gehen mit einem Frontdurchgang einher, wobei in der Nacht auf 21.2.2008 Spuren von Niederschlag am Flughafen gemessen werden und am frühen Morgen des 22.2.2008 knapp 2 mm. Beide Male liegt die Temperatur über 5°C, sodass Schneefall ausgeschlossen werden kann. Die Spuren am 21.2.2008 sieht man deutlich im Partikelminimum der FP, bei den UFP ist der Niederschlag kaum zu sehen. Die 2 mm vom 22.2.2008 sieht man hingegen bei den UFP besser als bei den FP. Zum einen ist die Partikelanzahl der FP aufgrund der hohen Windgeschwindigkeit bereits sehr niedrig, aber weitaus interessanter ist die Tatsache, dass die Teilchen von 3 nm bis 10 nm am 22.2.2008 nur die Hälfte ihrer Konzentration wie am Vortag erreichen. Verantwortlich dafür ist mit Sicherheit die hohe relative Feuchtigkeit, die nach dem morgendlichen Niederschlagsereignis in der bodennahen Atmosphäre zurückbleibt. Wie schon am 14.2.2008 dürfte sie die hygroskopischen, kleinen Partikel gebunden haben. Dass die Konzentrationen der größeren Partikel so niedrig bleiben, ist durch die hohe Windgeschwindigkeit zu erklären.

8.2 Einfluß des Winds

8.2.1 Verteilung von PM10

Bevor man beginnt, die Abbildung 8.9 zu analysieren, sollte man sich an die in Kapitel 5 erlangten Erkenntnisse über die Windverhältnisse erinnern. Die Ereignisse mit Geschwindigkeiten über 3 m s⁻¹ kommen ausnahmslos aus Nordost bis Ost-südost oder aus West-südwest. Das bedeutet, dass die häufig angezeigte Windrichtung aus Südsüdost bis Südost (siehe zum Beispiel Abbildung 5.3 a) und b)) eine lokale Erscheinung ist. Sie wird an der LfU als Südwestanströmung erkannt und es ist mit großer Wahrscheinlichkeit von einem

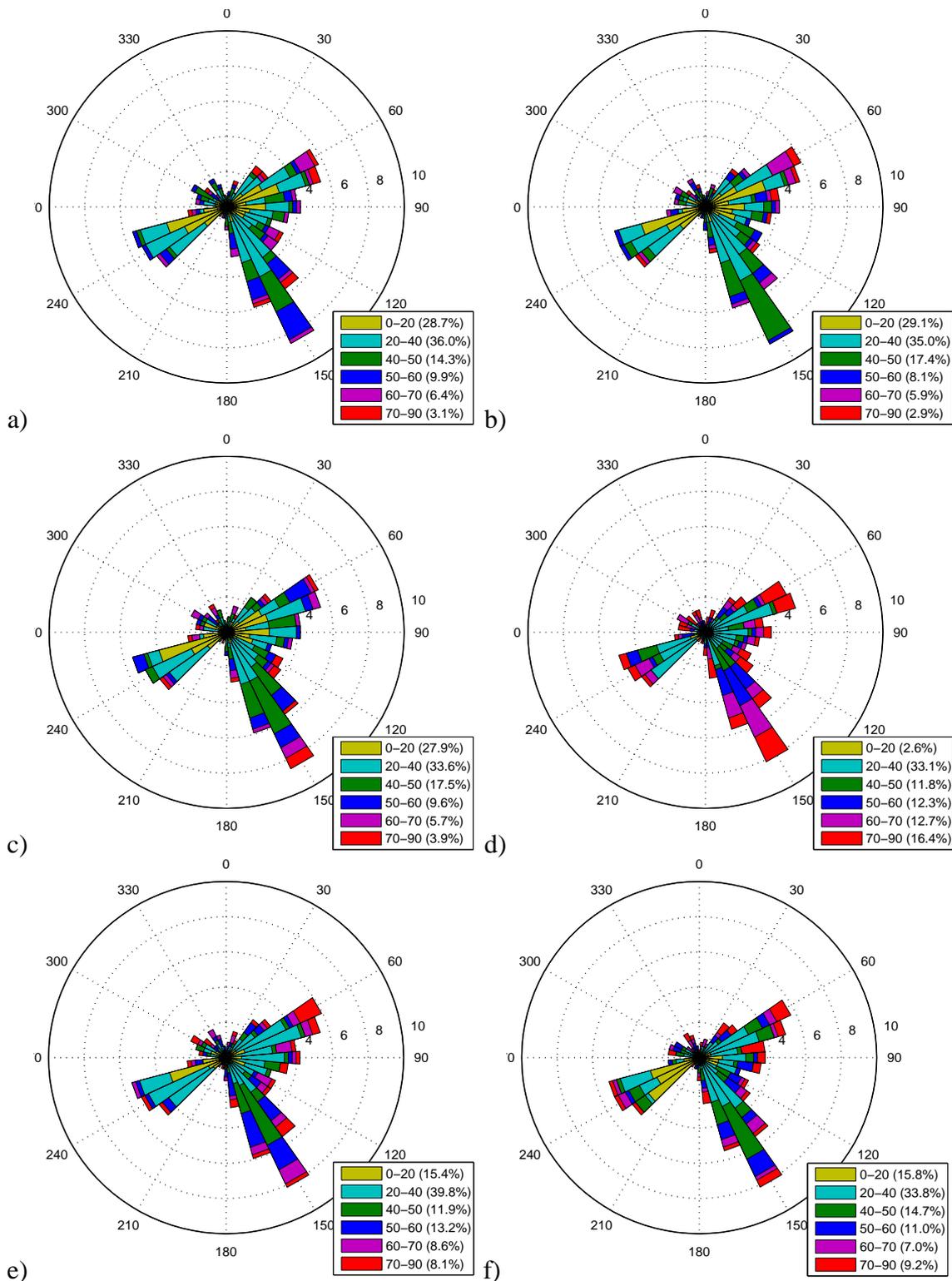


Abbildung 8.9: Die Windrichtung wird am Flughafen gemessen, a) bis f) stehen für jeweils eine Messstation, deren PM10-Stundenmittel aufgeteilt von 0 bis 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit der Windrichtung abgeglichen werden. a) LfU, b) FH, c) BfA, d) Königsplatz, e) Bourgesplatz, f) Karlstraße

Talwindssystem auszugehen, wie es bei Jacobeit (1986) beschrieben ist.

Nun aber zu den einzelnen Grafiken: 8.9 a) zeigt die LfU-Station: bei höheren Windgeschwindigkeiten (Windrichtungen: WSW und ONO) liegen die Immissionen relativ niedrig. Hohe und sehr hohe Immissionen gibt es selten und wenn, dann bei Anströmung aus östlicher Richtung.

In Bild 8.9 b) sind die Verhältnisse an der FH-Station dargestellt. Sie verhält sich sehr ähnlich wie Bild a).

Bild 8.9 c) zeigt die Station am BifA am nördlichen Stadtrand. Wie nicht anders zu erwarten sorgen auch am BifA stärkere Windgeschwindigkeiten für geringere Immissionen. Zusätzlich sieht man eine Veränderung der Luftqualität bei Südanströmung. Im Vergleich zu LfU und FH ist die BifA bei schwachem Südwind deutlich höheren PM10 Werten ausgesetzt. Dafür erfährt sie bei Anströmung aus dem östlichen Sektor weniger Feinstaubbeitrag.

Abbildung 8.9 d) zeigt die am stärksten belastete Station, den Königsplatz. Aufgrund seiner Lage südwestlich des Stadtzentrums erfährt er im Gegensatz zu den anderen Stationen auch bei nordöstlichem Wind höchste Belastungen.

In Abbildung 8.9 e) ist der Bourgesplatz geplottet. Er liegt in Norden des Stadtzentrums und hat bei Westwind deutlich geringere Belastung als bei Ostwind. Das liegt an seiner speziellen Lage zwischen Siedlungsgebiet im Westen und Industrie im Osten.

Als letztes Bild wird 8.9 f) beschrieben. Es handelt sich um die Karlstraße, an welcher Luft, die aus Westsüdwest kommt, anscheinend sauberer ist als Luft aus Ostnordost.

8.2.2 Verteilung von UFP und FP

Abbildung 8.10 zeigt das Verhalten der einzelnen Komponenten der UFP bei verschiedenen Windrichtungen. Die sechs verschiedenen Farben der einzelnen Plots geben die Anzahl der gesammelten Partikel wieder und damit auch eine Information, ob die geplottete Größenklasse mit hohen oder niedrigen Partikelanzahlen aufwartet.

Bild 8.10 a) zeigt die Verteilung der kleinsten Partikel NC3-10. Wie nicht anders zu erwarten, hängt ihre Partikelanzahl pro cm^3 fast nicht von der Windrichtung ab. Sie zeigt ein sehr gleichmäßiges Bild. Bei über 80% der gemessenen Stundenmittel liegt die Teilchenkonzentration unter $1300 \text{ Partikel}/\text{cm}^3$.

Bild 8.10 b) zeigt die zweitkleinste Teilchengröße NC10-30. Man sieht bereits eine stärkere Abhängigkeit von der Windrichtung. Besonders bei Westsüdwestanströmung sind die Konzentrationen dieser Teilchen gering. Wie auch bei der kleinsten Partikelgrößenklasse kommen zu 85% Partikelkonzentrationen vor, die weniger als ein Drittel des Maximalwerts aufweisen.

Bild 8.10 c) zeigt Teilchen mit einer Größe zwischen 30 nm und 50 nm. Bild 8.10 b) und 8.10 c) ähneln sich sehr, nur kommen die NC30-50 bisweilen auch in höheren

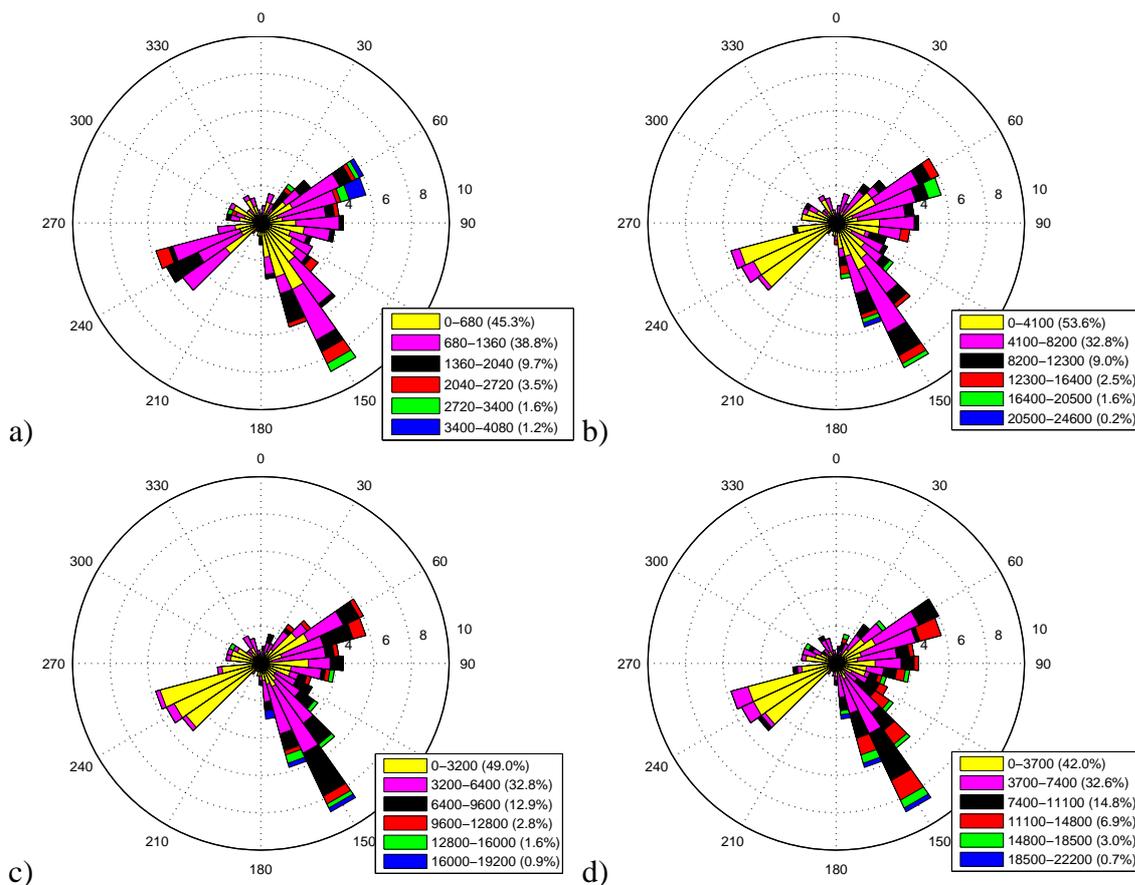


Abbildung 8.10: Die Windrichtung wird am Flughafen gemessen, a) bis d) stehen für jeweils ein Partikelspektrum, dessen Teilchenanzahl pro cm^3 mit der Windrichtung abgeglichen wird. a) NC3-10, b) NC10-30, c) NC30-50, d) NC50-100. Als Maximalwert der Farbskala dient der höchste erreichte Konzentrationswert. Die sechs Farben der Legende sind gleichmäßig zwischen Höchstwert und Null aufgeteilt.

Konzentrationen vor.

Bild 8.10 d) stellt die NC50-100, die größten UFP dar. Der Trend, der sich in b) und c) bereits abgezeichnet hat, wird in d) noch deutlicher: bei schwachem Wind aus Süd-Süd-Ost (wenn das Talwindssystem arbeitet), treten höhere Partikelkonzentrationen auf als bei den anderen Windrichtungen.

Wie verhalten sich die FP bei verschiedenen Windrichtungen?

Bild 8.10 a) stellt die NC100-500 Partikel dar. Sehr interessant sind die hohen Konzentrationen bei Südsüdostwind. Sie bestätigen den Trend einer höheren Belastung durch das Talwindssystem, wie er bei den UFP erkannt wurde.

Bild 8.10 b) zeigt NC500-1000, die aber genau wie die NC1000-2500 in Bild 8.10 c) wenig bis keine Abhängigkeit der Konzentration von der Windrichtung erkennen lassen.

Bild 8.10 d) stellt die größten Partikel, die zu den FP gehören dar. Auch wenn in über

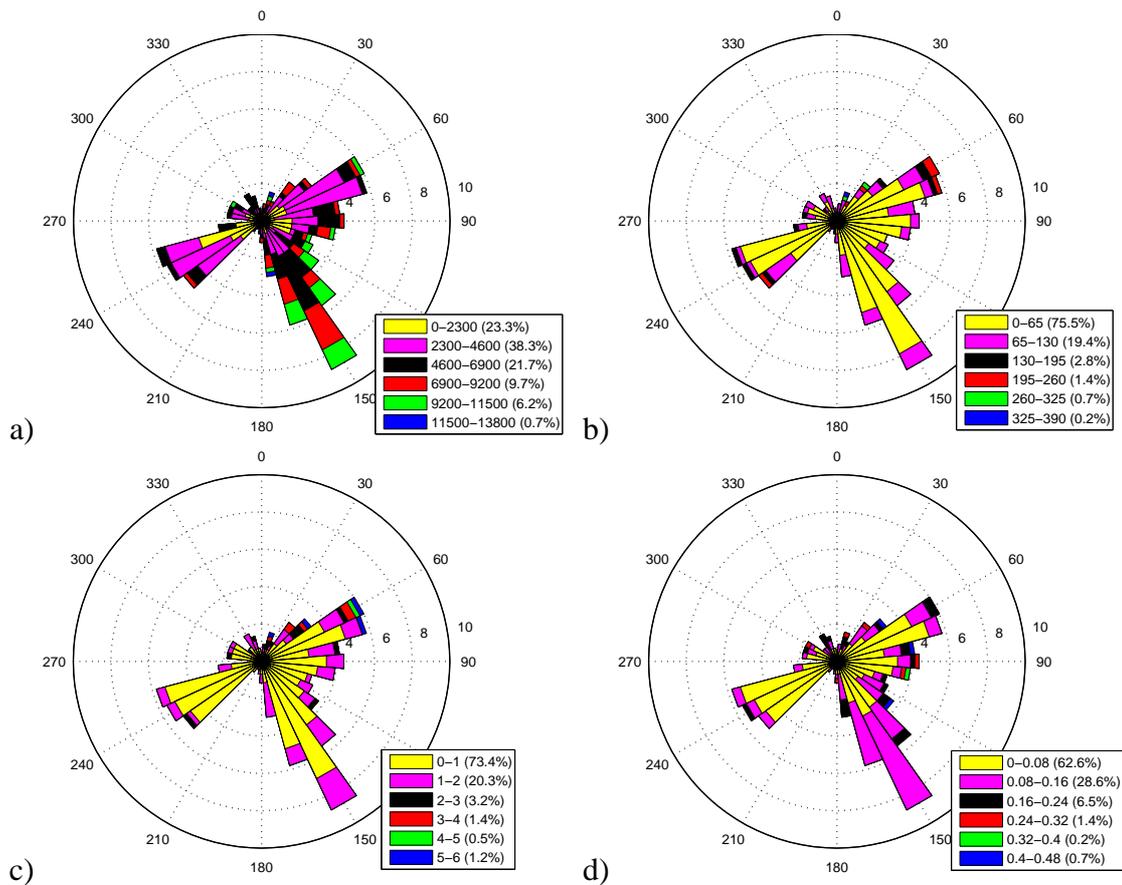


Abbildung 8.11: Die Windrichtung wird am Flughafen gemessen, a) bis d) stehen für jeweils ein Partikelspektrum, dessen Teilchenanzahl pro cm^3 mit der Windrichtung abgeglichen wird. a) NC100-500, b) NC500-1000, c) NC1000-2500, d) NC2500-10000. Als Maximalwert der Farbskala dient der höchste erreichte Konzentrationswert. Die sechs Farben der Legende sind gleichmäßig zwischen Höchstwert und Null aufgeteilt.

60% der Messungen weniger als $0,08$ Teilchen pro cm^3 zu finden sind, sieht man, dass bei Süd-Süd-Ostwind höhere Immissionen an der Messstation erfasst werden.

Wie ist der oben genannte Trend, der sich mit steigender UFP-Größe erhöhenden Partikelkonzentration zu bewerten? Werden im Süden der Stadt wirklich ausreichend Partikel emittiert, sodass es zu höheren Konzentrationen bei talausfließenden Luftmassen kommt? Für diese Frage wäre ein weiterer Partikelsammler wie an der FH hilfreich. Aber die Lösung sollte auch ohne ein redundantes Messgerät zu finden sein. Der Talauswind entsteht meist in der Nacht und geht bis zum Morgen. Just zu dieser Zeit ist auch häufig die Mischungsschicht relativ nah am Boden, wo sich die Partikel ansammeln und die Teilchenanzahl steigt. Somit besteht wahrscheinlich kein direkter Zusammenhang zwischen Teilchenkonzentration und Windrichtung, sondern nur ein indirekter, weil die Partikel und das Talwindssystem von der Höhe der Mischungsschicht abhängen.

Warum zeigen dann die anderen UFP nicht das selbe Muster wie die NC100-500? Wie

oben mehrfach erwähnt stehen die einzelnen Teilchen in Wechselwirkung zueinander und koagulieren zu größeren. Deshalb kommen NC100-500 bei Süd-Süd-Ostwind häufiger als kleinere Partikel vor, weil sie aus den kleineren entstanden sind.

8.3 Korrelationen aller Partikelgrößen mit meteorologischen Parametern

Abschließend werden alle Partikelgrößen mit MLH, Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte korreliert. Die unterstützenden Tabellen sind in Anhang H zu finden.

Lässt man PM10 mit den oben aufgezählten meteorologischen Parametern korrelieren, findet man die beste Übereinstimmung bei den Nachtwerten der Windgeschwindigkeit während der Messperiode 2008 mit $R^2 = 0.383$. Allgemein kann man sagen, dass während der Periode 2008 bessere Korrelationen gefunden werden als 2007. Das liegt sicherlich daran, dass 2008 im Verhältnis öfter höhere Windgeschwindigkeiten angetroffen werden.

Wie verhalten sich nun die einzelnen Partikelgrößenklassen in Bezug auf die meteorologischen Parameter?

Zuerst wird ihre Beziehung zur Mischungsschicht beschrieben. Auch hier sind die Korrelationen der Periode 2007 deutlich schlechter als 2008. Die Tagwerte korrelieren besser mit der MLH als die Nachtwerte und mit ansteigender Partikelgröße wird die Korrelation zur MLH immer besser. Wie bereits von Schäfer et al. (2009) festgestellt wurde, zeigen die NC100-500 die besten Korrelationswerte ($R^2 = 0.525$). Teilchen größer als $0,5 \mu\text{m}$ korrelieren wieder weniger gut mit der MLH. Mit der Temperatur stehen tendentiell eher Teilchen zwischen 30 nm und 500 nm in Beziehung. Kleinere und größere zeigen zum Teil gar keine Korrelation.

Die Windrichtung zeigt weder 2007 noch 2008 einen Zusammenhang mit dem Auftreten der verschiedenen Partikelklassen.

Zumindest die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Partikelmissionen an der FH. Teilchen zwischen 50 nm und 500 nm zeigen das beste R^2 . Dass die Korrelationen 2008 höher sind als 2007, was man übrigens auch bei der Temperatur sieht, liegt an der höheren Anzahl von Windtagen 2008.

Die relative Feuchte zeigt für die Periode 2007 bessere Korrelationen. Man denke an die Tage mit nächtlichem Bodennebel, die 2007 häufiger waren als 2008. Diesen Effekt kann man besonders bei den Partikeln $< 0,5 \mu\text{m}$ sehen.

Wir sehen, besonders die Partikel zwischen 50 nm und 500 nm sprechen auf diverse meteorologische Parameter an. Teilchen < 30 nm sind so klein, dass sie aufgrund ihrer großen Oberfläche im Verhältnis zur Masse kaum beeinflussbar sind. Zusätzlich ist ihre Verweildauer kürzer, da sie sich bereits in der Luft mit anderen Teilchen vereinigen und dann nicht mehr messbar sind. Teilchen ab 500 nm werden bereits so träge, dass sie kaum mehr auf die meteorologischen Parameter ansprechen. Wichtig ist: man darf bei diesen Korrelationen nicht vergessen, dass sie nur einen sehr begrenzten Zeitraum wiedergeben und die Wetterlage relativ homogen war.

8.4 Zusammenfassung

Die PM₁₀-Konzentration hängt eindeutig von der Windgeschwindigkeit ab. Während der windschwächeren Messperiode 2007 wurden an 75% der Tage die gesetzlichen Tageshöchstwerte überschritten, 2008 nur an 35%. Es ist ein deutliches Gefälle zwischen Innenstadt und Stadtrand zu erkennen. Höhere Windgeschwindigkeiten reduzieren hauptsächlich die Belastung im Umland, in der Innenstadt bleiben die Immissionen annähernd gleich. Des Weiteren fällt auf, dass bei einem Abfall der Windgeschwindigkeit erst mit ein paar Stunden Verzögerung die Feinstaubkonzentration der Luft ansteigt. Werden hingegen Luftmassen mit hohem Feinstaubgehalt von höheren Windgeschwindigkeiten erfasst, sinken die Staubimmissionen augenblicklich.

Mit Hilfe einer Windrose werden alle sechs PM₁₀-Messstationen verglichen. Dabei findet man Immissionsunterschiede auf Luv- und Leeseite der Stadt die auch von Jacobeit (1986) beschrieben werden. Auch das schwachwindige Talwindssystem macht sich durch deutlich höhere PM₁₀-Belastungen am nördlichen Stadtrand im Vergleich zum südlichen bemerkbar. In der Innenstadt ist die Belastung wie zu erwarten höher als am Stadtrand.

UFP werden von der Windgeschwindigkeit weniger beeinflusst als Feine Partikel. Je kleiner die Partikel sind, desto unabhängiger sind sie von der Windgeschwindigkeit.

Je größer die Partikel sind, desto später erreichen sie im Tagesverlauf ihr Konzentrationsmaximum und desto langsamer fällt ihre Konzentration. Das liegt daran, dass die kleineren Partikel zu größeren koagulieren, wie auch Tuch et al. (2000) bereits beschrieben hat. Je kleiner die UFP sind, desto geringer wird ihre Partikelkonzentration bei Nebel und Niederschlag, denn je kleiner ein Staubteilchen ist, desto stärker hygroskopisch ist es. Bei länger andauernden Hochdruckphasen, stellt man in der bodennahen Luft eine deutliche Zunahme der größeren Partikel gegenüber den kleineren fest. Auch das liegt am Koagulations- und Agglomerationsverhalten der Partikel.

Ferner wurde die Abhängigkeit der einzelnen Partikelgrößen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ermittelt. Dabei zeigen die kleinsten UFP kaum eine Beeinflussung durch den Wind. Je größer die UFP werden, desto mehr werden sie von schwachen Winden (zum Beispiel: Talwindssystem) transportiert. Die steigenden Partikelimmissionen

in der Stadt liegen aber nur zum Teil an der Windrichtung, da Talauswind aus Süden nur in der Nacht und bei niedriger MLH entsteht. Und bei einer flachen Mischungsschicht, steigt automatisch der Feinstaubgehalt der Luft.

PM10 zeigt während der Messperiode 2008 die beste Korrelation mit den Nachtwerten der Windgeschwindigkeit ($R^2 = 0.383$). Aufgrund der höheren Windgeschwindigkeit während der Periode 2008 werden bessere PM10-Korrelationen gefunden als 2007. Auch korrelieren die Tageswerte von PM10 besser mit der MLH als die Nachtwerte.

Bei der Untersuchung aller Partikelgrößenklassen korrelieren am besten NC100-500 mit der MLH ($R^2 = 0.525$), wie auch von Schäfer et al. (2009) bereits herausgefunden wurde. Besonders Partikel zwischen 50 nm und 500 nm sprechen auf MLH, Temperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit an. Kleinere Teilchen werden wegen ihrer großen Oberfläche im Verhältnis zu ihrer Masse kaum beeinflusst. Es scheint, als gelten für sie andere Transportkriterien in der Luft, doch das ist an dieser Stelle reine Spekulation. Auch ist ihre Verweildauer kürzer, da sie mit anderen Partikeln koagulieren. Je größer die Oberfläche der Teilchen wird, desto träger werden sie und sprechen kaum mehr auf meteorologische Parameter an.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Bei der Analyse der Großwetterlagen stellen wir fest, dass beide Winter unterdurchschnittlich viele Westwetterlagen zeigen, dafür um so mehr Hochdrucklagen und -brücken. Obwohl die Großwetterlagen im Beobachtungszeitraum 2007 täglich wechseln, ändern sich die synoptischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet aufgrund der gradientschwachen Lage nur gering. Die Messperiode 2008 wird bis zur Mitte des Beobachtungszeitraums von Westwetterlagen beherrscht, bevor sich nach einem Frontdurchgang ein mächtiges Hoch bildet.

Die angesprochenen Schichten starker Winde wenige 100 m AGL beeinflussen gerade in der Nacht oft die MLH. Sie sind wegen der schwachen großskaligen Strömungen meistens von der Großwetterlage entkoppelt. Diese Low-Level-Jets erreichen in relativ dünnen Schichten hohe Windgeschwindigkeiten (in dieser Arbeit ca. 10 m s^{-1}).

In beiden Wintern erwärmt sich die Atmosphäre zum Ende der Messperiode hin, wobei die Periode 2007 insgesamt um 1°C wärmer wie die Periode 2008 ist. Beim Vergleich der drei meteorologischen Messstationen sieht man an den höheren Temperaturen der Innenstadtstation, dass sich über der Stadt eine Wärmeinsel befindet, die auch von Jacobit (1986) beschrieben wird. Beide Perioden zeigen jeweils mehrere wolkenfreie Tage in Folge, an denen sich keine synoptischen Störungen ereignen. So bildet sich ein deutlich ausgeprägter Tagesgang in der Temperatur, den man auch in der relativen Feuchte sieht. Während der Periode 2007 ist die Atmosphäre etwas feuchter als 2008, sodass sich 2007 häufiger Bodennebel bildet. Während beider Perioden ist keine Schneebedeckung am Erdboden zu erkennen. 2008 zieht eine Warmfront mit sehr wenig Niederschlag über Augsburg.

An drei Stationen werden Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen, wobei die FH-Station, die sich in der Stadt befindet, sehr von umstehenden Bäumen und Gebäuden beeinflusst wird.

Die ersten zwei Tage der Periode 2007 kommt der Wind aus Ost mit bis zu 6 m s^{-1} , dann bildet sich ein leichtes Talwindssystem aus, welches in der Nacht für schwache Windgeschwindigkeiten talauswärts sorgt. Zu Beginn der Periode 2008 weht Ostwind mit 5 m s^{-1} , dann flaut der Wind ab, und es entstehen schwache Talauswinde aus Süden. An den letzten vier Tagen des Beobachtungszeitraums im Februar 2008 sorgt eine Warmfront aus Westen für Windgeschwindigkeiten über 8 m s^{-1} .

In beiden Perioden kommen Windgeschwindigkeiten $> 3 \text{ m s}^{-1}$ aus West-Süd-West oder Ost-Nord-Ost. Schwächere Winde wehen meist entlang der Talrichtung nach Norden. Aufgrund der Talorographie werden bei schwachem Wind an LfU (südlicher Stadtrand) und DWD (Flughafen nördlich der Stadt) geringe Unterschiede in der Windrichtung festgestellt.

Wie bereits Jacobeit (1986) festgestellt hat, sind die Hauptanströmungsrichtungen im Untersuchungsgebiet West-Süd-West und Ost-Nord-Ost. 2008 gibt es zwei Windereignisse mit genau dieser Anströmung. Man erkennt ein Talwindssystem bei synoptisch ruhiger Lage. Dieses Talwindssystem wurde ebenfalls bereits von Jacobeit (1986) beschrieben. In Augsburg kann das Talwindssystem während der Beobachtungszeiträume nur in der Nacht erkannt werden, da die Atmosphäre am Tag durch einstrahlungsbedingte Turbulenzen zu stark durchmischt wird und das Talwindssystem somit gestört wird. Diese Störfaktoren beschreibt auch Emeis (2004). Der Einfluß der größeren Oberflächenrauigkeit der Stadt, wie ihn Rotach (1999) zeigt, sorgt für ein Abbremsen des Windes und somit für niedrigere Windgeschwindigkeiten im Lee der Stadt.

Die Mischungsschicht wird in dieser Arbeit einerseits mit einem CL31-Ceilometer detektiert, zum anderen werden vier verschiedene Methoden zu Bestimmung der MLH aus einem Radiosondenaufstieg verwendet. Die Radiosonde startet zu Mitternacht und Mittags in Oberschleißheim bei München (50 km Distanz zum Ceilometer). Die verschiedenen Methoden wurden bereits von Seibert et al. (2000) beschrieben.

Die Richardsonzahl wird nach Etling (2002) und Stull (2000) bestimmt. Wie die Gradienten der potentiellen Temperatur auf die MLH schließen lassen, ist bei Baumann-Stanzer and Groehn (2004) und Heffter (1980) beschrieben. Die MLH-Bestimmung über den Gradienten des Mischungsverhältnisses wird ebenfalls wie bei Baumann-Stanzer and Groehn (2004) versucht und wie man die MLH über die Gradienten der relativen Feuchte errechnet, ist bei Hennemuth and Lammert (2006) zu finden.

Beim Vergleich der beiden Messperioden liegt die MLH 2007 im Mittel bei 411 m AGL, 2008 bei 441 m AGL. Bei der detaillierten Analyse jedes einzelnen Beobachtungstages werden die vielfältigen Einflüsse auf die Entwicklung der Mischungsschicht deutlich. Es können drei Hauptszenarien für die Mischungsschicht festgestellt werden. Bei nächtlichen Bodeninversionen liegt die Mischungsschicht tief, an konvektiven Tagen erreicht sie meist die Obergrenze der konvektiven (durchmischten) Bodenschicht und bei mechanischer Durchmischung durch länger anhaltende Windperioden ist sie in der Nacht und am

Tag etwa gleich mächtig. Diese drei Szenarien haben auch Emeis and Türk (2004) bereits herausgefunden.

Abschließend liefert eine Statistik einen Überblick, mit welchen Methoden sich die Mischungsschicht am besten während einer winterlichen Hochdruckwetterlage detektieren lässt. Dabei erweist sich der Gradient der potentiellen Temperatur als am besten geeignet, wie auch Kollmann (2008) in seiner Arbeit bestätigen kann. In vorliegender Arbeit erscheinen Mischungsverhältnis und relative Feuchte als ähnlich gute Indikatoren und zeigen Tageskorrelationen von 0.36 beziehungsweise 0.48. In der Nacht sind diese Korrelationen allerdings deutlich schlechter, als Schreiter (2010) herausgefunden hat. Die Bestimmung der kritischen Richardsonzahl zur Analyse der MLH erweist sich als am wenigsten zutreffend. Auch Kollmann (2008) kann das bestätigen. Diese Ergebnisse stehen natürlich hauptsächlich unter dem Einfluß der vorherrschenden winterlichen Hochdruckwetterlage. Des Weiteren spielen sicher die geringe Höhenauflösung der Radiosonde und die horizontale Distanz zwischen Radiosonde und Ceilometer keine zu vernachlässigende Rolle, nicht zu vergessen die statistische Aussagekraft von insgesamt 18 Messtagen.

Stickoxidmessungen liegen an fünf verschiedenen Stationen vor. Zwei Stationen sind stark vom Straßenverkehr beeinflusst und zeigen hohe Belastungen, die anderen drei zeigen deutlich geringere Belastungen. Als repräsentative Station für Stickoxidverläufe dient die Station an der Karlstraße. Sie liegt in einer Straßenschlucht und zeigt einen merklichen Unterschied zwischen Werktagsbelastung und Wochenendimmissionen. Mit Blick auf die meteorologischen Parameter stellt man fest, dass die Stickoxidwerte außerhalb der Stadt deutlich von der Mischungsschichthöhe abhängen, während an Stationen in der Stadt kein Einfluss der MLH erkennbar ist. Das haben bereits Schäfer et al. (2006) herausgefunden. Anders bei Windgeschwindigkeit und -richtung: auch Stationen in der Stadt zeigen Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, vorausgesetzt, sie können barrierefrei angeströmt werden.

Zusätzlich zu den Stickoxiden, wird die Ozonbelastung analysiert. Ihre Konzentration hängt von Tageszeit und Windgeschwindigkeit ab. In windschwachen Perioden werden am Tag hohe, in der Nacht geringe Ozonwerte gemessen (siehe auch Hobbs (2000)). Perioden mit stärkerem Wind zeigen ähnlich hohe Tageswerte wie windschwache Tage. In der Nacht fällt die Konzentration jedoch nur auf 50% des Tageswerts und liegt damit deutlich über den Nachtwerten windschwacher Tage, da die stärkeren Windgeschwindigkeiten (unter anderem Low-Level-Jets) durch vertikale Turbulenzen atmosphärisches Ozon aus höheren Schichten zum Boden mischen. Dieser Effekt wird auch bei Emeis (2011), Buchholz (2006) und Alföldy et al. (2007) beschrieben.

Das NO_2/NO_x -Verhältnis zeigt einen weiteren Unterschied zwischen einer Innenstadtstation und dem Stadtrand. In der Stadt sind die NO -Konzentrationen deutlich höher, als am Rand, da in der Innenstadt deutlich mehr NO ausgestoßen wird und nicht genügend Reaktionspartner vorhanden sind, um daraus sofort NO_2 werden zu lassen. Es ändert sich

das NO_2/NO_x -Verhältnis in der Stadt nur in Abhängigkeit von den tageszeitlich verschiedenen Emissionen, am Stadtrand hängt es jedoch deutlich von der Windgeschwindigkeit ab.

Weiters wird gezeigt, dass die Stickoxidimmissionen durch die Windrichtung beeinflusst werden. Dabei sollte man eher von einem Trend als von einer Korrelation sprechen, demnach die Stickoxidimmissionen mit zunehmender Windgeschwindigkeit zurückgehen.

PM10 liegt in dieser Arbeit nur als Massenkonzentration vor, die UFP und FP werden nur in Teilchenanzahl angegeben.

Die PM10-Konzentration hängt eindeutig von der Windgeschwindigkeit ab. Während der windschwächeren Messperiode 2007 wurden an 75% der Tage die gesetzlichen Tageshöchstwerte überschritten, 2008 nur an 35%. Es ist ein deutliches Gefälle zwischen Innenstadt und Stadtrand zu erkennen. Höhere Windgeschwindigkeiten reduzieren hauptsächlich die Belastung im Umland, in der Innenstadt bleiben die Immissionen annähernd gleich. Des Weiteren fällt auf, dass bei einem Abfall der Windgeschwindigkeit erst mit ein paar Stunden Verzögerung die Feinstaubkonzentration der Luft ansteigt. Werden hingegen Luftmassen mit hohem Feinstaubgehalt von höheren Windgeschwindigkeiten erfasst, sinken die Staubimmissionen augenblicklich.

Mit Hilfe einer Windrose werden die Massenkonzentrationen von allen sechs PM10-Messstationen verglichen. Dabei findet man Immissionsunterschiede auf Luv- und Lee-seite der Stadt die auch von Jacobeit (1986) beschrieben werden. Auch das schwachwindige Talwindssystem macht sich durch deutlich höhere PM10-Belastungen am nördlichen Stadtrand im Vergleich zum südlichen bemerkbar. In der Innenstadt ist sie Belastung wie zu erwarten höher als am Stadtrand.

Die Partikelanzahlkonzentrationen der UFP werden von der Windgeschwindigkeit weniger beeinflusst als die FP. Je kleiner die Partikel sind, desto unabhängiger sind sie von der Windgeschwindigkeit.

Je größer die Partikel sind, desto später erreichen sie im Tagesverlauf ihr Konzentrationsmaximum und desto langsamer fällt ihre Teilchenanzahl. Das liegt daran, dass die kleineren Partikel zu größeren koagulieren, wie auch Tuch et al. (2000) bereits beschrieben hat. Je kleiner die UFP sind, desto tiefer sinkt ihre Partikelanzahl bei Nebel und Niederschlag, denn je kleiner ein Staubteilchen ist, desto stärker hygroskopisch ist es. Bei länger andauernden Hochdruckphasen, stellt man in der bodennahen Luft eine deutliche Zunahme der größeren Partikel gegenüber den kleineren fest. Auch das liegt am Koagulations- und Agglomerationsverhalten der Partikel.

Ferner wurde die Abhängigkeit der einzelnen Teilchenanzahlen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ermittelt. Dabei zeigt die Anzahl der kleinsten UFP kaum eine Beeinflussung durch den Wind. Je größer die UFP werden, desto mehr werden sie von schwachen Winden (zum Beispiel: Talwindssystem) transportiert. Bei Südwind steigen

in der Stadt die Partikelanzahlen. Das liegt aber nur zum Teil an der Windrichtung, da Talauswind aus Süden nur bei flacher Grenzschicht entsteht. Und bei einer flachen Mischungsschicht, steigt automatisch der Feinstaubgehalt der Luft.

Die Massenkonzentration von PM10 zeigt die beste Korrelation mit den Nachtwerten der Windgeschwindigkeit während der Messperiode 2008 ($R^2 = 0.383$). Auch werden wegen der höheren Windgeschwindigkeit während der Periode 2008 bessere PM10-Massenkorrelationen gefunden als 2007. Die Tageswerte der PM10-Massenkonzentration korrelieren besser mit der MLH als die Nachtwerte.

Bei der Untersuchung aller Teilchenanzahlen korrelieren am besten NC100-500 mit der MLH ($R^2 = 0.525$), wie auch von Schäfer et al. (2009) bereits herausgefunden wurde. Besonders Partikelanzahlen zwischen 50 nm und 500 nm sprechen auf MLH, Temperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit an. Die Anzahl kleinerer Teilchen werden wegen ihrer großen Oberfläche im Verhältnis zu ihrer Masse kaum beeinflusst. Es scheint, als gelten für sie andere Transportkriterien in der Luft. Denkbar wäre die Brownsche Molekularbewegung, doch das ist an dieser Stelle reine Spekulation. Auch ist ihre Verweildauer kürzer, da sie mit anderen Partikeln koagulieren. Je größer Teilchen werden, desto träger werden sie und sprechen kaum mehr auf meteorologische Parameter an.

Ausblick

Die Mischungsschichthöhe ist ein entscheidender Faktor in der Beurteilung der Luftqualität der Grenzschicht. In dieser Arbeit wurden nur kurze Zeiträume analysiert. Für weitere Studien wäre es interessant zu untersuchen, ob die Mischungsschichthöhe während anderer Jahreszeiten vergleichbare Auswirkungen auf den Schadstoffgehalt in der Grenzschicht hat.

Während nächtlicher Bodeninversionen findet man immer wieder einen charakteristischen Talauswind. Leider konnten bei vorliegender Arbeit nur zwei meteorologische Stationen verwendet werden. Es wäre für zukünftige Forschungen sehr interessant, wenn man weitere meteorologische Stationen am Stadtrand und auch in der Stadt über längere Zeiträume zur Verfügung hätte. Damit könnte man Luv- und Leeeffekte besser analysieren und die Einflüsse der Stadt auf die Grenzschicht beschreiben.

Zusätzlich wäre es von Vorteil, Luftschadstoffmessgeräte und meteorologische Stationen zu kombinieren. Somit könnte man sehr lokal meteorologische Einflüsse auf die Luftqualität erkennen.

Das größte Forschungspotential liegt in der weiteren Untersuchung von Feinstaub. Dieser wird aktuell nur bis zu einer Größe von 3 nm gemessen, doch kann man mit Bestimmtheit davon ausgehen, dass es eine Vielzahl kleinerer Partikelgrößen gibt, die aktuell noch nicht erfasst werden können. Es wäre für zukünftige Studien ein wichtiges Ziel, zu erforschen, wie man kleinste Teilchen misst und welche Mechanismen für ihre Verbreitung verantwortlich sind. Auch aus medizinischer Sicht handelt es sich hier um ein sehr interessantes Thema. Diese kleinsten Teilchen dringen problemlos über die Lunge in den menschlichen Organismus ein und ihre Auswirkungen dort sind bisher nur sehr wenig bekannt.

Anhang A

Tagesverläufe der Mischungsschicht erstellt mit dem CL31-Ceilometer

Die folgenden Plots wurden vom CL31-Ceilometer, das auf dem Dach des Messkontainers an der FH steht, erstellt. Sie zeigen die Mischungsschichthöhe und - sofern vorhanden - die Bewölkung. Die Farbskala auf der rechten Seite der Plots zeigt die Rückstreuintensität der einzelnen Luftschichten. Je rötlicher die Farbe im Plot erscheint, desto mehr Signal wird aus der entsprechenden Schicht zum Ceilometer rückgestreut. Auf der Abszisse ist der Tagesgang aufgetragen, auf der Ordinate die Höhe. Die türkisen Kästchen mit schwarzem Rand zeigen die Mischungsschichthöhe, die lila Punkte zeigen die Wolkenuntergrenze an. Bereiche mit der höchsten Rückstreuintensität zeigen Wolken. Niederschlag erkennt man an vertikalen Streifen hoher Rückstreuintensität (22.2.2008).

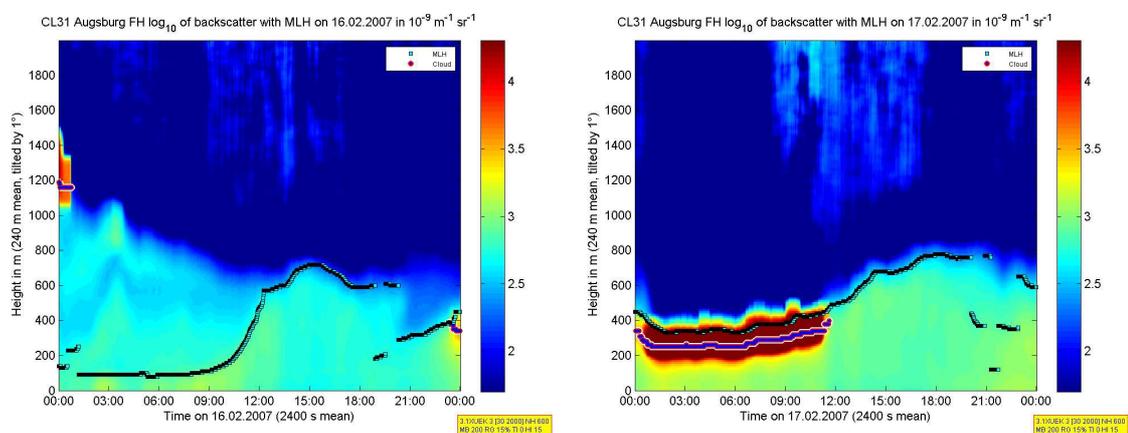


Abbildung A.1: 16.2.2007

Abbildung A.2: 17.2.2007

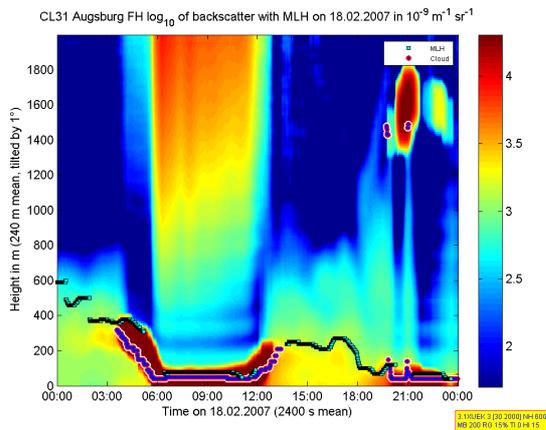


Abbildung A.3: 18.2.2007

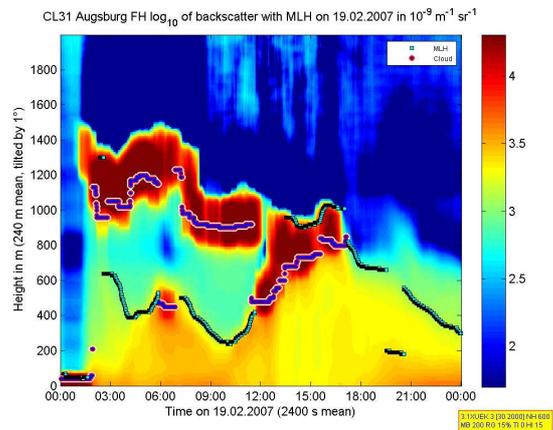


Abbildung A.4: 19.2.2007

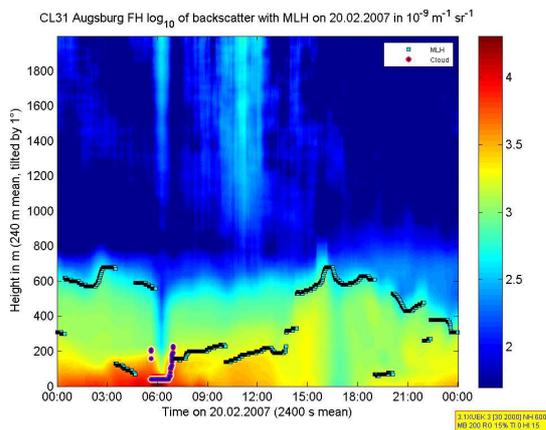


Abbildung A.5: 20.2.2007

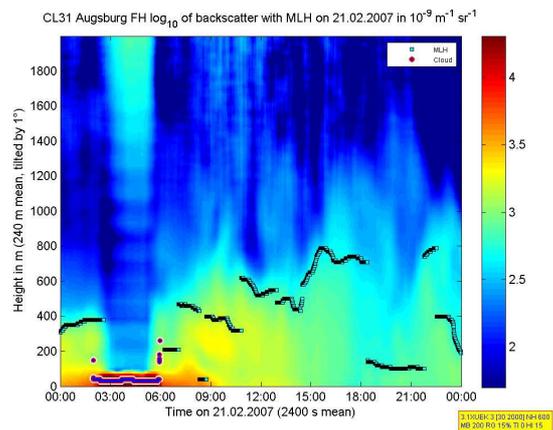


Abbildung A.6: 21.2.2007

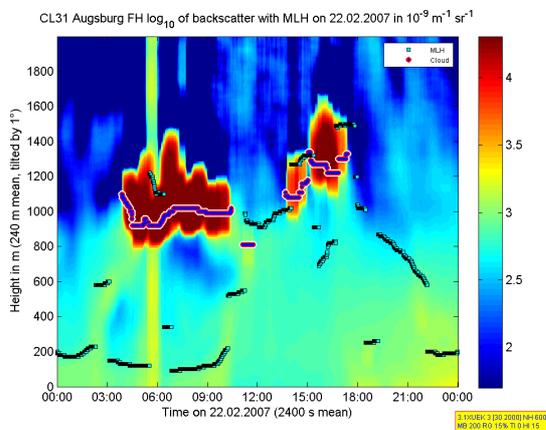


Abbildung A.7: 22.2.2007

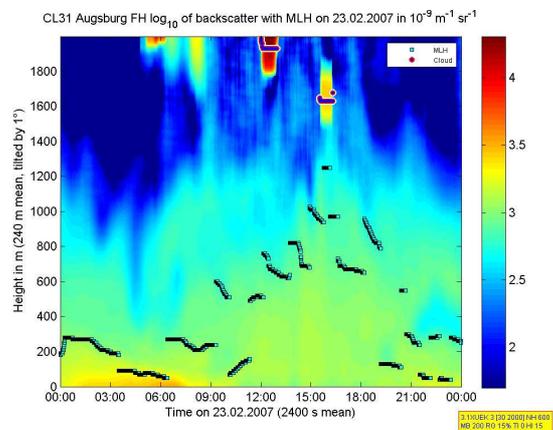


Abbildung A.8: 23.2.2007

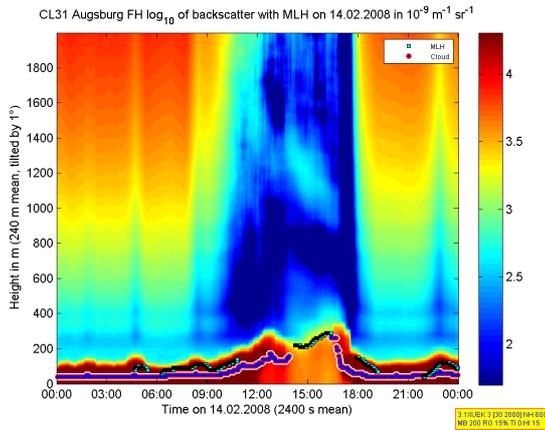


Abbildung A.9: 14.2.2008

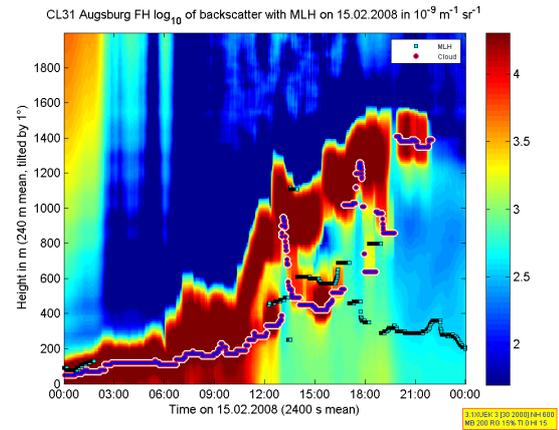


Abbildung A.10: 15.2.2008

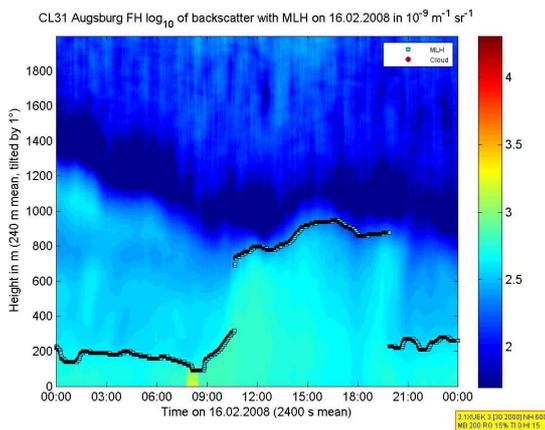


Abbildung A.11: 16.2.2008

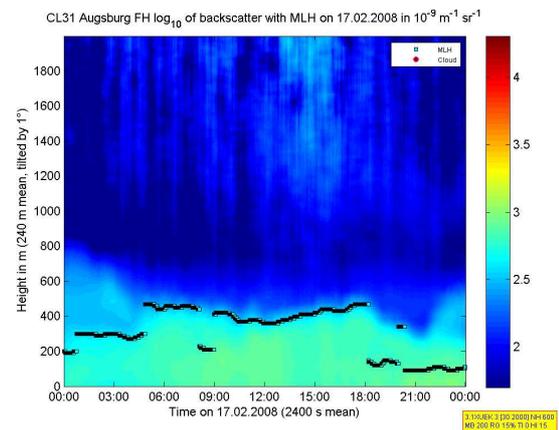


Abbildung A.12: 17.2.2008

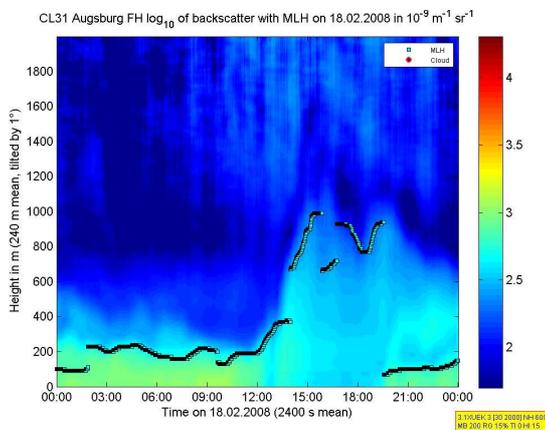


Abbildung A.13: 18.2.2008

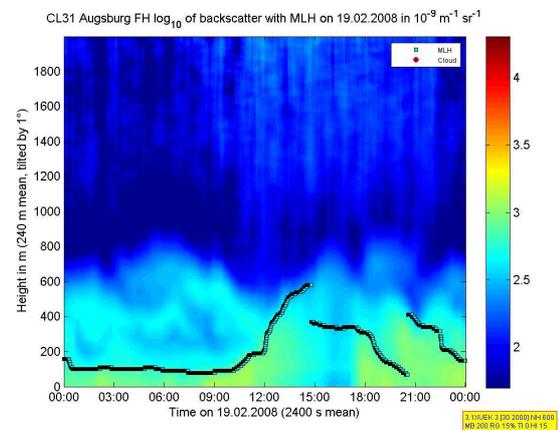


Abbildung A.14: 19.2.2008

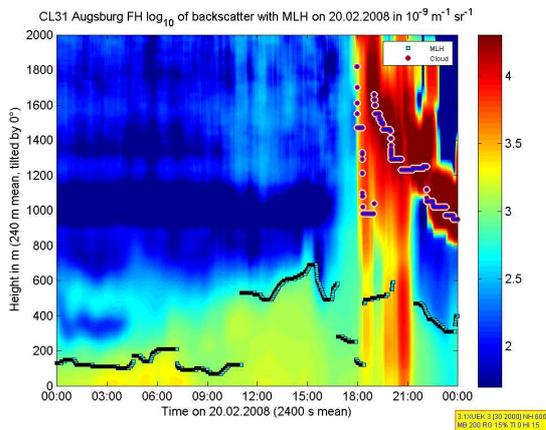


Abbildung A.15: 20.2.2008

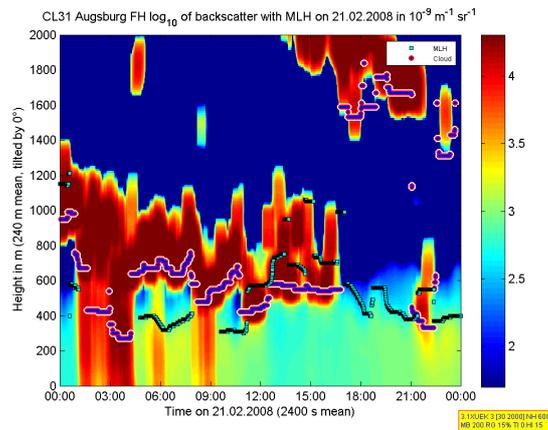


Abbildung A.16: 21.2.2008

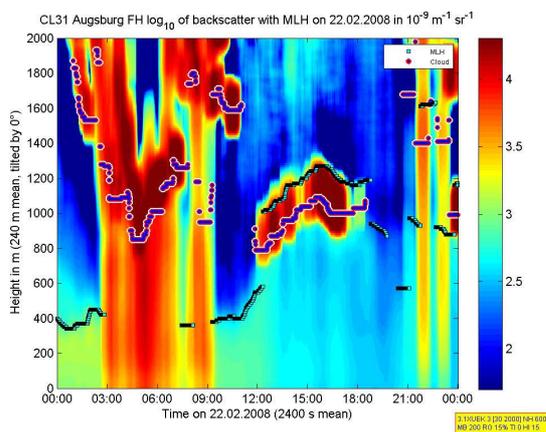


Abbildung A.17: 22.2.2008

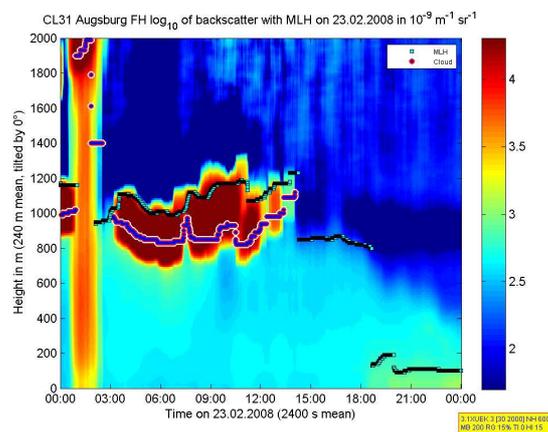


Abbildung A.18: 23.2.2008

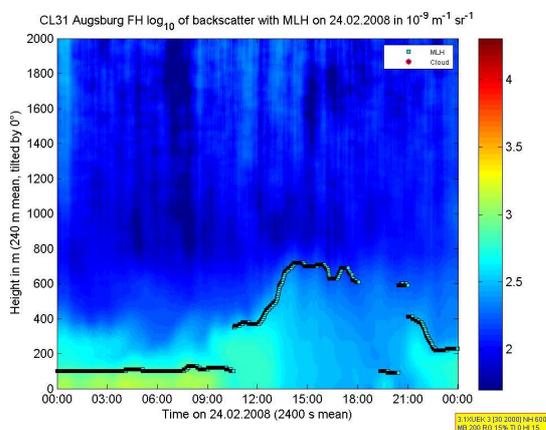


Abbildung A.19: 24.2.2008

Anhang B

Analyse der Wetterlagen 2007

Die folgenden Karten stammen aus den Analysen des Ertel-Programms von der Universität Innsbruck. Alle Karten zeigen den Europaausschnitt in 850 hPa Höhe. Die linken Abbildungen zeigen die äquivalentpotentielle Temperatur und die geopotentielle Höhe, die rechten Abbildungen zeigen die geopotentielle Höhe und die Temperatur. Es steht zu jedem Beobachtungstag eine Analysekarte um Mitternacht zur Verfügung.

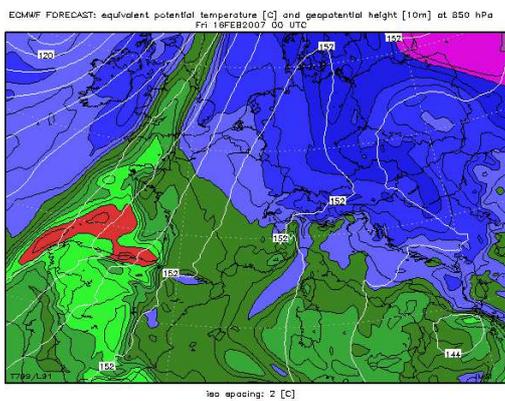


Abbildung B.1: 16.2.2007

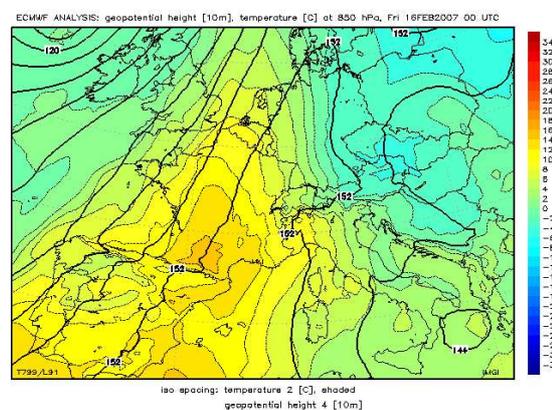


Abbildung B.2: 16.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa Sat 17FEB2007 00 UTC

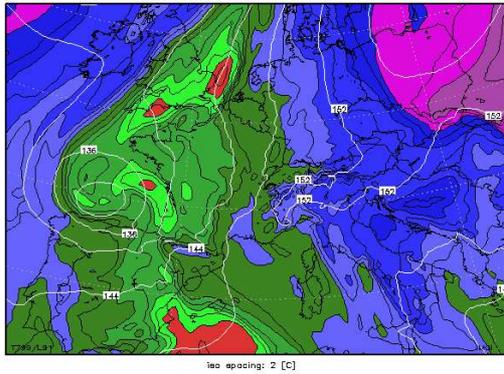


Abbildung B.3: 17.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Sat 17FEB2007 00 UTC

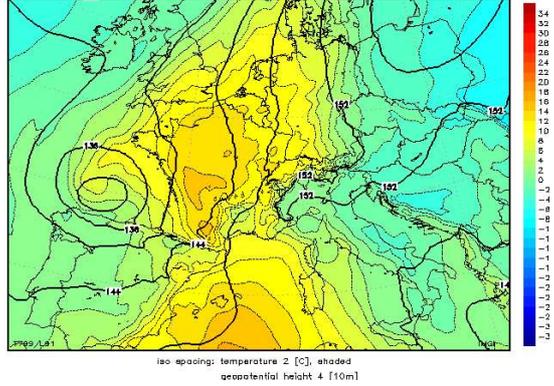


Abbildung B.4: 17.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa Sun 18FEB2007 00 UTC

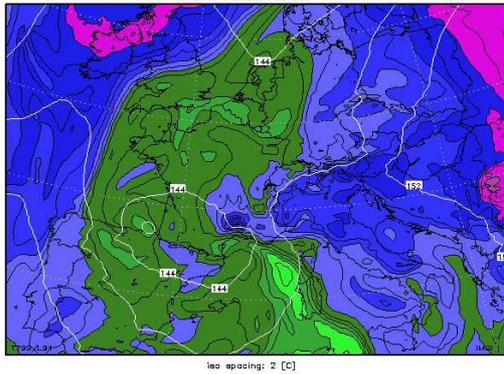


Abbildung B.5: 18.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Sun 18FEB2007 00 UTC

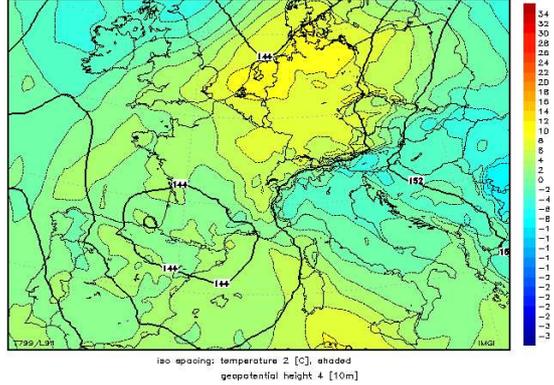


Abbildung B.6: 18.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa Mon 19FEB2007 00 UTC

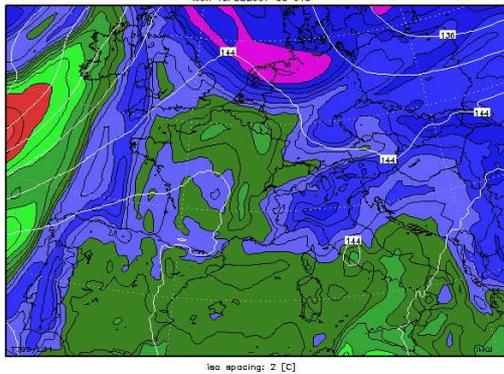


Abbildung B.7: 19.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Mon 19FEB2007 00 UTC

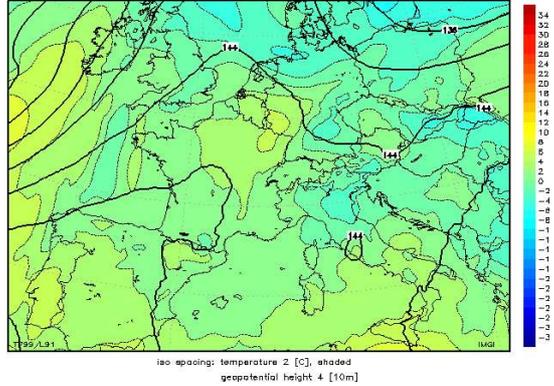


Abbildung B.8: 19.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa
Tue 20FEB2007 00 UTC

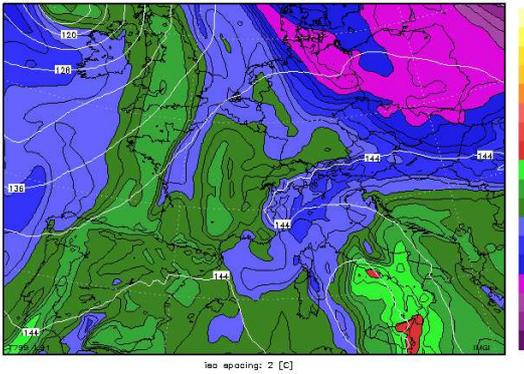


Abbildung B.9: 20.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Tue 20FEB2007 00 UTC

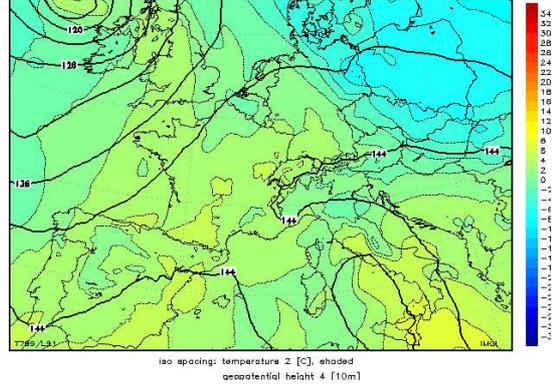


Abbildung B.10: 20.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa
Wed 21FEB2007 00 UTC

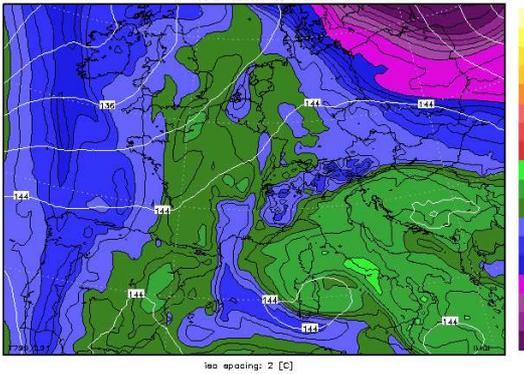


Abbildung B.11: 21.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Wed 21FEB2007 00 UTC

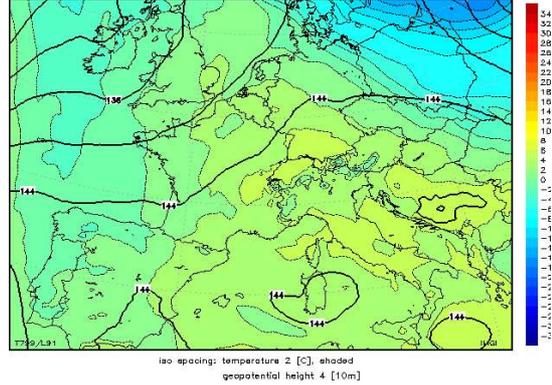


Abbildung B.12: 21.2.2007

ECMWF FORECAST: equivalent potential temperature [C] and geopotential height [10m] at 850 hPa
Thu 22FEB2007 00 UTC

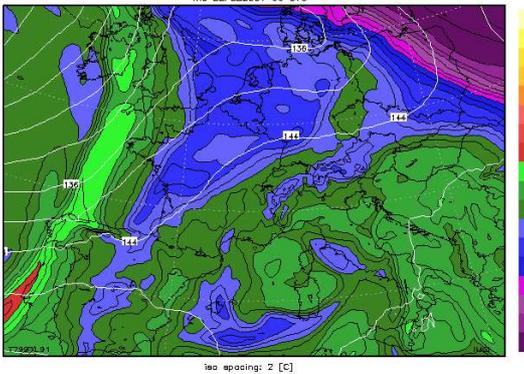


Abbildung B.13: 22.2.2007

ECMWF ANALYSIS: geopotential height [10m], temperature [C] at 850 hPa, Thu 22FEB2007 00 UTC

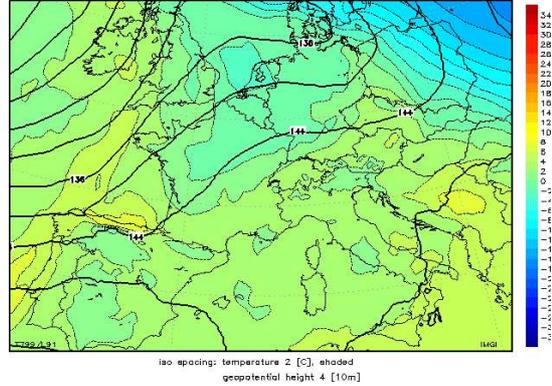


Abbildung B.14: 22.2.2007

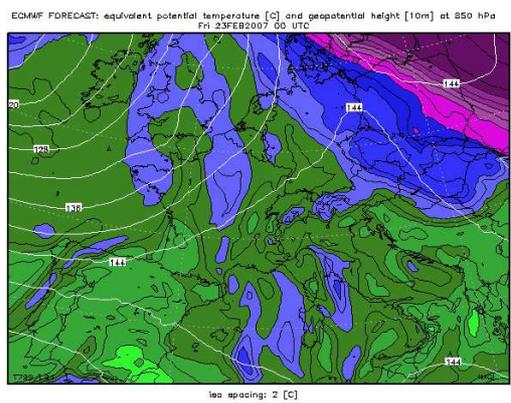


Abbildung B.15: 23.2.2007

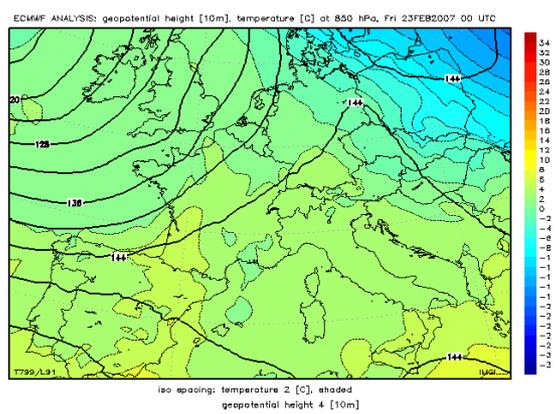


Abbildung B.16: 23.2.2007

Anhang C

Analyse der Wetterlagen 2008

Die folgenden Karten stammen aus den Analysen des Ertel-Programms von der Universität Innsbruck. Alle Karten zeigen den Europaausschnitt in 850 hPa Höhe. Die linken Abbildungen zeigen die äquivalentpotentielle Temperatur und die geopotentielle Höhe, die rechten Abbildungen zeigen die geopotentielle Höhe und die Temperatur. Es steht zu jedem Beobachtungstag eine Analysekarte um Mitternacht zur Verfügung.

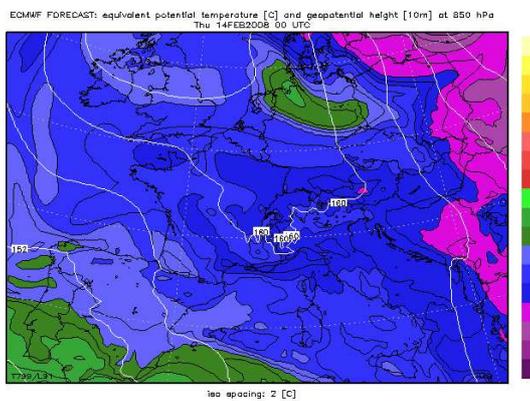


Abbildung C.1: 14.2.2008

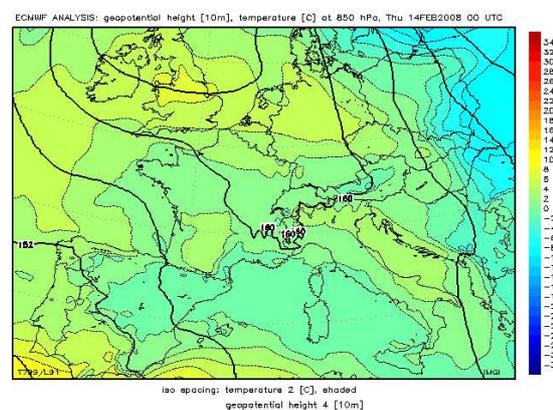


Abbildung C.2: 14.2.2008

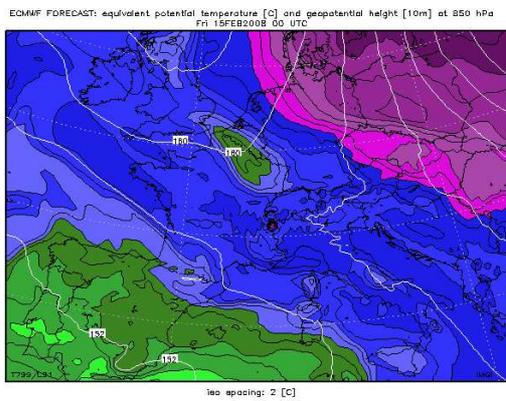


Abbildung C.3: 15.2.2008

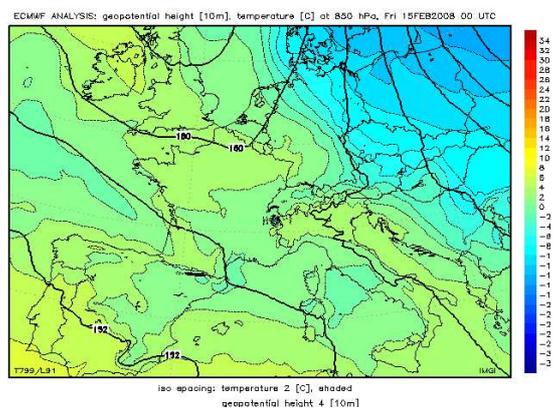


Abbildung C.4: 15.2.2008

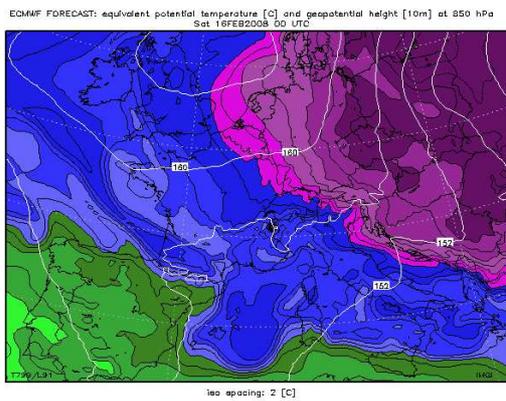


Abbildung C.5: 16.2.2008

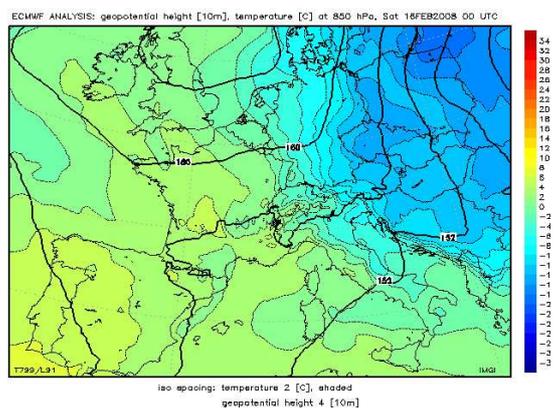


Abbildung C.6: 16.2.2008

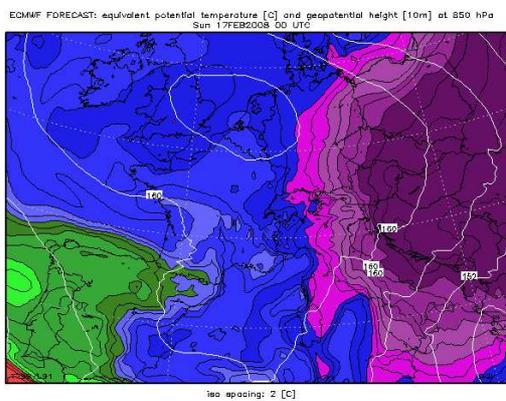


Abbildung C.7: 17.2.2008

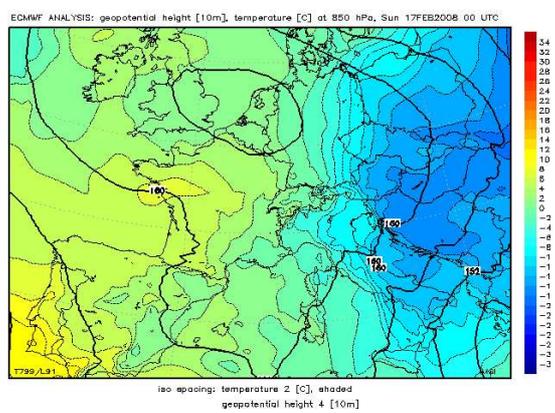


Abbildung C.8: 17.2.2008

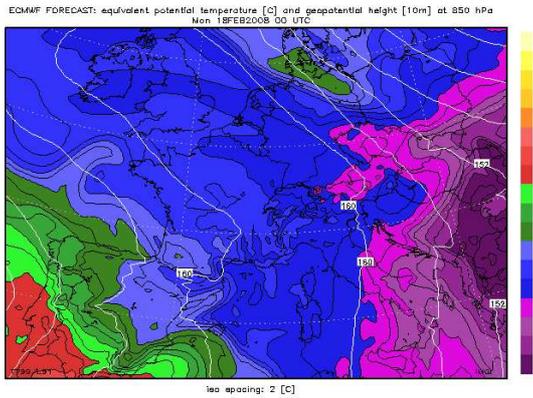


Abbildung C.9: 18.2.2008

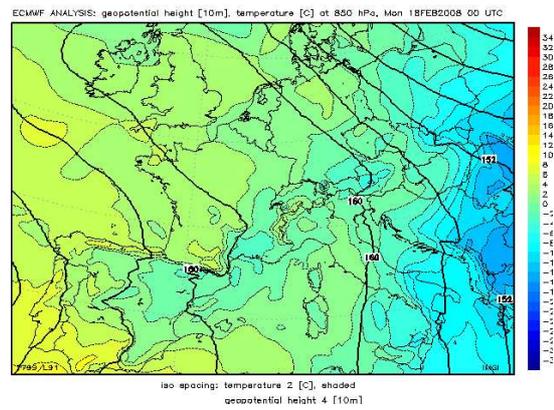


Abbildung C.10: 18.2.2008

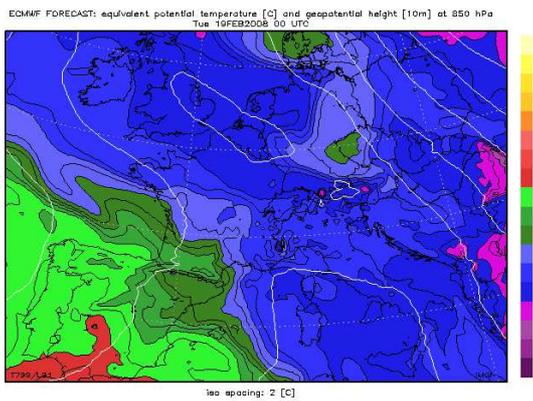


Abbildung C.11: 19.2.2008

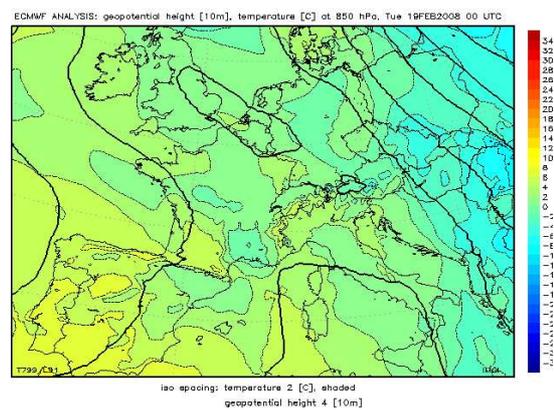


Abbildung C.12: 19.2.2008

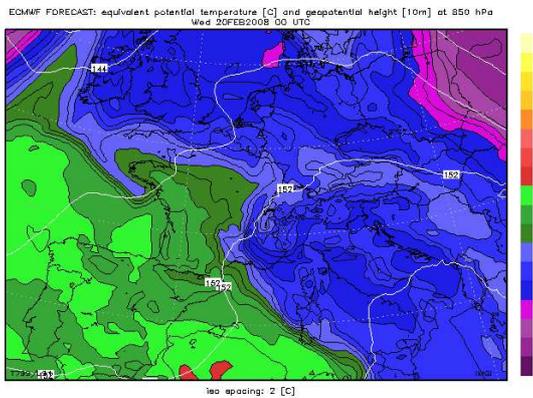


Abbildung C.13: 20.2.2008

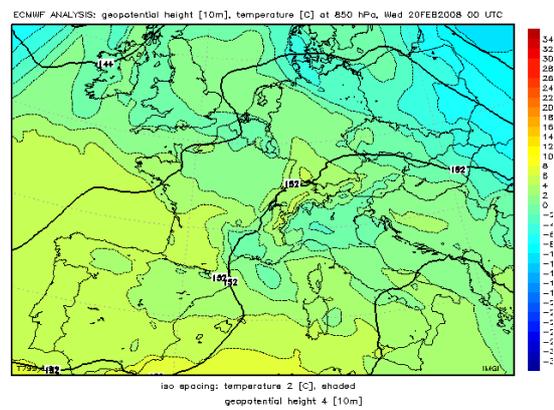


Abbildung C.14: 20.2.2008

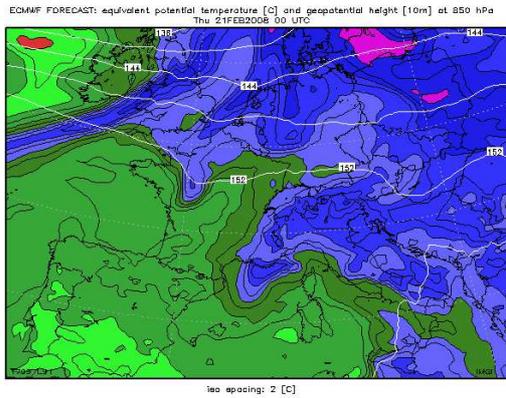


Abbildung C.15: 21.2.2008

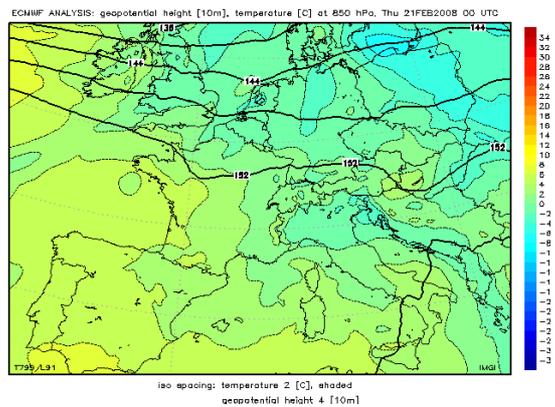


Abbildung C.16: 21.2.2008

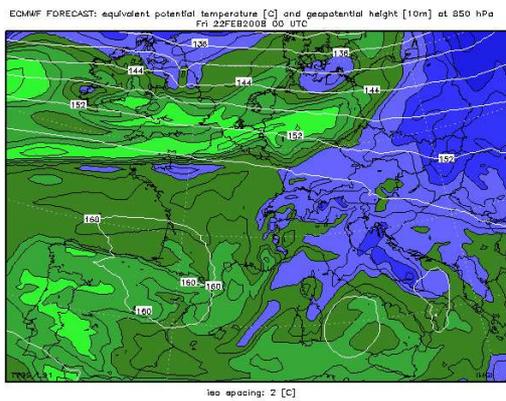


Abbildung C.17: 22.2.2008

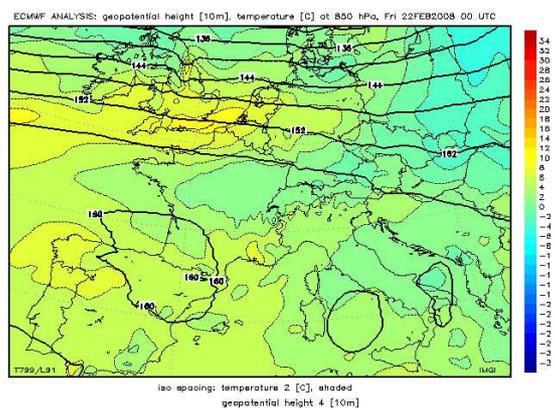


Abbildung C.18: 22.2.2008

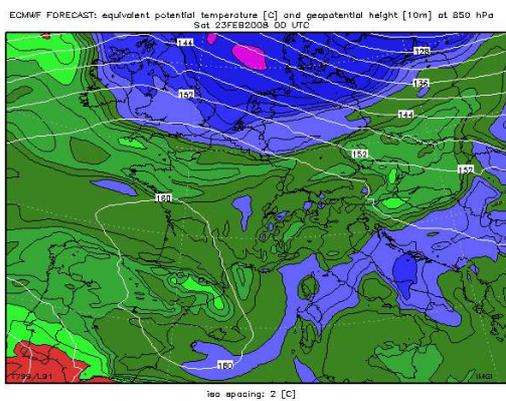


Abbildung C.19: 23.2.2008

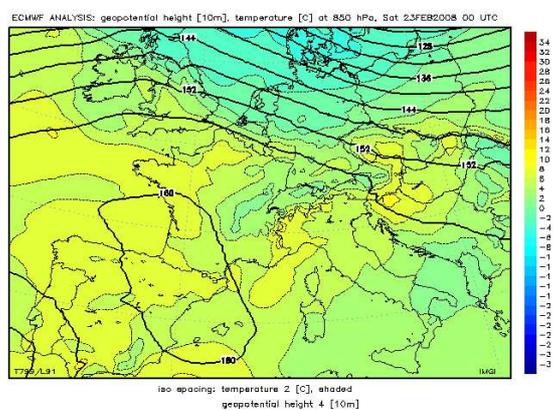


Abbildung C.20: 23.2.2008

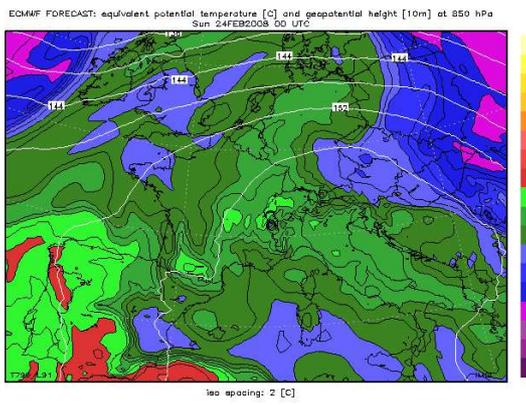


Abbildung C.21: 24.2.2008

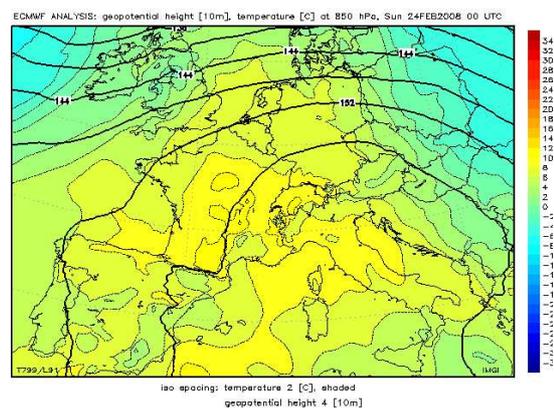


Abbildung C.22: 24.2.2008

Anhang D

Mischungsschicht und Radiosondenaufstiege 2007

Abschnitt 6.3 basiert auf den Abbildungen in diesem Anhang.

Im Plot links oben ist der Tagesgang der Mischungsschicht abgebildet, wie ihn das Ceilometer sieht. MHL bis MLH-4 sind die Minima der Volumenrückstreugradienten (siehe:3.3.2), wobei die Mischungsschicht unter MLH zu finden ist. MLH-2 bis MLH-4 zeigen höher gelegene Minima von $d\beta/dx$. Mit "Wolke" wird die Untergrenze vorhandener Bewölkung angezeigt.

Die durchgezogene Linie im rechten oberen Bild gibt die Temperatur wieder, die unterbrochene Linie die relative Feuchte.

Im Bild links unten ist gestrichelt das Mischungsverhältnis aufgetragen. Die durchgezogene Linie markiert den Verlauf der virtuellpotentiellen Temperatur. Sie wird hier der potentiellen Temperatur vorgezogen, da in der VPT die in der Luft enthaltene Feuchte über den virtuellen Temperaturzuschlag miteinbezogen wird. So kann die VPT bei unterschiedlicher Luftfeuchte wie Θ bei trockener Luft für Stabilitätsanalysen verwendet werden (siehe Abschnitt: 2.1.2).

Der Plot unten rechts zeigt Windgeschwindigkeit (unterbrochene Linie) und Windrichtung (durchgezogene Linie).

Blau sind die Nachtaufstiege (0:00UTC), rot die Mittagsaufstiege (12:00UTC) der Radiosonde abgebildet. Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie zu diesen beiden Zeitpunkten vom Ceilometer detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über die gemittelt wird.

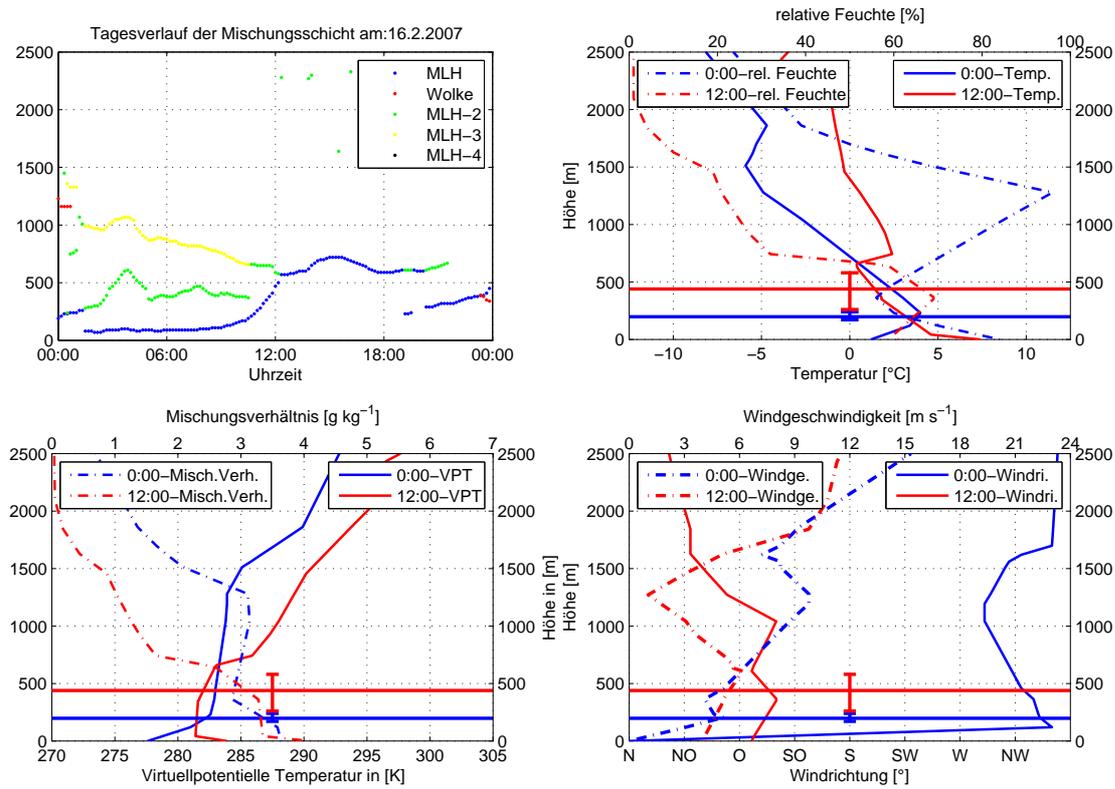


Abbildung D.1: 16.2.2007

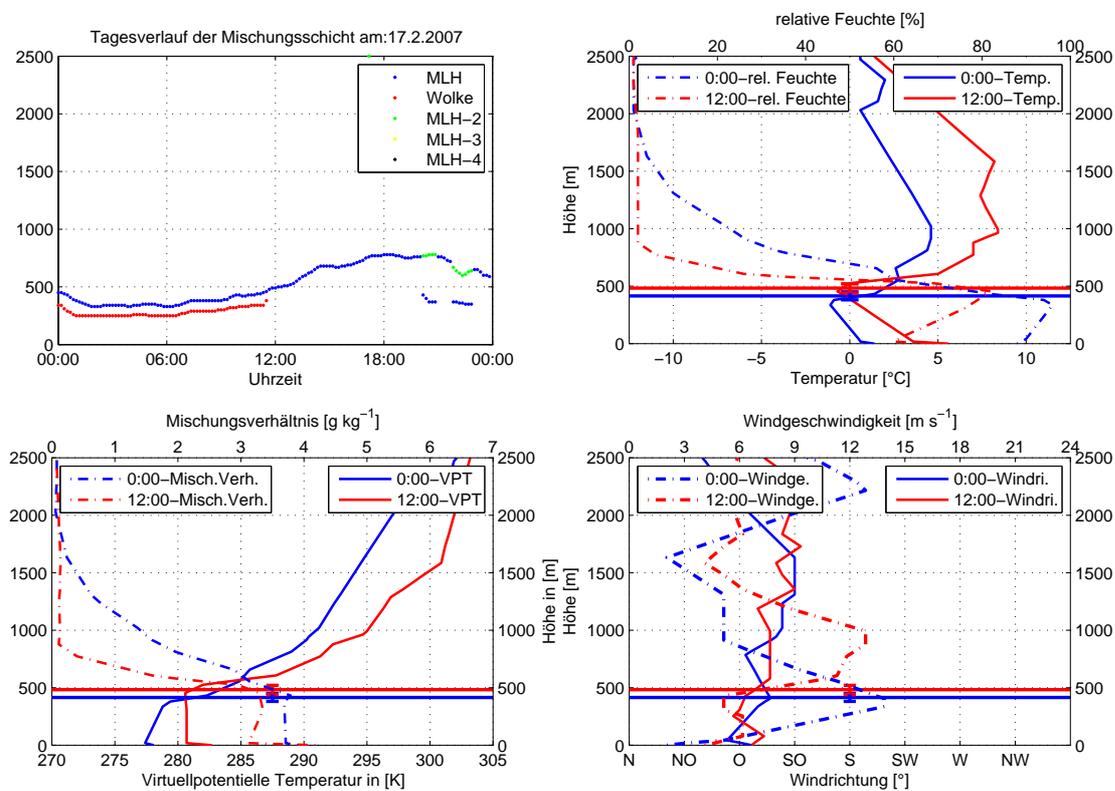


Abbildung D.2: 17.2.2007

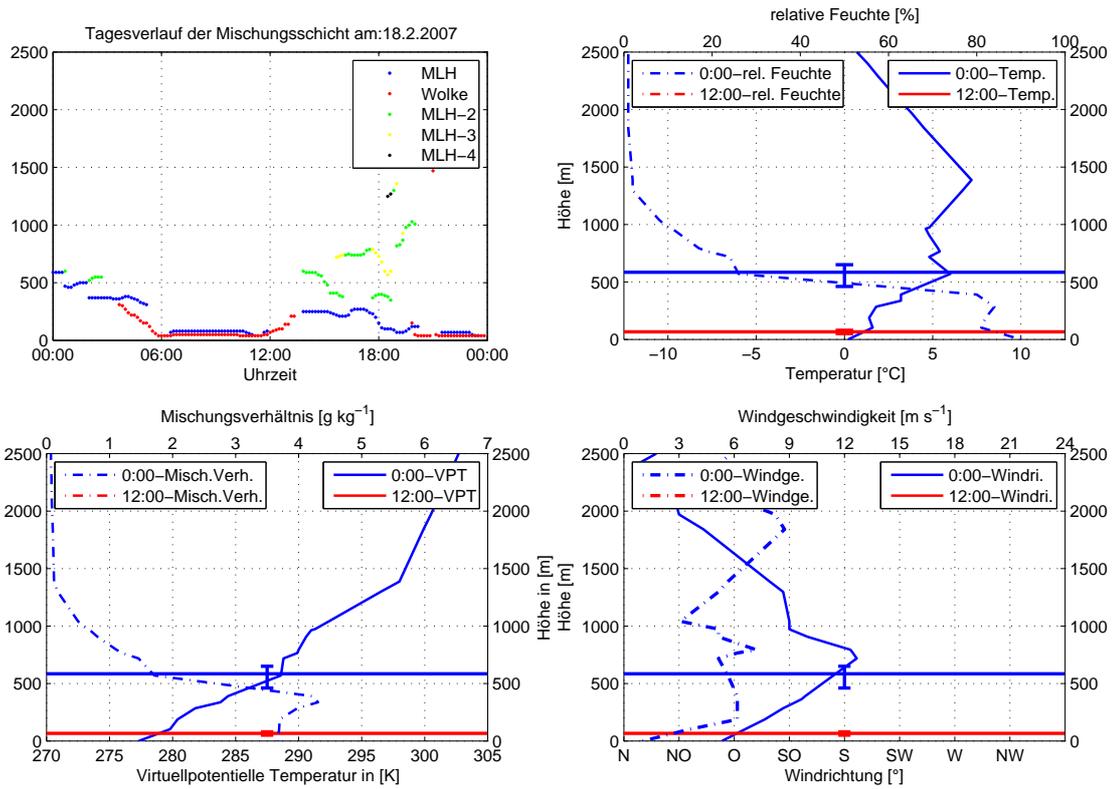


Abbildung D.3: 18.2.2007

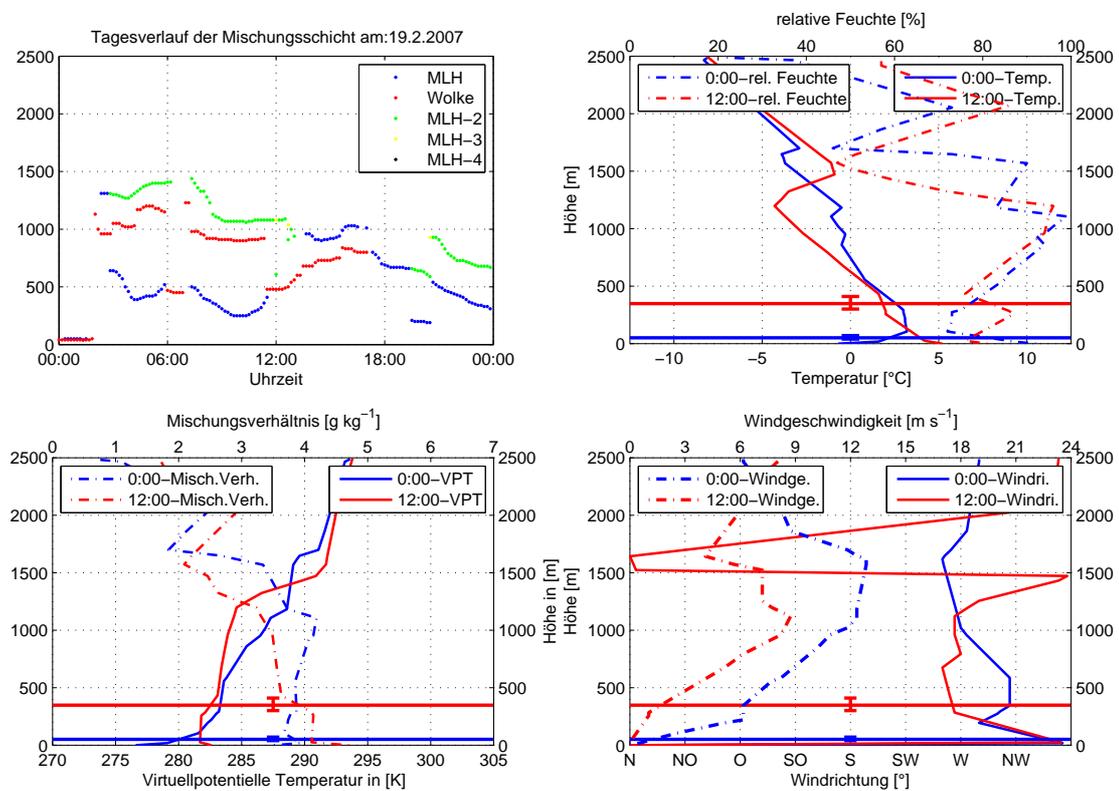


Abbildung D.4: 19.2.2007

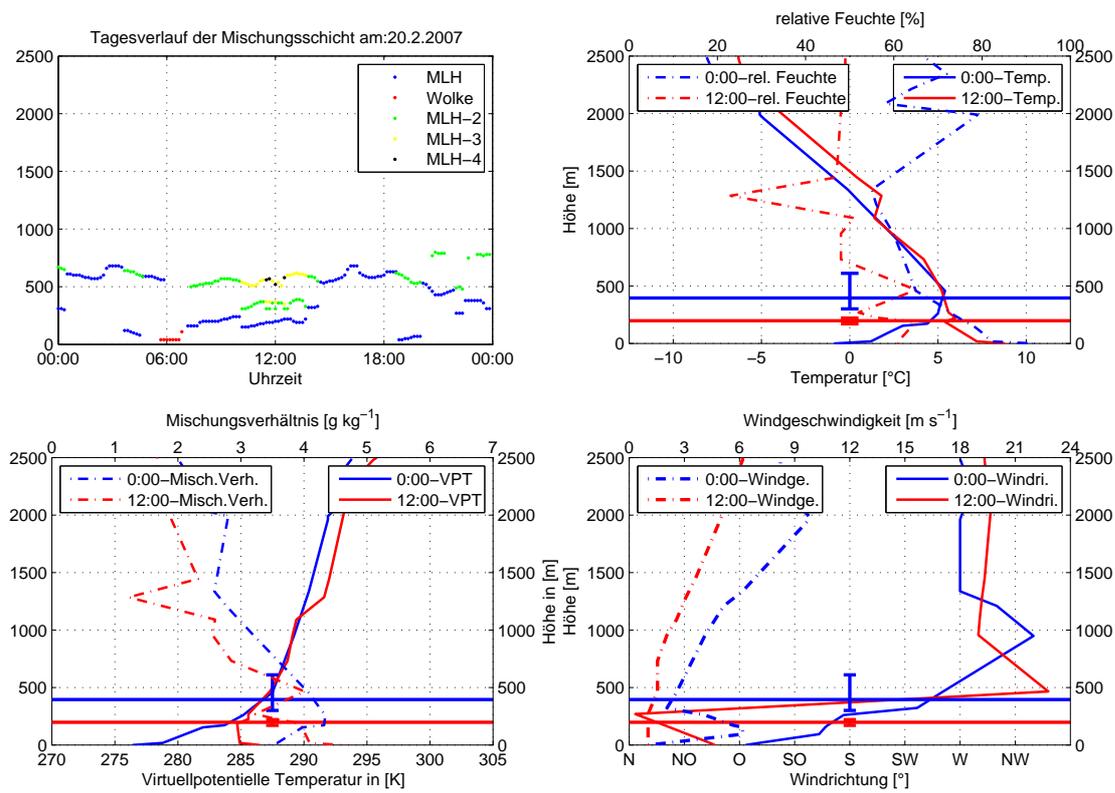


Abbildung D.5: 20.2.2007

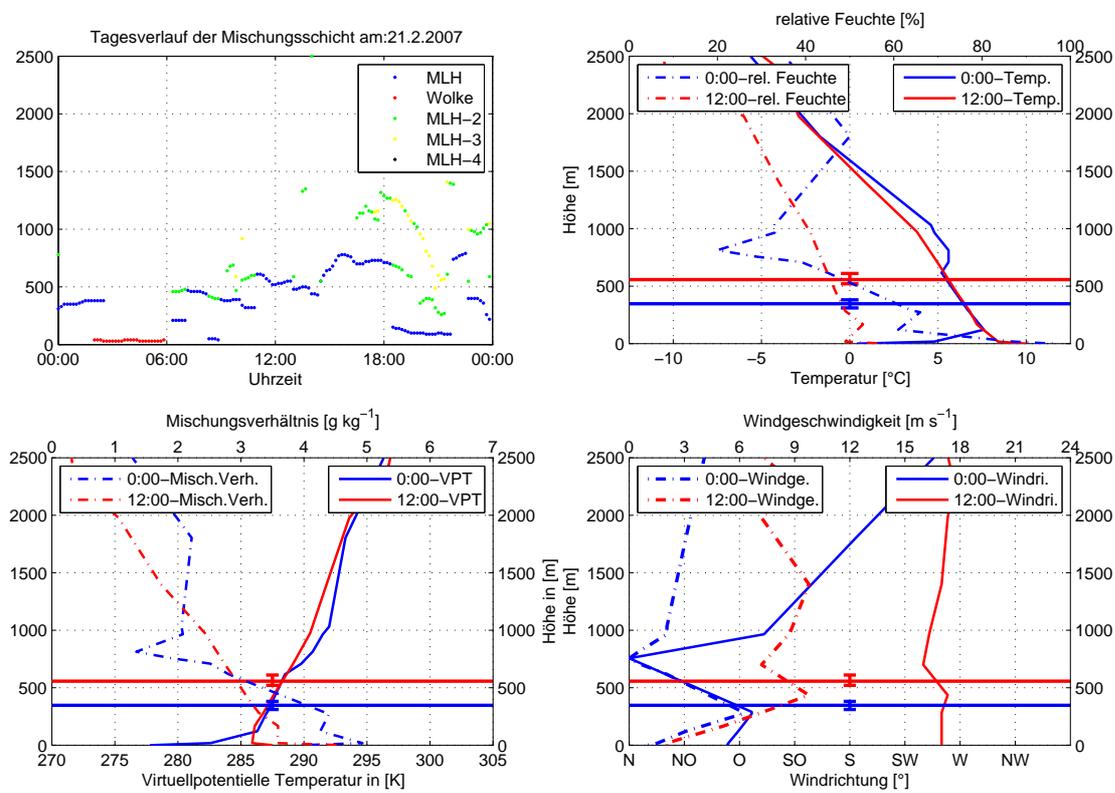


Abbildung D.6: 21.2.2007

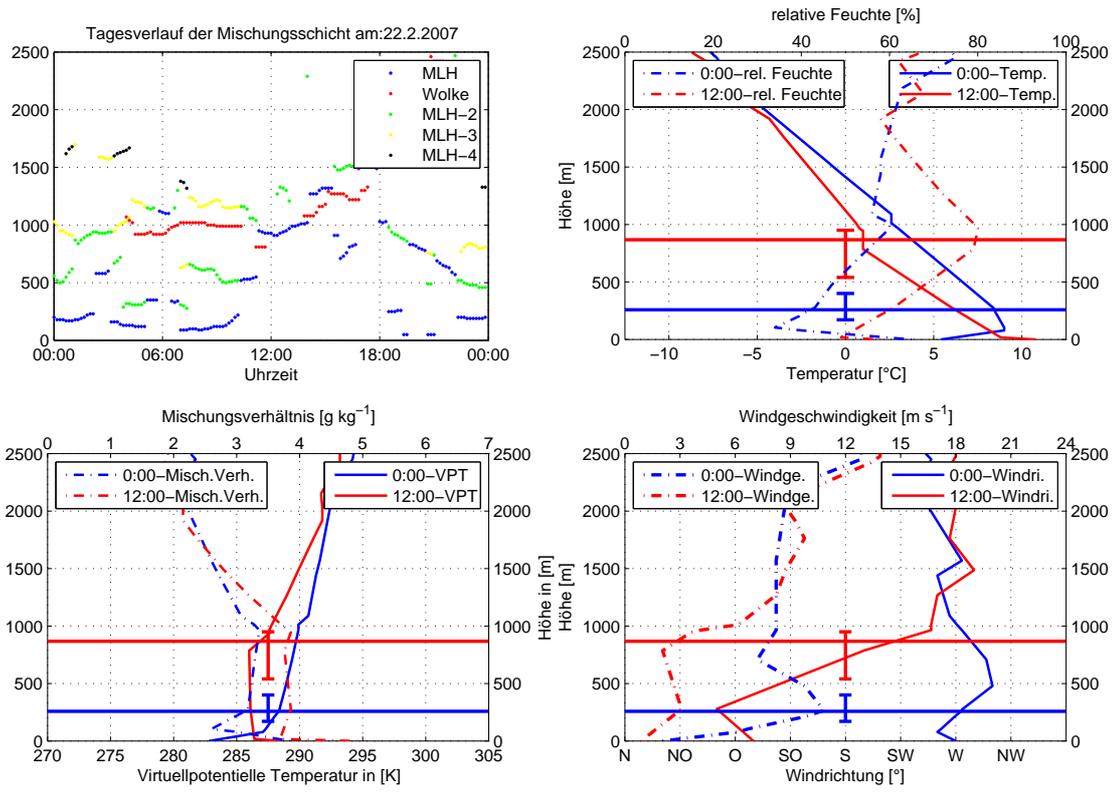


Abbildung D.7: 22.2.2007

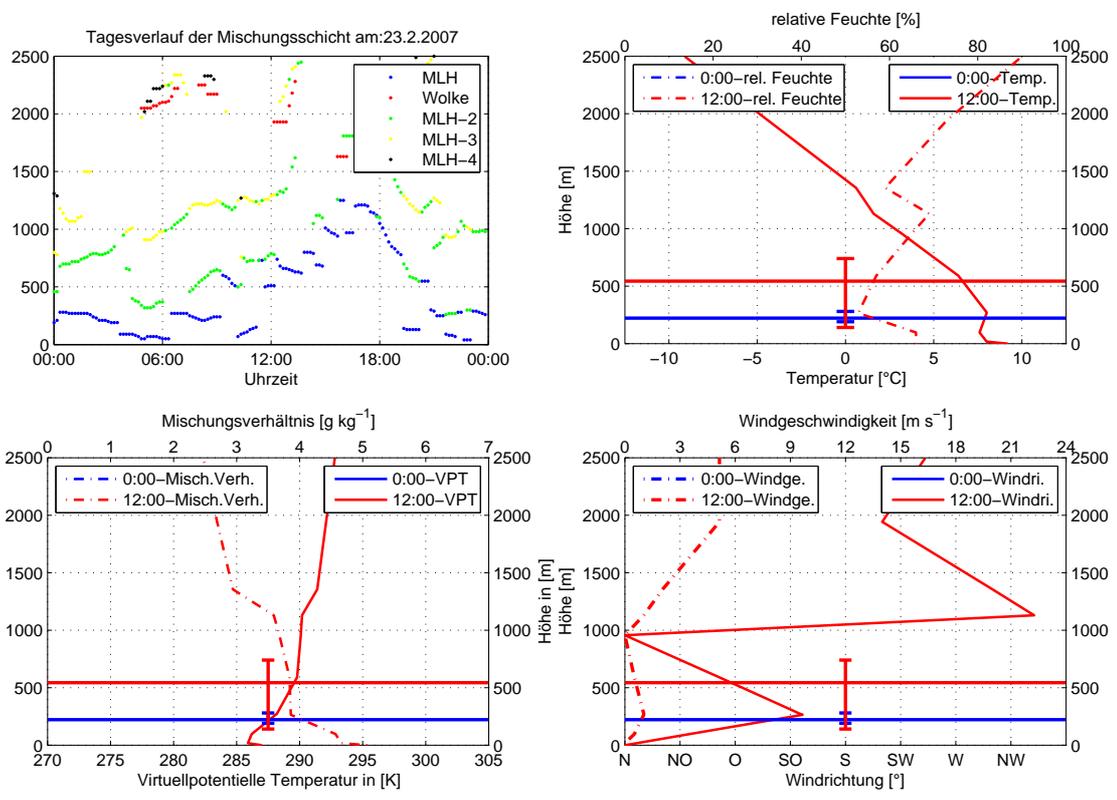


Abbildung D.8: 23.2.2007

Anhang E

Mischungsschicht und Radiosondenaufstiege 2008

Abschnitt 6.3 basiert auf den Abbildungen in diesem Anhang.

Im Plot links oben ist der Tagesgang der Mischungsschicht abgebildet, wie ihn das Ceilometer sieht. MHL bis MLH-4 sind die Minima der Volumenrückstreugradienten (siehe:3.3.2), wobei die Mischungsschicht unter MLH zu finden ist. MLH-2 bis MLH-4 zeigen höher gelegene Minima von $d\beta/dx$. Mit "Wolke" wird die Untergrenze vorhandener Bewölkung angezeigt.

Die durchgezogene Linie im rechten oberen Bild gibt die Temperatur wieder, die unterbrochene Linie die relative Feuchte.

Im Bild links unten ist gestrichelt das Mischungsverhältnis aufgetragen. Die durchgezogene Linie markiert den Verlauf der virtuellpotentiellen Temperatur. Sie wird hier der potentiellen Temperatur vorgezogen, da in der VPT die in der Luft enthaltene Feuchte über den virtuellen Temperaturzuschlag miteinbezogen wird. So kann die VPT bei unterschiedlicher Luftfeuchte wie Θ bei trockener Luft für Stabilitätsanalysen verwendet werden (siehe Abschnitt: 2.1.2).

Der Plot unten rechts zeigt Windgeschwindigkeit (unterbrochene Linie) und Windrichtung (durchgezogene Linie).

Blau sind die Nachtaufstiege (0:00UTC), rot die Mittagsaufstiege (12:00UTC) der Radiosonde abgebildet. Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie zu diesen beiden Zeitpunkten vom Ceilometer detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über die gemittelt wird.

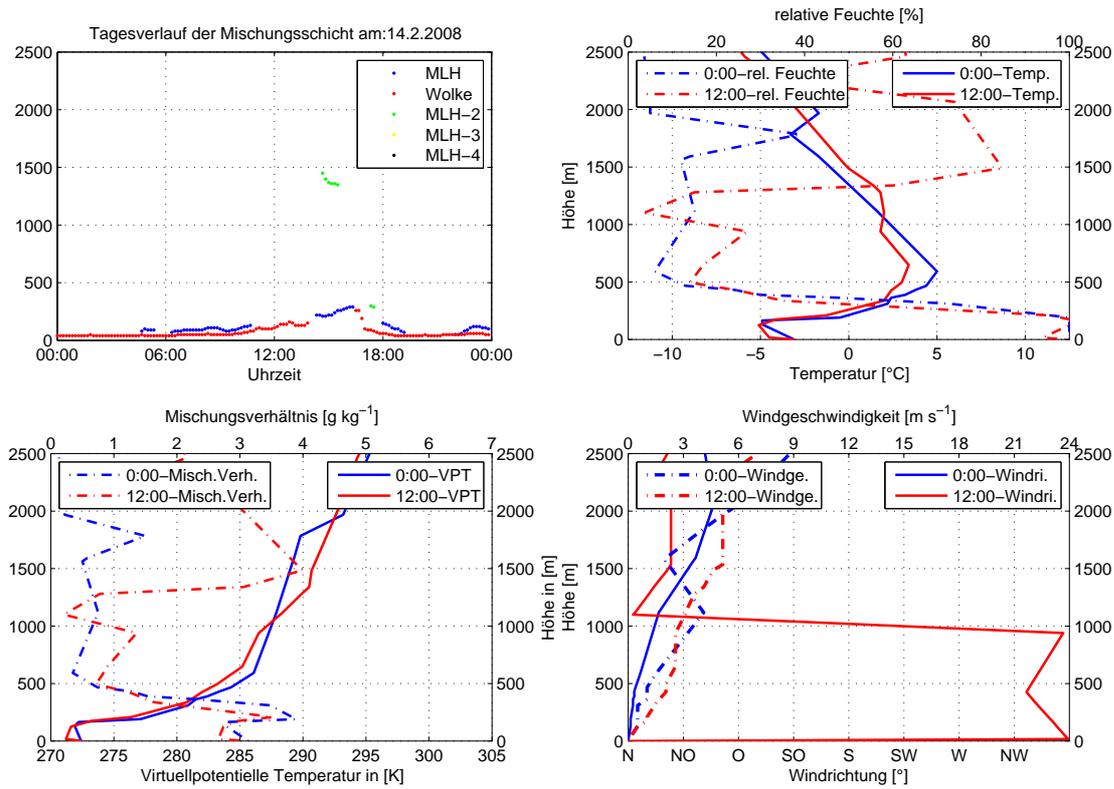


Abbildung E.1: 14.2.2008

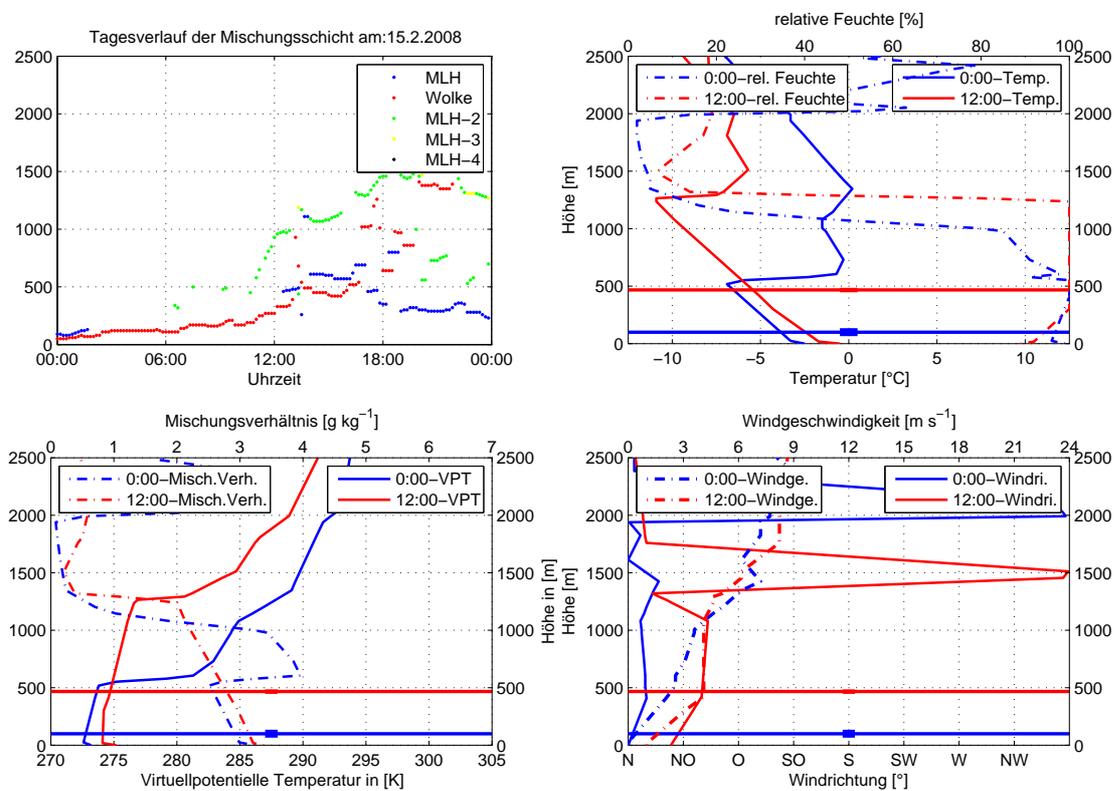


Abbildung E.2: 15.2.2008

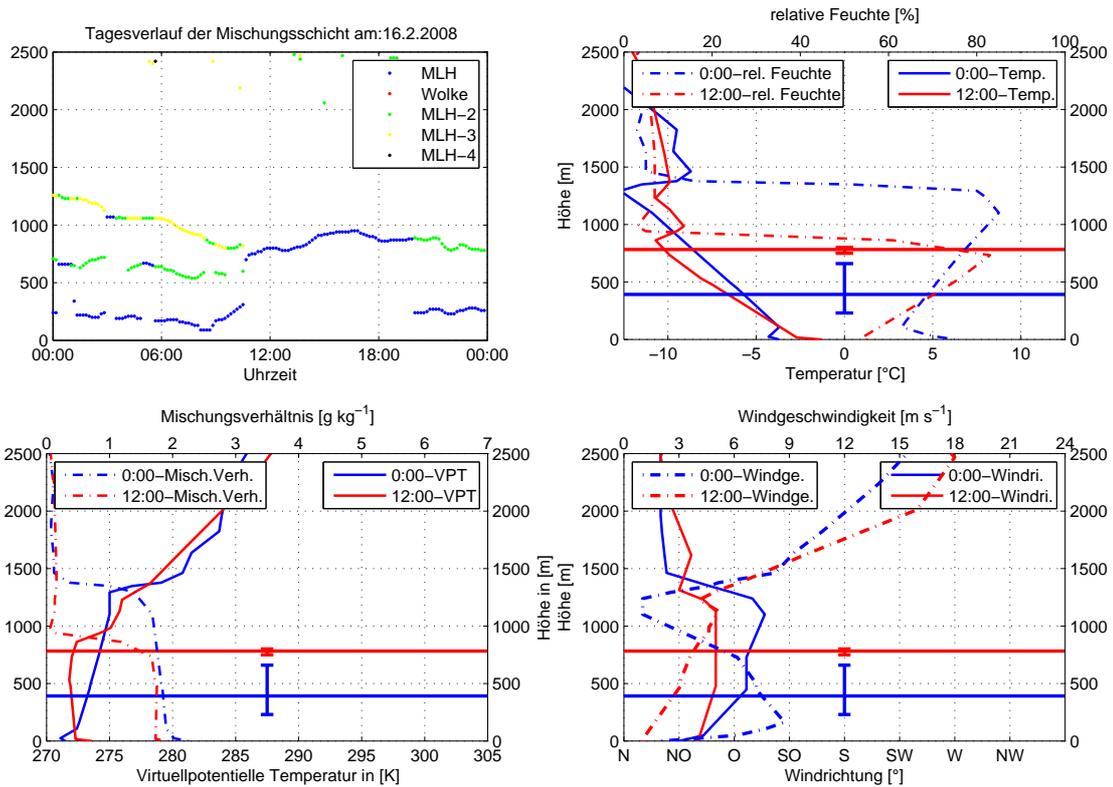


Abbildung E.3: 16.2.2008

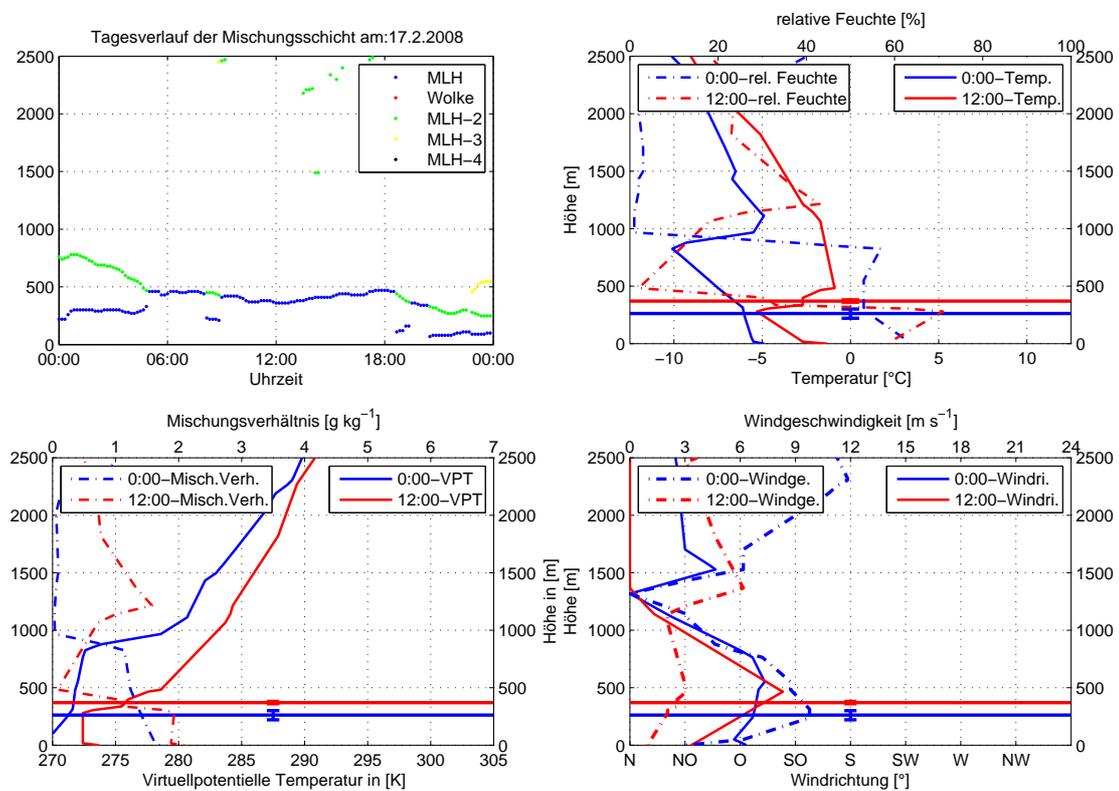


Abbildung E.4: 17.2.2008

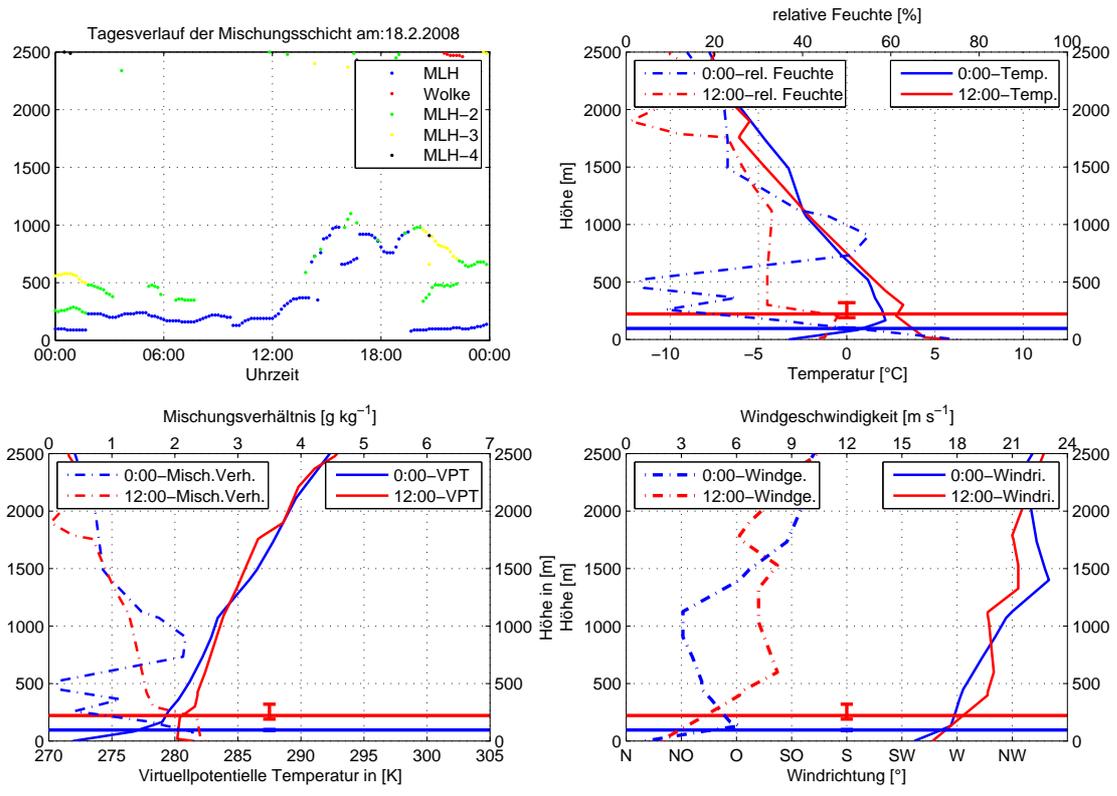


Abbildung E.5: 18.2.2008

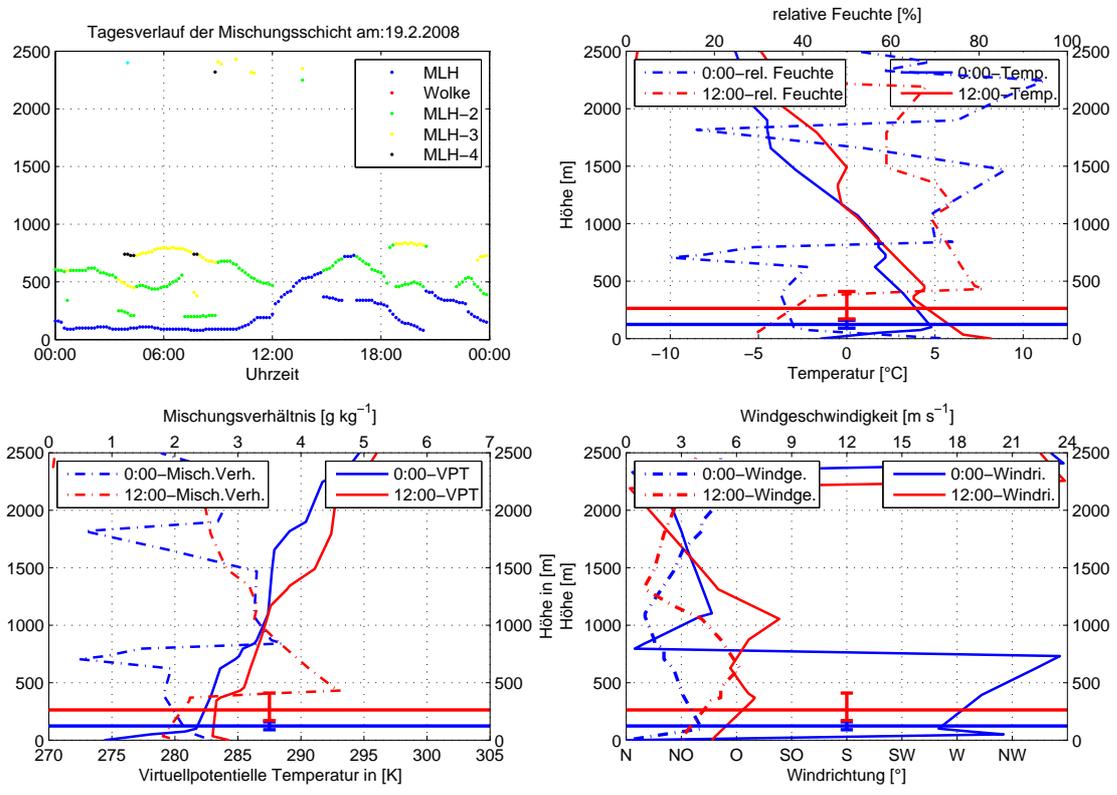


Abbildung E.6: 19.2.2008

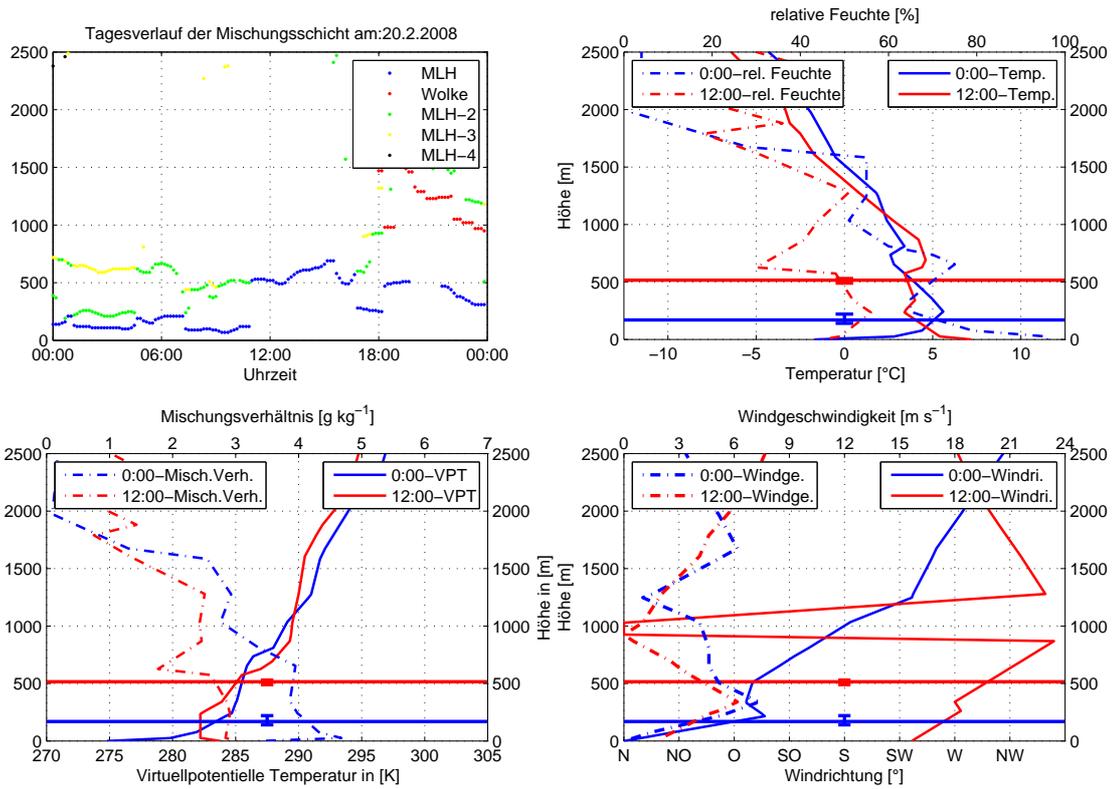


Abbildung E.7: 20.2.2008

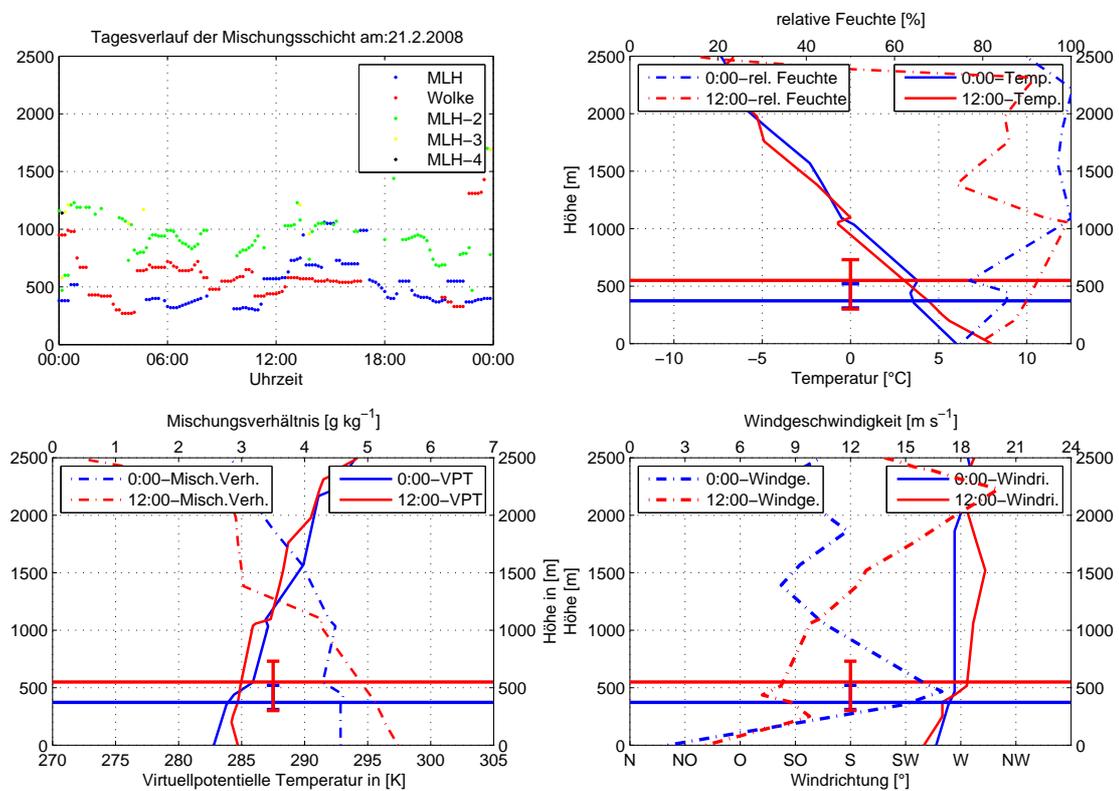


Abbildung E.8: 21.2.2008

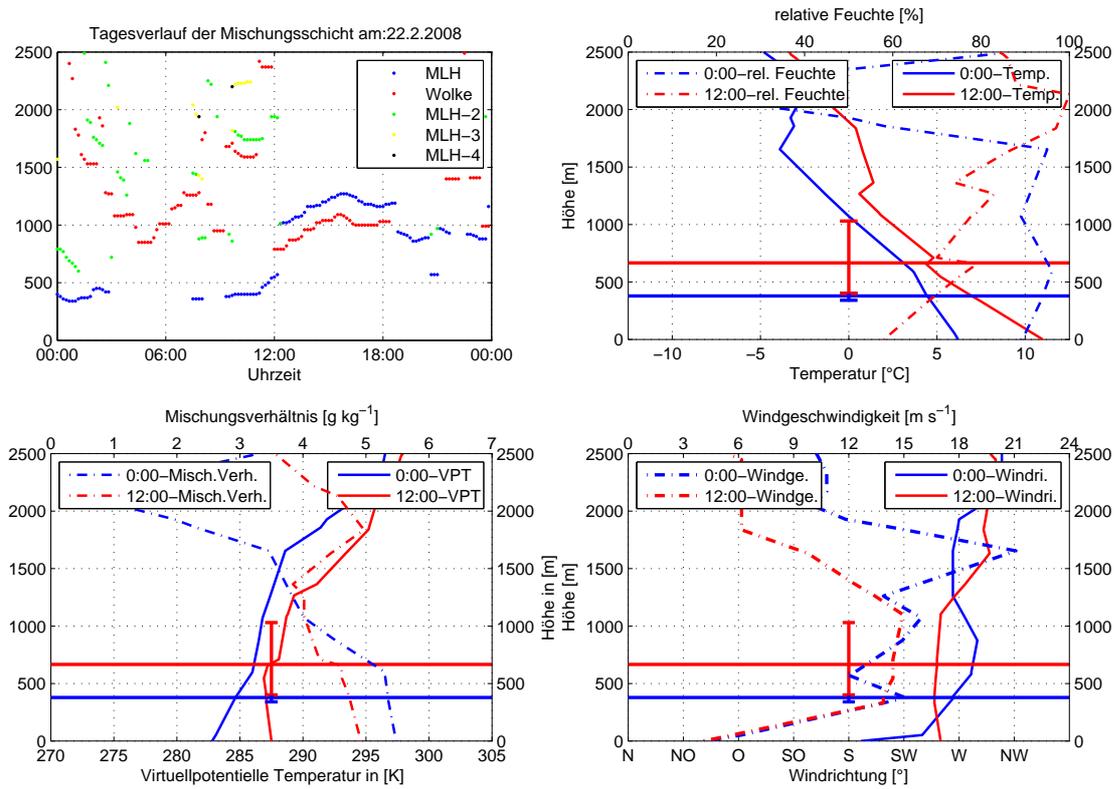


Abbildung E.9: 22.2.2008

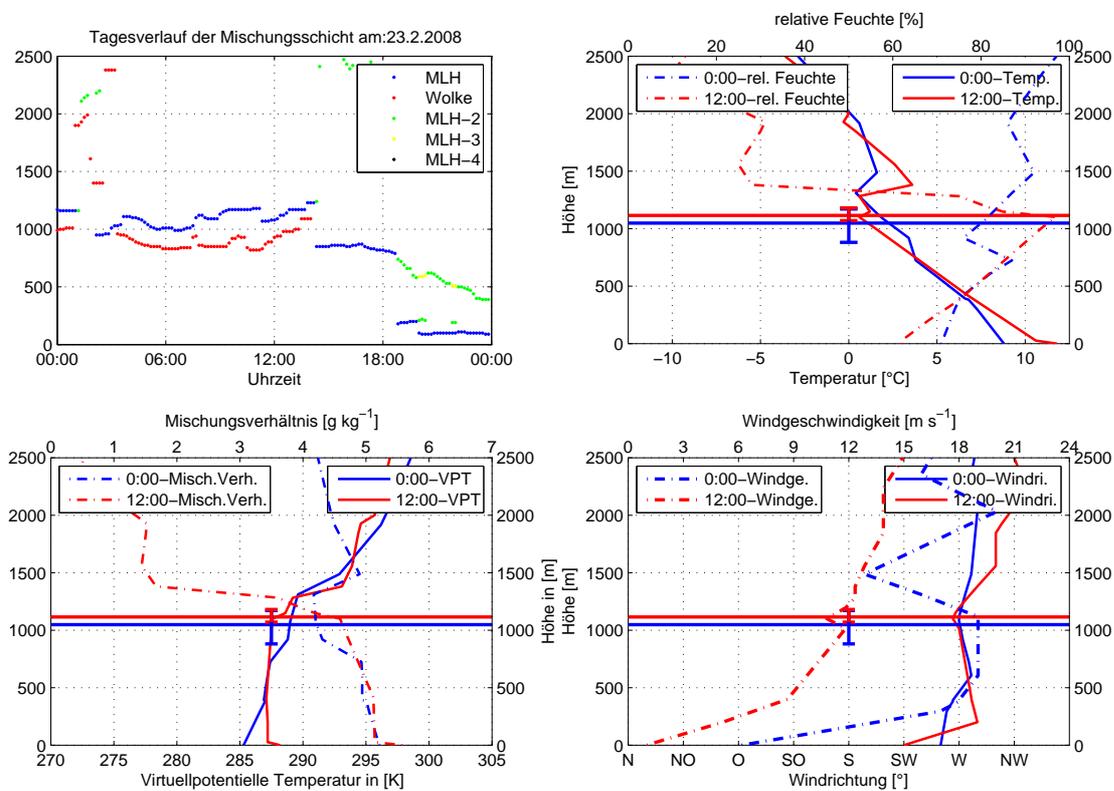


Abbildung E.10: 23.2.2008

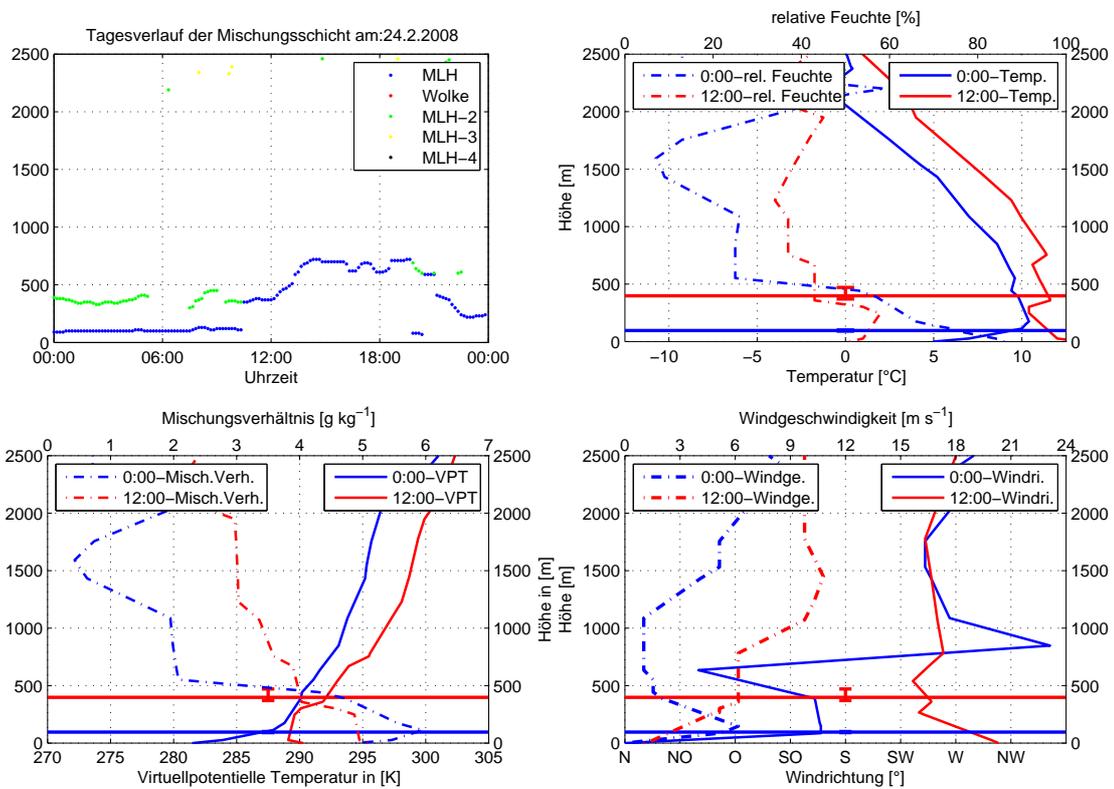


Abbildung E.11: 24.2.2008

Anhang F

Bestimmung der MLH aus Radiosondenaufstiegen 2007

Abschnitt 6.3 basiert auf den Abbildungen in diesem Anhang.

Ebenso liegen die folgenden Abbildungen den statistischen Auswertungen in Abschnitt 6.4 zugrunde.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Radiosondenaufstiege während der Messperiode 2007 mit jeweils einem anderen Kriterium zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe. Auf der Ordinate ist immer die Höhe eingetragen, auf der Abszisse das jeweilige Kriterium. Im Plot links oben ist die Richardsonzahl aufgetragen, die kritische Ri wird durch die vertikale grüne Linie markiert. Liegt die Richardsonzahl links der grünen Linie, ist die Schicht, für die Ri berechnet wird instabil, also durchmischt. Ri rechts der grünen Linie ist nach Baumann-Stanzer and Groehn (2004) stabil.

In der Abbildung rechts oben ist die Änderung der potentiellen Temperatur geplottet. Die vertikale grüne Linie markiert den Grenzwert von 5 K km^{-1} , der bei Heffter (1980) als Indikator für die Mischungsschichtgrenze angeführt wird. Zusätzlich ist der Verlauf der Temperatur geplottet, damit die Temperatur bei einem passenden Gradienten an Ober- und Untergrenze der Inversion überprüft werden kann (Heffter (1980)).

Im Bild links unten sind die Gradienten des Mischungsverhältnisses aufgetragen. Hier markiert die vertikale grüne Linie die kritische Abnahme des Mischungsverhältnis. Sobald die Abnahme des Mischungsverhältnis $0,01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ist, gilt diese Schicht nach Baumann-Stanzer and Groehn (2004) gemäß ihres Feuchterückgangs als Mischungsschicht.

Der Plot unten rechts zeigt die relative Feuchte. Hier gilt lediglich der stärkste Gradient (Hennemuth and Lammert (2006)).

Die Mitternachtswerte sind in blau und die Mittagswerte in rot aufgetragen. Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie vom Ceilometer zu den beiden Zeitpunkten detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über den gemittelt wird.

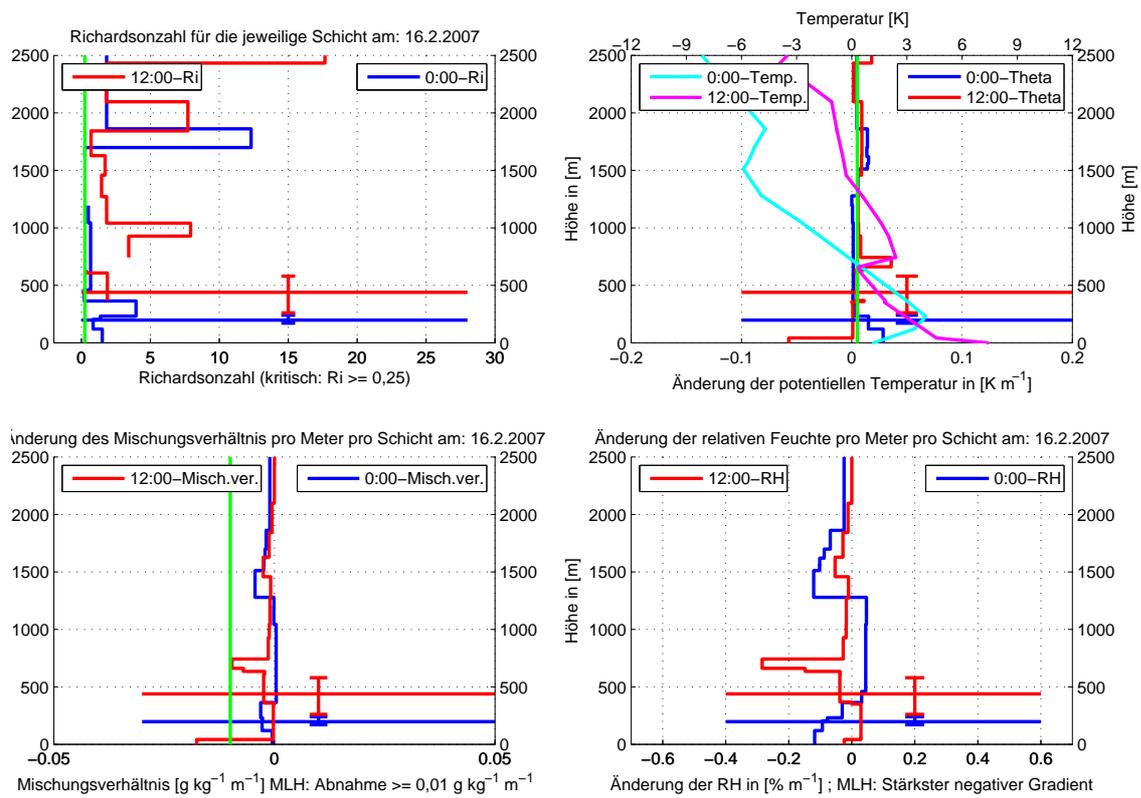


Abbildung F.1: 16.2.2007

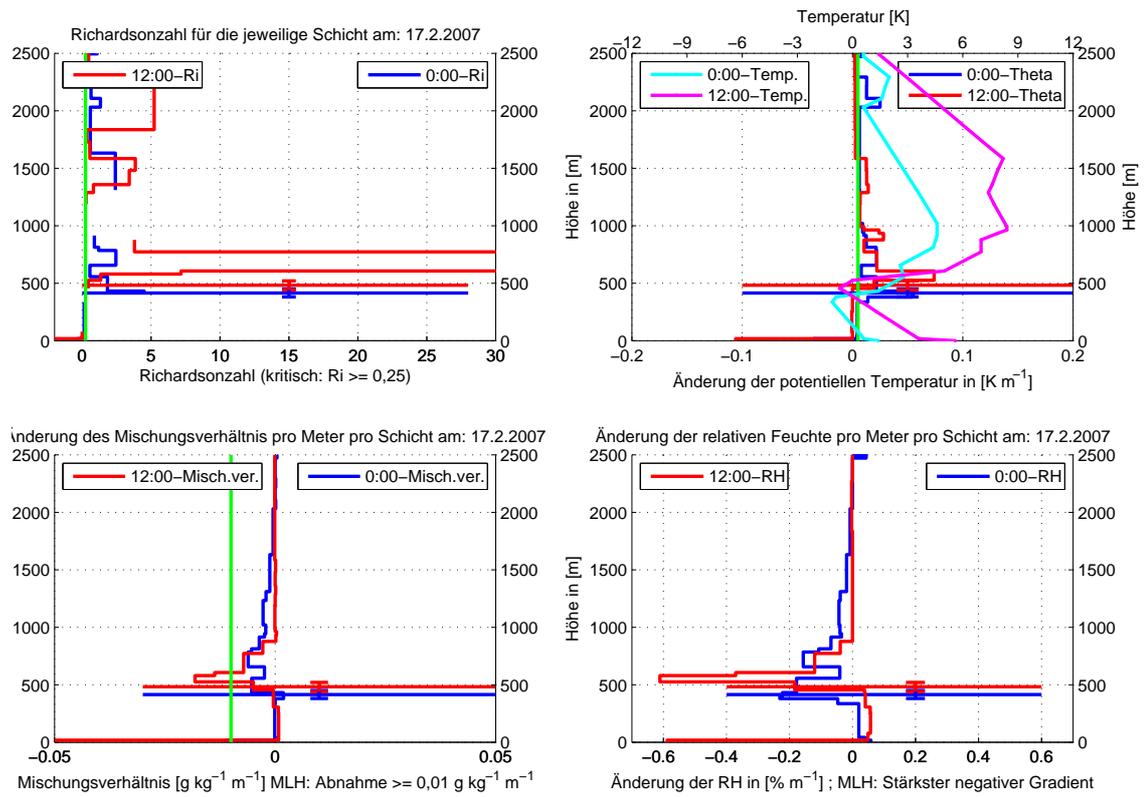


Abbildung F.2: 17.2.2007

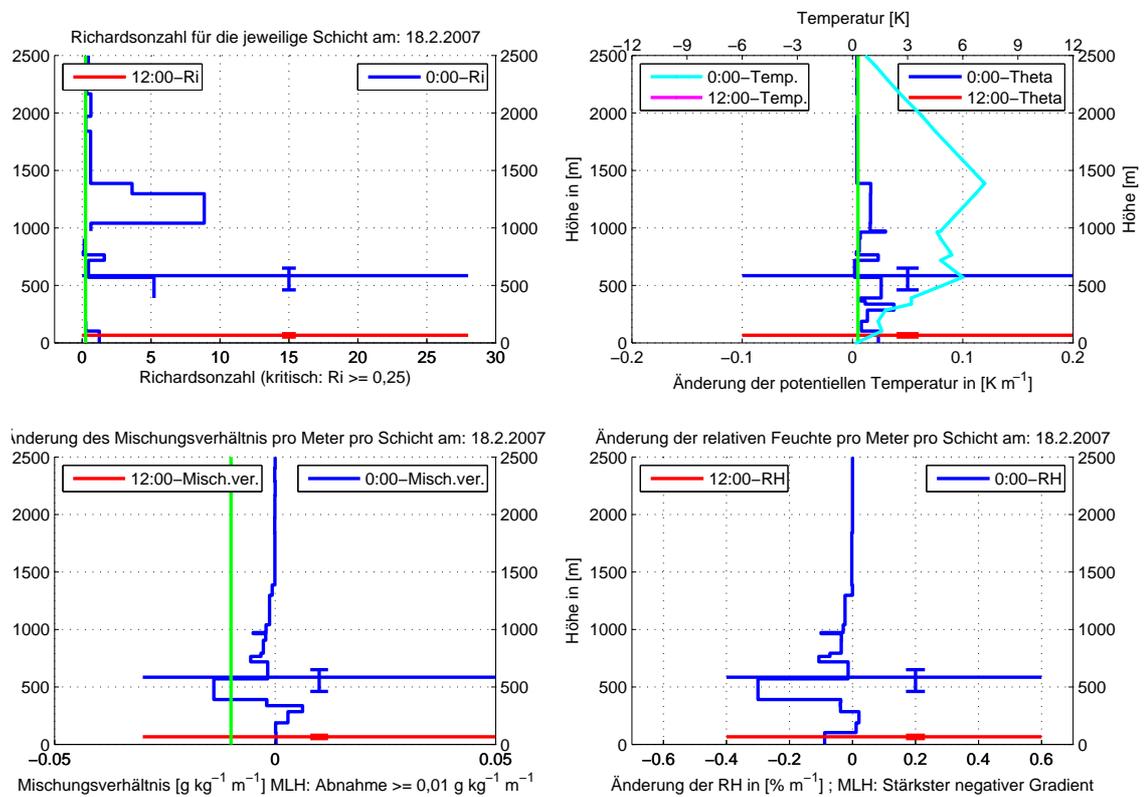


Abbildung F.3: 18.2.2007

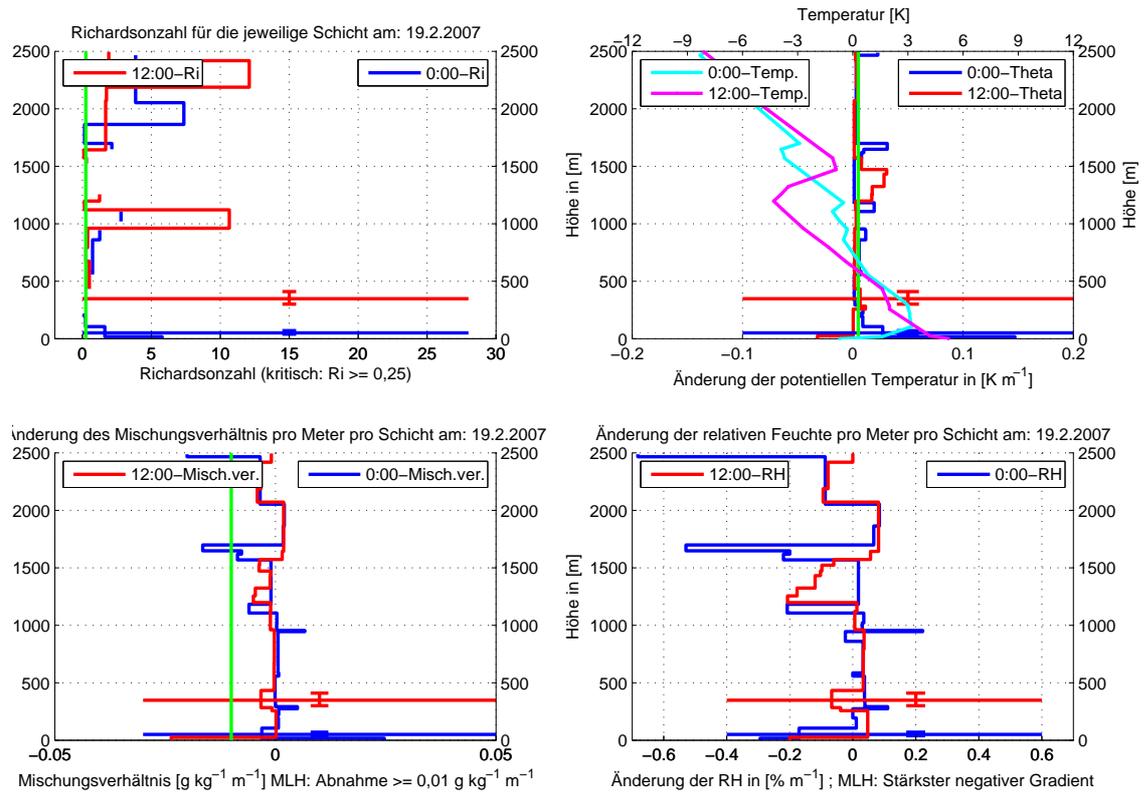


Abbildung F.4: 19.2.2007

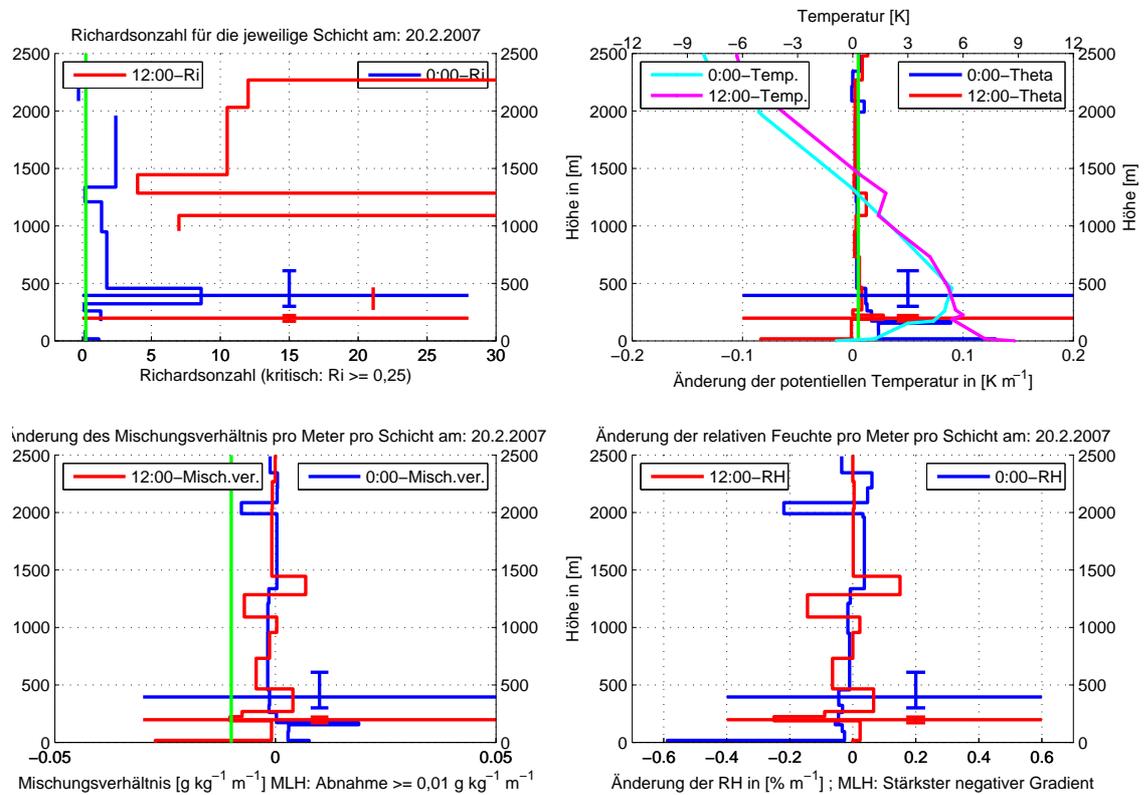


Abbildung F.5: 20.2.2007

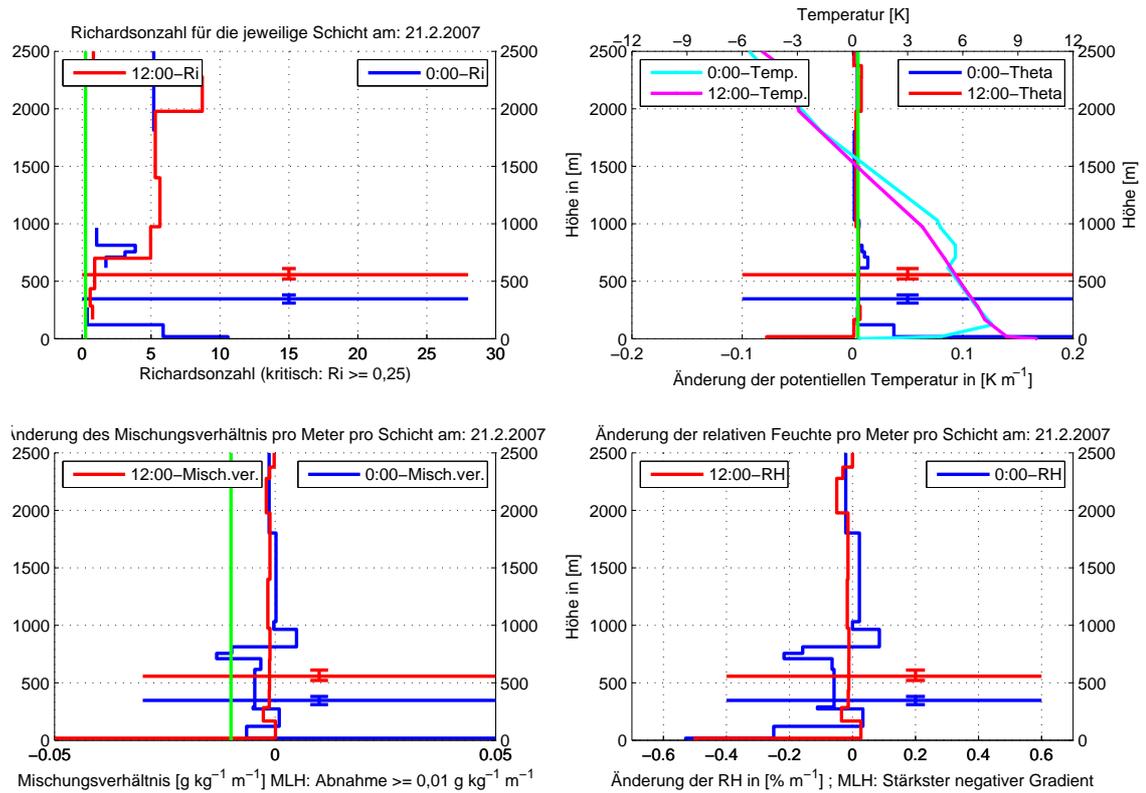


Abbildung F.6: 21.2.2007

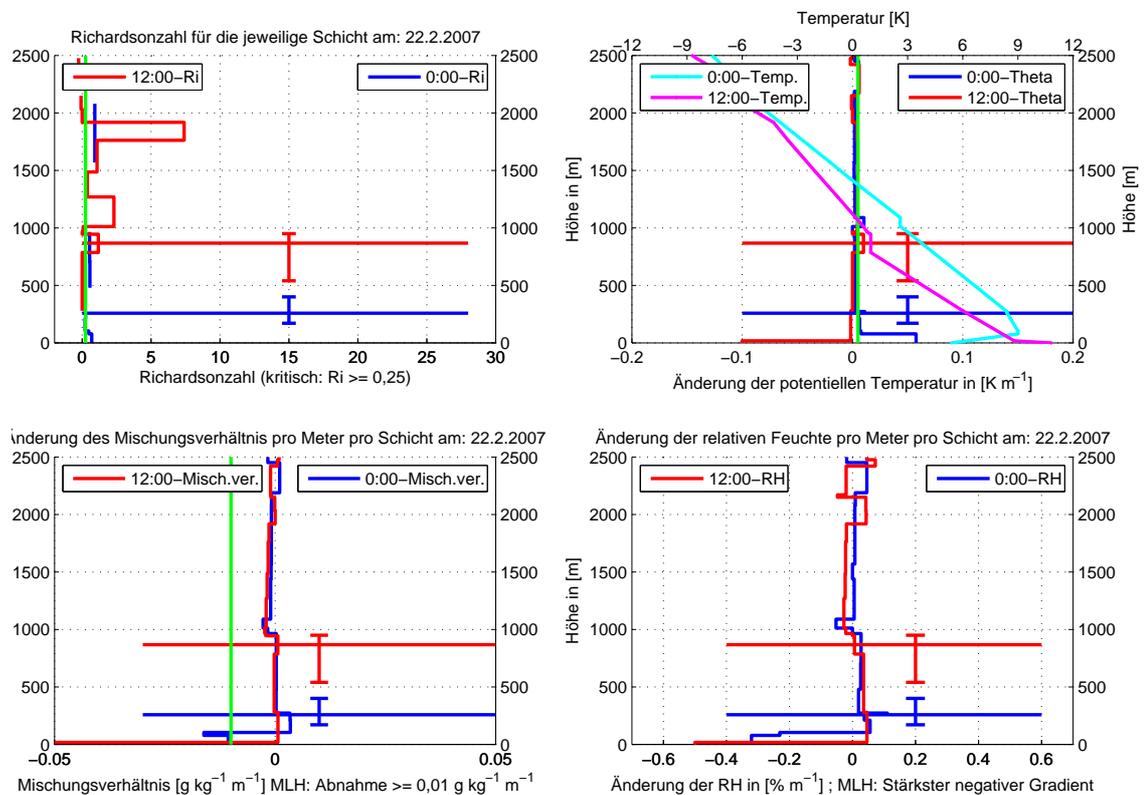


Abbildung F.7: 22.2.2007

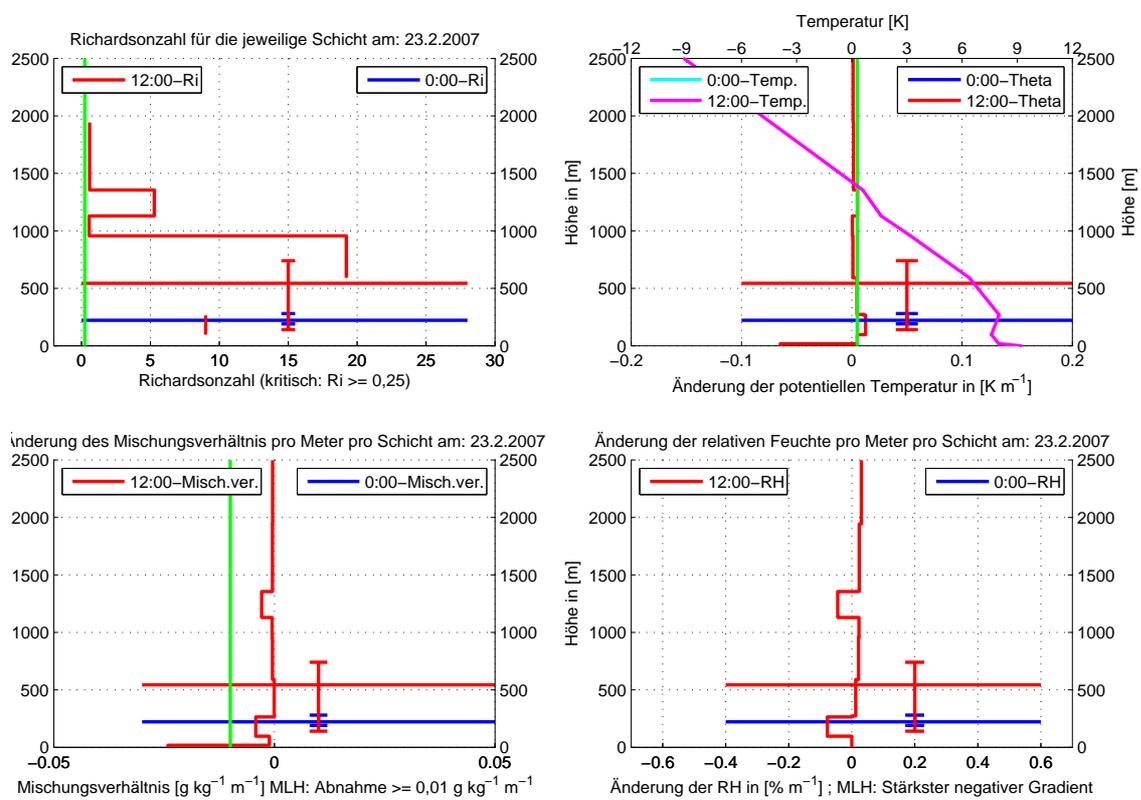


Abbildung F.8: 23.2.2007

Anhang G

Bestimmung der MLH aus Radiosondenaufstiegen 2008

Abschnitt 6.3 basiert auf den Abbildungen in diesem Anhang.

Ebenso liegen die folgenden Abbildungen den statistischen Auswertungen in Abschnitt 6.4 zugrunde.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Radiosondenaufstiege während der Messperiode 2008 mit jeweils einem anderen Kriterium zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe. Auf der Ordinate ist immer die Höhe eingetragen, auf der Abszisse das jeweilige Kriterium. Im Plot links oben ist die Richardsonzahl aufgetragen, die kritische Ri wird durch die vertikale grüne Linie markiert. Liegt die Richardsonzahl links der grünen Linie, ist die Schicht, für die Ri berechnet wird instabil, also durchmischt. Ri rechts der grünen Linie ist nach Baumann-Stanzer and Groehn (2004) stabil.

In der Abbildung rechts oben ist die Änderung der potentiellen Temperatur geplottet. Die vertikale grüne Linie markiert den Grenzwert von 5 K km^{-1} , der bei Heffter (1980) als Indikator für die Mischungsschichtgrenze angeführt wird. Zusätzlich ist der Verlauf der Temperatur geplottet, damit die Temperatur bei einem passenden Gradienten an Ober- und Untergrenze der Inversion überprüft werden kann (Heffter (1980)).

Im Bild links unten sind die Gradienten des Mischungsverhältnisses aufgetragen. Hier markiert die vertikale grüne Linie die kritische Abnahme des Mischungsverhältnis. Sobald die Abnahme des Mischungsverhältnis $0,01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ist, gilt diese Schicht nach Baumann-Stanzer and Groehn (2004) gemäß ihres Feuchterückgangs als Mischungsschicht.

Der Plot unten rechts zeigt die relative Feuchte. Hier gilt lediglich der stärkste Gradient (Hennemuth and Lammert (2006)).

Die Mitternachtswerte sind in blau und die Mittagswerte in rot aufgetragen. Die beiden horizontalen Linien markieren die Höhe der Mischungsschicht, wie sie vom Ceilometer zu den beiden Zeitpunkten detektiert wird. Der vertikale Fehlerbalken gibt den jeweils höchsten und tiefsten Wert an, über den gemittelt wird.

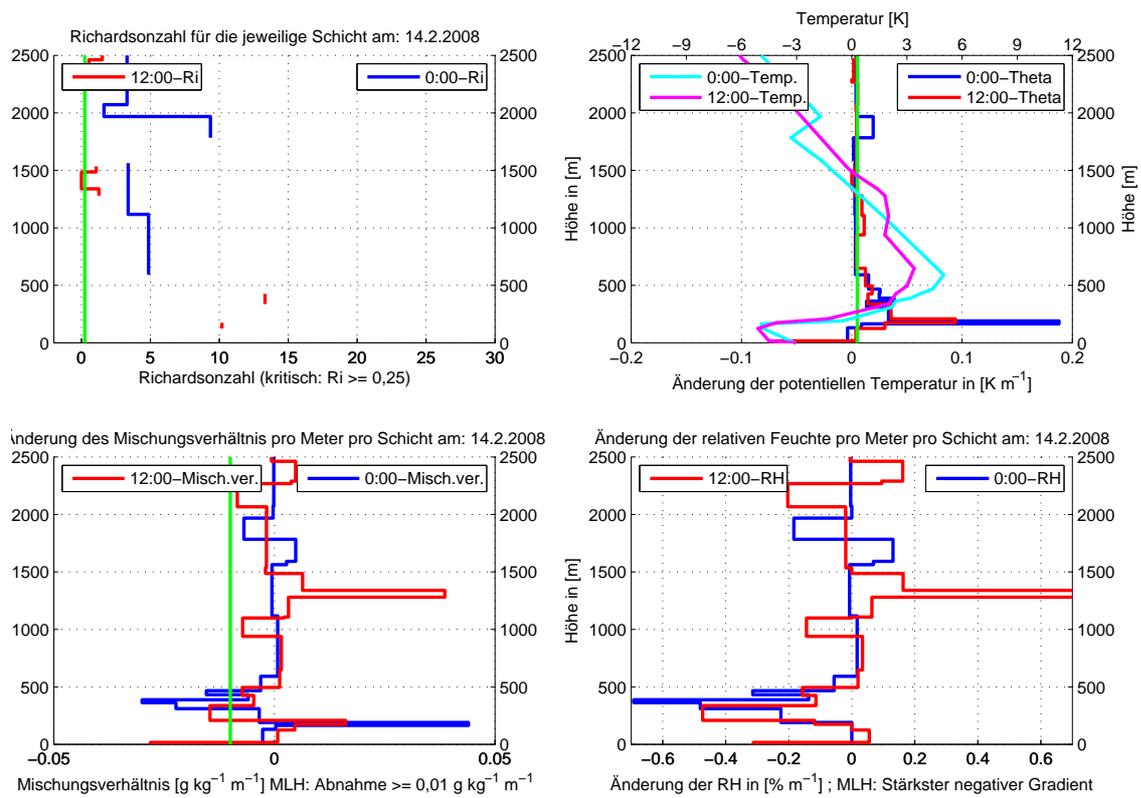


Abbildung G.1: 14.2.2008

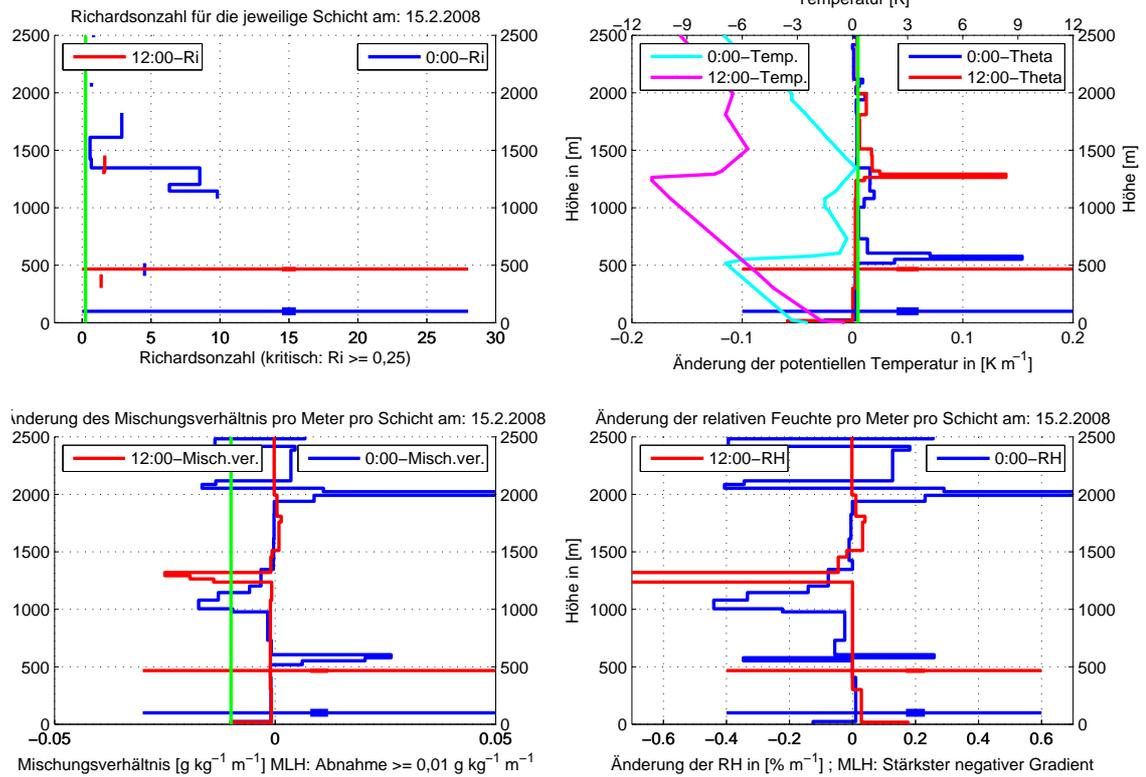


Abbildung G.2: 15.2.2008

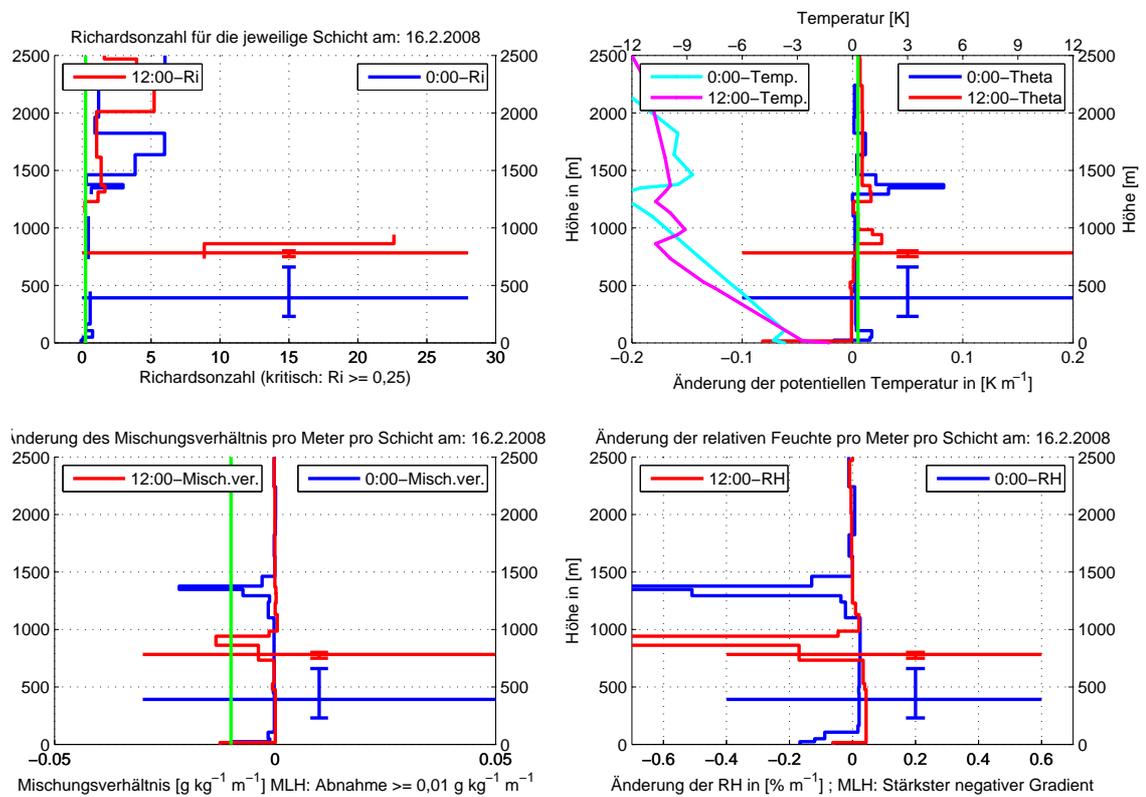


Abbildung G.3: 16.2.2008

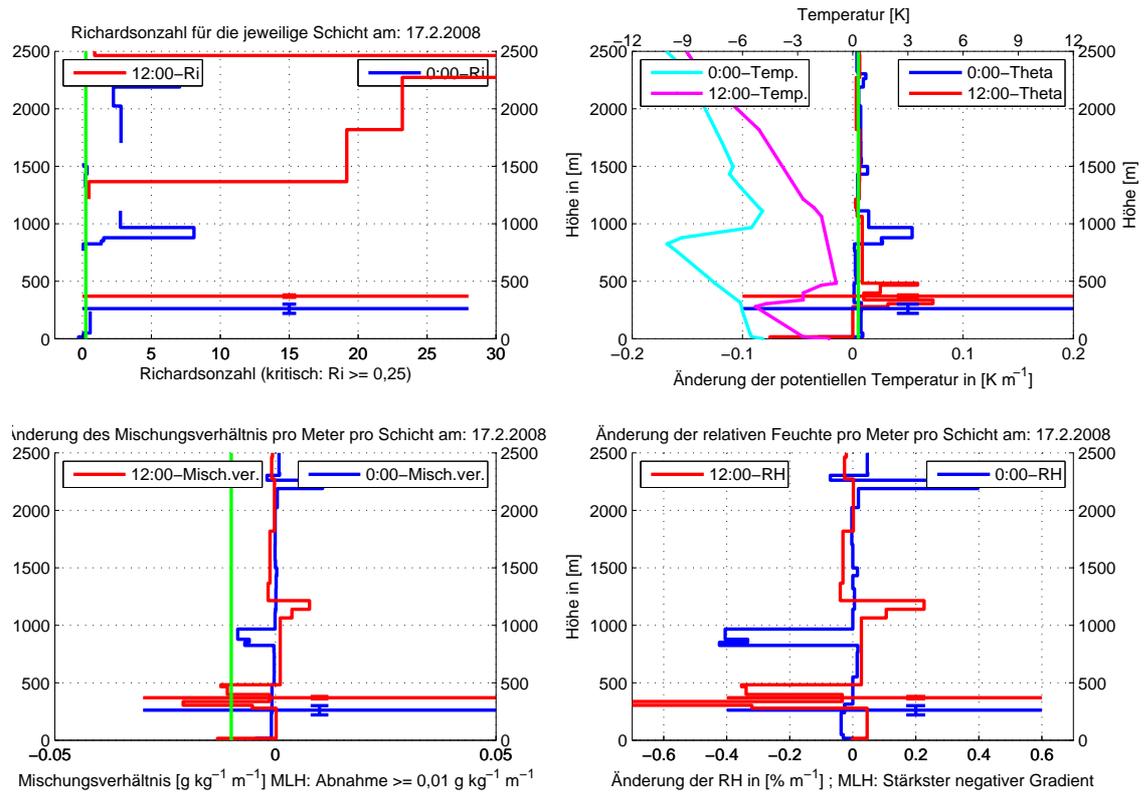


Abbildung G.4: 17.2.2008

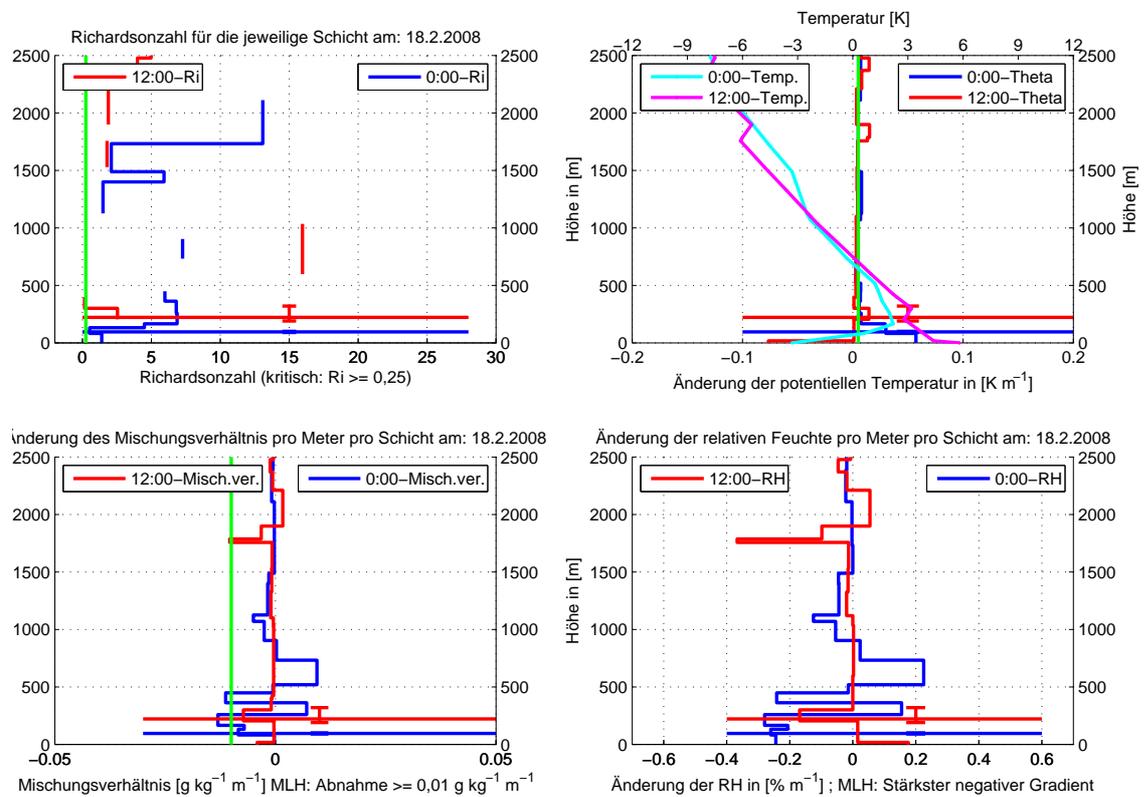


Abbildung G.5: 18.2.2008

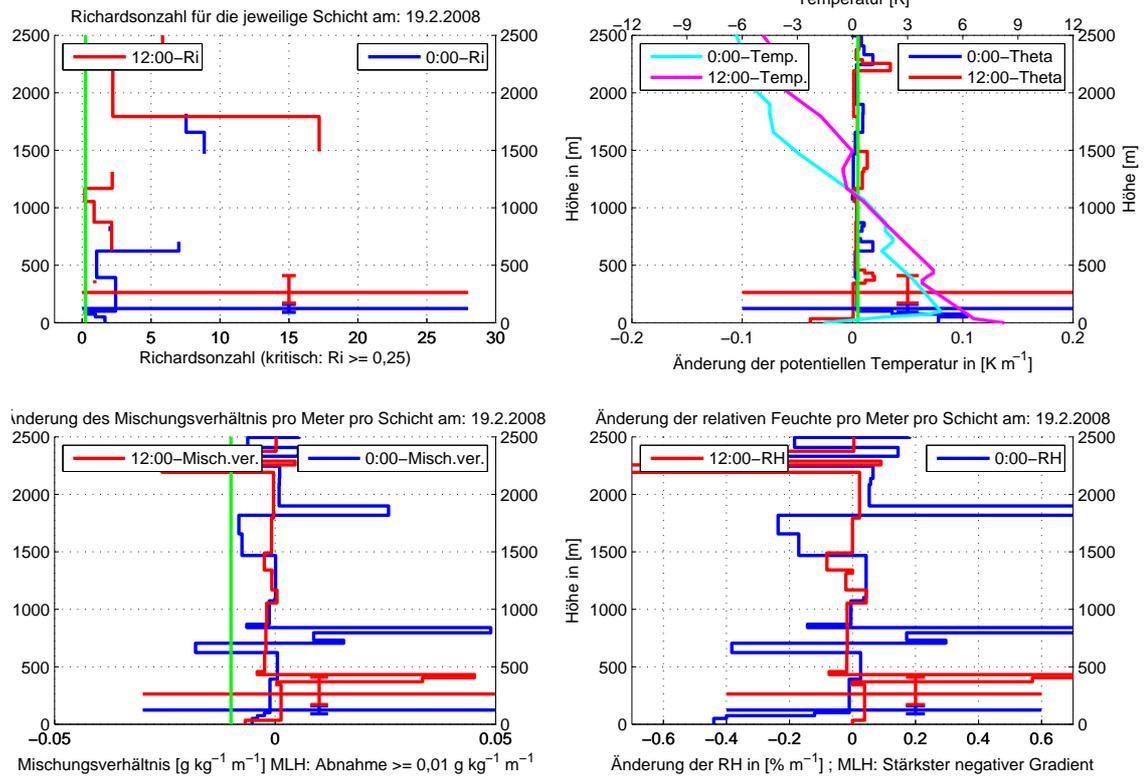


Abbildung G.6: 19.2.2008

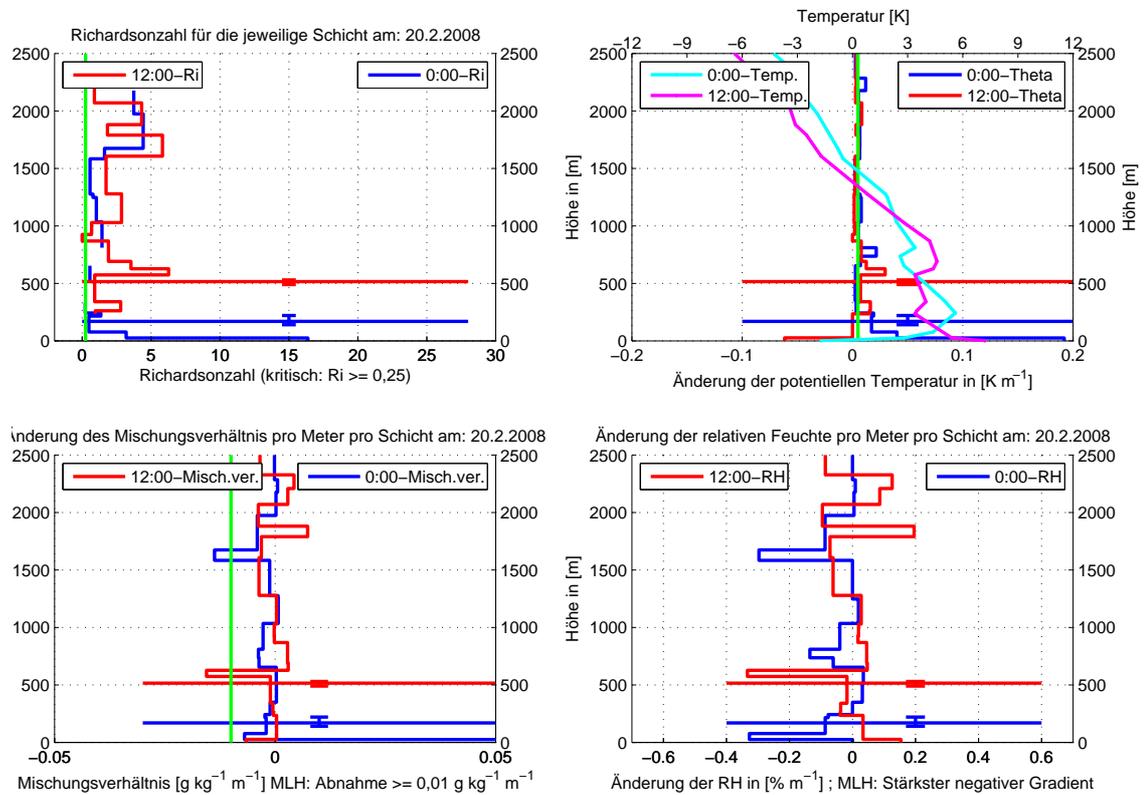


Abbildung G.7: 20.2.2008

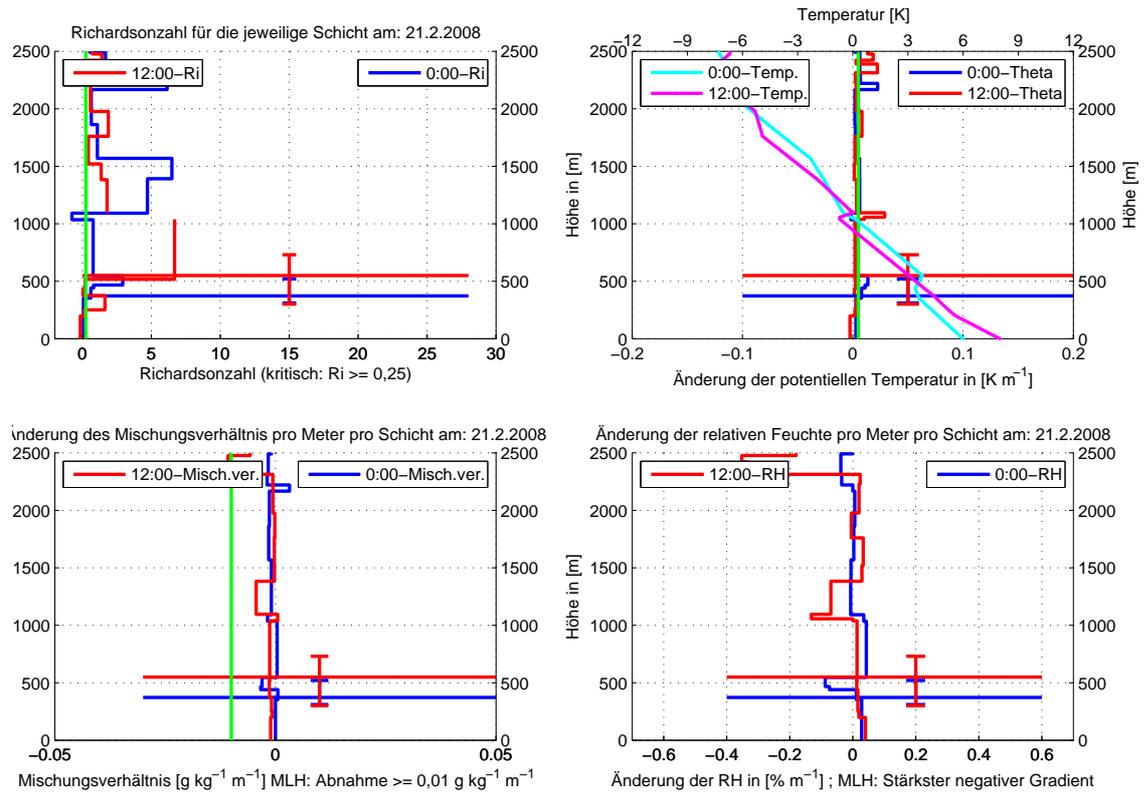


Abbildung G.8: 21.2.2008

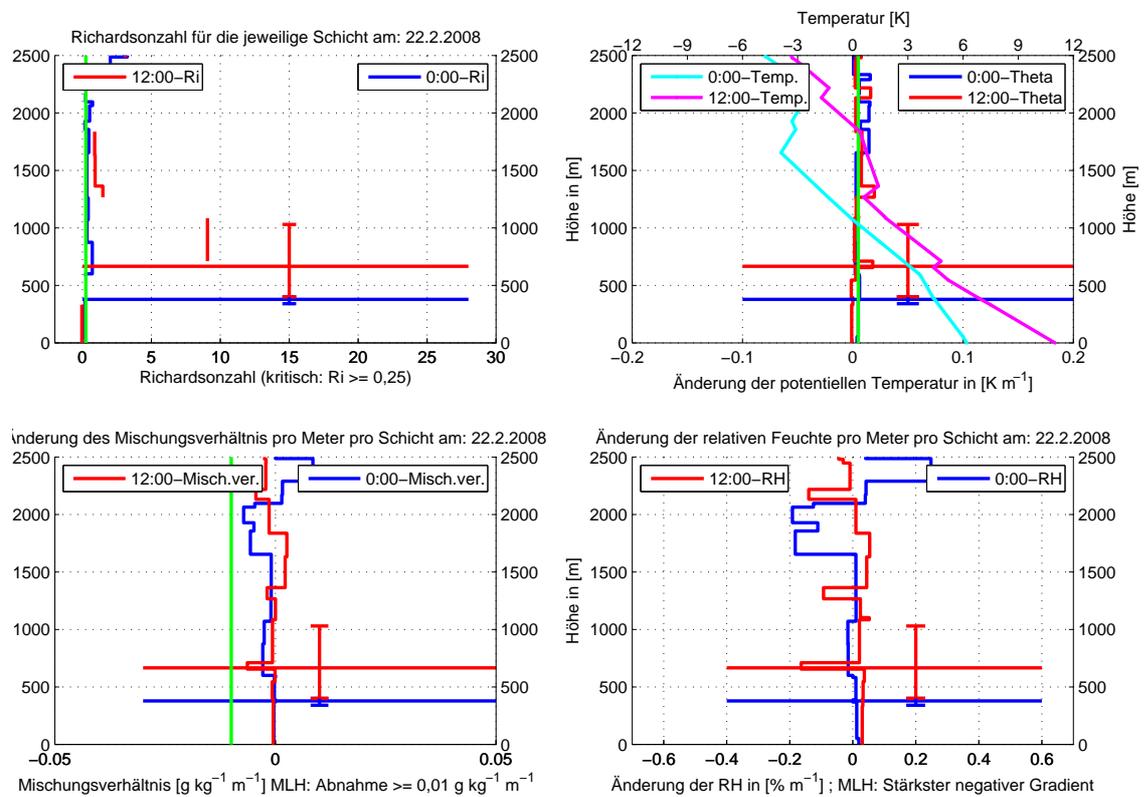


Abbildung G.9: 22.2.2008

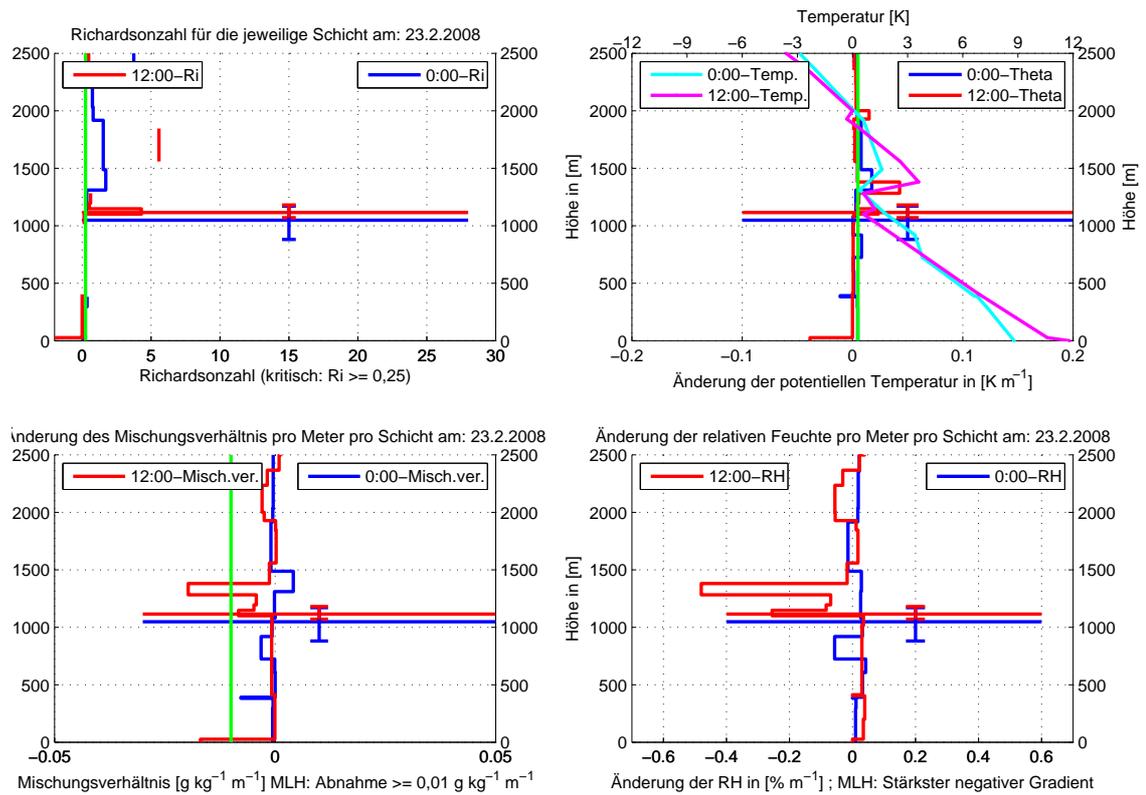


Abbildung G.10: 23.2.2008

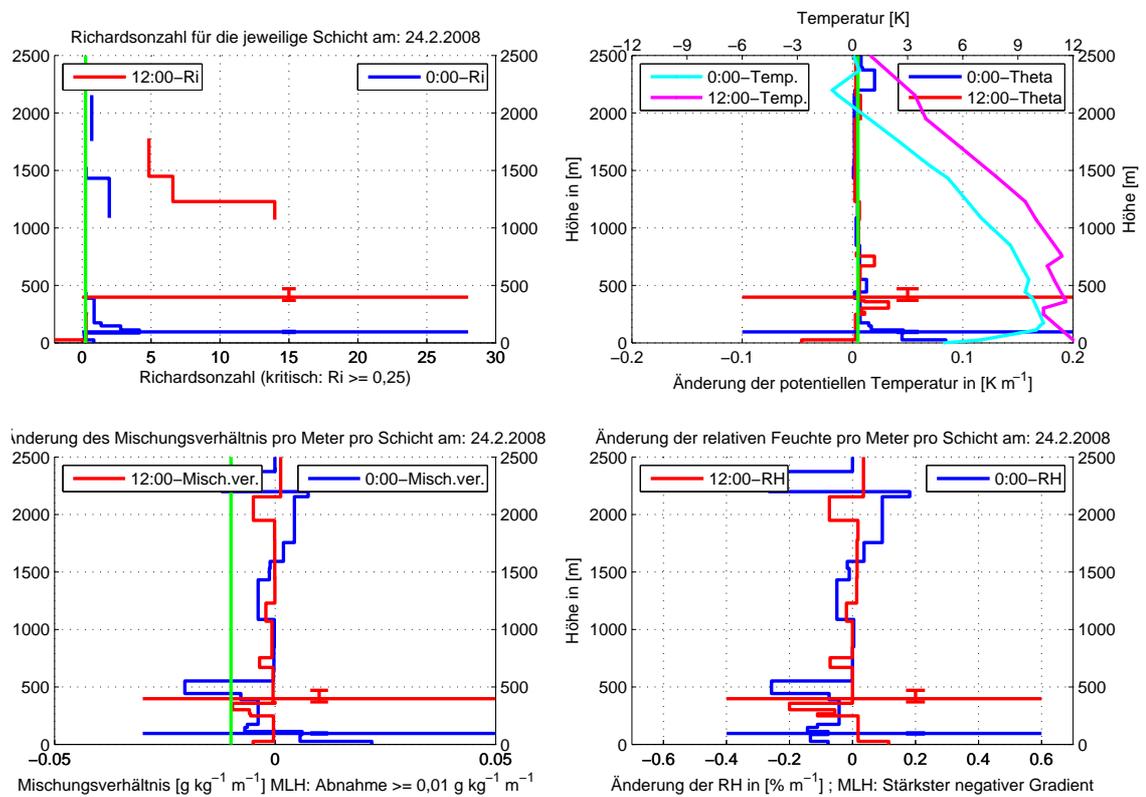


Abbildung G.11: 24.2.2008

Anhang H

Tabellen

Hier werden die dem Abschnitt 8.3 zugrunde liegenden Tabellen abgebildet. Es handelt sich jeweils um die Korrelationswerte der Stundenmittel verschiedener Partikelgrößen mit den Stundenmitteln von Mischungsschichthöhe, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur und relativer Feuchte. Dabei handelt es sich bei PM10 um Massenkonzentrationen und bei UFP und FP um Partikelanzahlen.

Dabei wird bisweilen in Tageswerte (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr), Nachtwerte (19:00 Uhr bis 6:00 Uhr) und Vollzeitwerte (kompletter Tag) unterschieden.

| PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | MLH | | Temperatur | | Windgeschw. | | Windrichtung | | rel. Feuchte | |
|--------------------------------------|-------|-------|------------|-------|-------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 |
| Vollzeit R^2 | 0.005 | 0.164 | 0.017 | 0.077 | 0.213 | 0.221 | 0.033 | 0.019 | 0.077 | 0.062 |
| Tag R^2 | 0.023 | 0.155 | 0.027 | 0.077 | 0.257 | 0.125 | 0.072 | 0.004 | 0.102 | 0.059 |
| Nacht R^2 | 0.006 | 0.178 | 0.007 | 0.092 | 0.165 | 0.383 | 0.005 | 0.067 | 0.061 | 0.121 |

Tabelle H.1: PM10 aller Messstationen korreliert mit den meteorologischen Daten der DWD-Station. Dabei wird zwischen Tag-, Nacht- und Vollzeitwerten (Tag- und Nachtwerte zusammen) unterschieden

| [particle/cm ³] | | NC3-10 | NC10-30 | NC30-50 | NC50-100 |
|-----------------------------|----------|--------|---------|---------|----------|
| 2007 | Vollzeit | 0.010 | 0.023 | 0.063 | 0.121 |
| | Tag | 0.000 | 0.076 | 0.086 | 0.155 |
| | Nacht | 0.017 | 0.004 | 0.004 | 0.010 |
| 2008 | Vollzeit | 0.000 | 0.146 | 0.242 | 0.350 |
| | Tag | 0.023 | 0.275 | 0.316 | 0.400 |
| | Nacht | 0.014 | 0.042 | 0.126 | 0.246 |

Tabelle H.2: Partikelklassen der UFP in [particle/cm³] angegeben und mit den Stundenwerten der MLH korreliert. Dabei wird zwischen Tag-, Nacht- und Vollzeitwerten (Tag- und Nachtwerte zusammen) unterschieden

| [particle/cm ³] | | NC100-500 | NC500-1000 | NC1000-2500 | NC2500-10000 |
|-----------------------------|----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| 2007 | Vollzeit | 0.110 | 0.026 | 0.000 | 0.001 |
| | Tag | 0.135 | 0.035 | 0.045 | 0.010 |
| | Nacht | 0.015 | 0.001 | 0.021 | 0.000 |
| 2008 | Vollzeit | 0.455 | 0.185 | 0.161 | 0.069 |
| | Tag | 0.525 | 0.157 | 0.260 | 0.233 |
| | Nacht | 0.367 | 0.252 | 0.113 | 0.019 |

Tabelle H.3: Partikelklassen der FP in [particle/cm³] angegeben und mit den Stundenwerten der MLH korreliert. Dabei wird zwischen Tag-, Nacht- und Vollzeitwerten (Tag- und Nachtwerte zusammen) unterschieden

| [particle/cm ³] | | 3-10 | 10-30 | 30-50 | 50-100 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|--------|
| 2007 | MLH | 0.010 | 0.023 | 0.063 | 0.121 |
| 2008 | MLH | 0.000 | 0.146 | 0.242 | 0.350 |
| 2007 | Temp | 0.001 | 0.020 | 0.132 | 0.265 |
| 2008 | Temp | 0.002 | 0.170 | 0.282 | 0.298 |
| 2007 | WiRi | 0.041 | 0.011 | 0.009 | 0.005 |
| 2008 | WiRi | 0.041 | 0.149 | 0.155 | 0.111 |
| 2007 | WiGe | 0.001 | 0.046 | 0.141 | 0.258 |
| 2008 | WiGe | 0.005 | 0.111 | 0.227 | 0.354 |
| 2007 | RH | 0.001 | 0.029 | 0.161 | 0.323 |
| 2008 | RH | 0.025 | 0.009 | 0.021 | 0.054 |

Tabelle H.4: Partikelklassen der UFP in [particle/cm³] angegeben und mit den Stundenwerten von MLH, Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte für 2007 und 2008 korreliert.

| [particle/cm ³] | | 100-500 | 500-1000 | 1000-2500 | 2500-10000 |
|-----------------------------|------|---------|----------|-----------|------------|
| 2007 | MLH | 0.110 | 0.026 | 0.000 | 0.001 |
| 2008 | MLH | 0.455 | 0.185 | 0.161 | 0.069 |
| 2007 | Temp | 0.236 | 0.080 | 0.010 | 0.087 |
| 2008 | Temp | 0.223 | 0.078 | 0.107 | 0.019 |
| 2007 | WiRi | 0.003 | 0.051 | 0.037 | 0.000 |
| 2008 | WiRi | 0.028 | 0.024 | 0.122 | 0.023 |
| 2007 | WiGe | 0.377 | 0.198 | 0.152 | 0.166 |
| 2008 | WiGe | 0.423 | 0.098 | 0.109 | 0.191 |
| 2007 | RH | 0.357 | 0.195 | 0.002 | 0.016 |
| 2008 | RH | 0.108 | 0.232 | 0.161 | 0.003 |

Tabelle H.5: Partikelklassen der FP in [particle/cm³] angegeben und mit den Stundenwerten von MLH, Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte für 2007 und 2008 korreliert.

Literaturverzeichnis

- Alföldy, B., J. Osan, Z. Toth, S. Török, A. Harbusch, C. Jahn, S. Emeis, and K. Schäfer, 2007: Aerosol optical depth, aerosol composition and air pollution during summer and winter conditions in Budapest. *Science of the Total Environment*, **383**, 141–163.
- Baumann-Stanzer, K. and I. Groehn, 2004: Alpine radiosoundings - feasible for mixing height determination? *Meteorologische Zeitschrift*, **13**, 131–142.
- Bergamt-Düren, 2004: Informationen zum Thema Feinstaub und Radon. Tech. rep., Bergamt Düren, Nordrhein-Westfalen, Deutschland.
- Bilgeri, F., 2009: Analysen der Luftbelastungen im Inntal im meteorologischen Kontext: Eine Vergleichsstudie von zwei unterschiedlichen Winterperioden im Raum Schwaz. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Blackadar, A., 1957: Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **38**, 283–290.
- Böllmann, U., 2007: Informationen über Ozon. *Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg*.
- Buchholz, S., 2006: Einfluss meteorologischer und luftchemischer Parameter auf die NO₂-Immissionskonzentration am Beispiel von ausgewählten Luftmessstationen in Baden-Württemberg. Diplomarbeit, Universität Trier.
- Carslaw, D. C., 2005: Evidence of an increasing NO₂/NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmos. Environ.*, **39**, 4793–4802.
- Crutzen, P. J., 1998: How the atmosphere keeps itself clean and how this is affected by human activities. *Pure & Applied Chemistry*, **70** (7), 1319–1326.
- DWD, 2001: *Richtlinie für automatische Klimastationen*. Deutscher Wetterdienst Abteilung Messnetze und Daten, URL http://www.dwd.de/bvbw/.../Richtlinie_Klimastationen.pdf.

- Emeis, S., 2004: Vertical wind profiles over an urban area. *Meteorologische Zeitschrift*, **13**, 353–359.
- Emeis, S., 2011: *Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer*. Springer-Verlag.
- Emeis, S. and M. Türk, 2004: Frequency distributions of the mixing height over an urban area from SODAR data. *Meteorologische Zeitschrift*, **13**, 361–367.
- ESM_Andersen_Instruments, 2011: *Beschreibung des Feinstaubmessgeräts FH62I-R der Fa. Thermo*. URL www.esm-online.de/andersen/product/group6/FH62I-R.htm.
- Etling, D., 2002: *Theoretische Meteorologie: Eine Einführung*. 2d ed., Springer-Verlag.
- Etling, D., 2010: *Theoretische Meteorologie: Eine Einführung*. 3d ed., Springer-Verlag.
- Fabian, P., 1992: *Atmosphäre und Umwelt*. Springer-Verlag, 144 pp.
- Gerstengarbe, F. and P. Werner, 2005: *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Breszowsky 6. verbesserte und ergänzte Auflage*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, URL http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/...e_wlkdaten.txt.
- Gurgiser, W., 2009: Windsysteme im Winter 07/08 im Raum Schwaz - Auswirkungen auf Luftschadstoffe im Bereich der Autobahn. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Heffter, J., 1980: Transport layer depth calculations. *2nd Joint Conference on Application of Air Pollution Modelling*, 787–791.
- Hennemuth, B. and A. Lammert, 2006: Determination of the Atmospheric Boundary Layer Height from Radiosonde and Lidar Backscatter. *Boundary Layer Meteorology*, **120**, 184–185.
- Hobbs, P. V., 2000: *Introduction to atmospheric chemistry*. Cambridge University Press, 262 pp.
- Holton, J. R., 1967: The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. *Tellus*, **19**, 199–205.
- Jacobeit, J., 1986: Stadtklimatologie von Augsburg unter besonderer Berücksichtigung der lufthygienischen Situation sowie des Lärms. *Augsburger Geographische Hefte*, **Heft Nr. 6**, 67–96.
- Kollmann, J., 2008: Investigation of mixing height parametrisation in an Alpine valley during winter 2005/06. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

- Konrad, S., 2000: Untersuchungen zur Radikalchemie in der Abluftfahne von Berlin ein Beitrag zum Feldexperiment BERLIOZ. Dissertation, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal.
- Kraus, H., 2004: *Die Atmosphäre der Erde*. Springer-Verlag.
- Münkel, C., 2007: Mixing height determination with lidar ceilometers results from Helsinki Testbed. *Meteorologische Zeitschrift*, **16(4)**, 451–459.
- Pitz, M., W. Birmili, O. Schmid, A. Peters, H. E. Wichmann, and J. Cyrys, 2008: Quality control and quality assurance for particle size distribution measurements at an urban monitoring station in Augsburg, Germany. *Journal of Environmental Monitoring*, **10(9)**, 1017–1024.
- Rider, L. J., 1966: Low-Level Jet at White Sands Missile Range. *U. S. Army Electronics Command, White Sands Missile Range, New Mexico*, 283–287.
- Rotach, M. W., 1999: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment*, **33**, 4001–4008.
- Schäfer, K., S. Emeis, H. Hoffmann, and C. Jahn, 2006: Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas. *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, 647–658.
- Schäfer, K., et al., 2009: Determination of meteorological influences upon particulate loads and spatial particulate distributions in Augsburg. *METTOOLS VII, Hamburg*.
- Schreiter, M., 2010: Auswertungen von Ceilometerdaten hinsichtlich Grenzschicht- und Wolkenhöhe im Raum Innsbruck und Wien. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Seibert, P., F. Beyrich, S.-E. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen, and P. Tercier, 2000: Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment*, **34**, 1001–1027.
- Sentuc, F. N., 2004: Der Einfluss lokaler Verkehrsemissionen auf die Immissionssituation im Großraum Köln. *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln*.
- Shreffler, J., 1979: Heat island convergence in St. Louis during calm periods. *Appl. Meteorol.*, **18**, 1512–1520.
- Stull, R. B., 2000: *Meteorology for Scientists and Engineers*. Brooks/Cole, 490 pp.
- Tuch, T., P. Brand, H. Wichmann, and J. Heyder, 1997: Variation of particle number and mass concentration in various size ranges of ambient aerosols in Eastern Germany. *Atmospheric Environment*, **31**, 4193–4197.

Tuch, T., et al., 2000: Comparison of two particle-size spectrometers for ambient aerosol measurements. *Atmospheric Environment*, **34**, 139–149.

UmweltBundesAmt, 2005: Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM). *Umwelt Bundes Amt, Berlin*.

www.wetteronline.de, 2011: Archivdaten von der Homepage des Anbieters Wetteronline.de.

Danksagung

Hier am Ende ist es Zeit Dank zu sagen.

In erster Linie möchte ich mich bei meinen Betreuern bedanken.

Großer Dank gebührt meinem Innsbrucker Betreuer Dr. Friedrich Obleitner, bei dem ich stets auf ein offenes Ohr traf, auch wenn er noch so viel zu erledigen hatte. Obwohl er am Anfang meiner Diplomarbeit ein wenig skeptisch war, stand er mir immer mit Rat und Tat zur Seite und gab mir viele wertvolle Tipps und Hinweise, die die Qualität vorliegender Arbeit entscheidend verbessern. Vielen Dank für dein Verständnis, lieber Friedl, wenn du mich Mittags im Aufzug getroffen hast und gefragt hast, ob ich denn schon wieder klettern ginge, obwohl du die Antwort bereits kanntest.

Auch meinen beiden Betreuern Prof. Klaus Schäfer und Prof. Stefan Emeis vom Forschungszentrum Karlsruhe in Garmisch möchte ich ganz herzlich danken. Bei Prof. Schäfer bedanke ich mich für die logistische Unterstützung, die konstruktiven Treffen, das Bereitstellen eines Arbeitsplatzes während meiner Zeit in Garmisch und das er mir bei allen Fragen bezüglich meiner Arbeit zur Seite stand. Bei Prof. Emeis bedanke ich mich für die guten Gespräche und Hinweise, die mich nicht nur in Bezug auf die Diplomarbeit entscheidend voranbrachten.

Ebenso danke ich herzlich für die Möglichkeit, dass ich einen Vortrag an der DACH2010 über Teile meiner Diplomarbeit halten durfte. Diese Vortragsreise und die damit verbundenen Kontakte waren sehr hilfreich bei der Erstellung dieser Arbeit.

Natürlich danke ich auch der Leitung und den Angestellten und Mitarbeitern des Instituts für Meteorologie und Geophysik in Innsbruck, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben.

Auch danke ich dem Forschungszentrum Karlsruhe und dem Helmholtz-Zentrum München, auf deren Daten die meisten Erkenntnisse meiner Diplomarbeit basieren.

Vielen Dank an Dr. Johannes Vergeiner vom IMG I für die großzügige Bereitstellung seiner Programmierkenntnisse, die mir manche Arbeit erleichtert haben. Auch Roman Friedl und Steffi Schrader, beide Diplomanden am FZK sowie Saskia Buchholz möchte ich für ihre Gespräche und ihren Erfahrungsaustausch danken. Mein Dank geht auch an Dr. Christoph Munkel von der Firma Vaisala, der mich beim Auswerten der Ceilometerrohdaten unterstützte und an Anton Deuringer vom LfU-Augsburg für die Informationen über die Messgeräte.

Natürlich danke ich meinen Kollegen und Freunden, die ich im Laufe meines Studiums kennenlernen durfte und die mich ein Stück begleitet haben. Da ich in meiner Aufzählung keinen vergessen möchte, belasse ich es dabei.

Genauso danke ich allen, die ich in meiner Zeit im Adolf-Sollath-Heim kennenlernen durfte, denn jeder hat meine Studienzeit ein Stückchen geprägt.

Trotzdem: Vielen Dank Simon, Andi und Ben!

Ein großes Dankeschön geht an meine Eltern. Sie haben mir die Wahl eines Studiums ermöglicht und mich immer in meiner Entscheidung bestärkt und unterstützt. Danke!

Abschließend möchte ich mich bei meinem ehemaligen Professor Martin Ehrendorfen bedanken. Ich durfte seine Einführungsvorlesung in die Meteorologie hören und hätte er sie nicht so interessant und lehrreich gestaltet, hätte ich dieses Fach wahrscheinlich nicht weiter studiert.

Curriculum Vitae

Markus Höß

Fritz-von-Miller-Weg 11 83707 Bad Wiessee

Geboren am 14 Juni 1986, Tegernsee

AKADEMISCHER WERDEGANG:

- 2009–2011 Diplomarbeit unter der Betreuung von Dr. Obleitner, Prof. Schäfer, Prof. Emeis am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Innsbruck: *“Untersuchung der Luftqualität im Stadtbereich Augsburg während zweier Winter”*.
- 2005–2011 Studium der Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck.
- 1995–2005 mathematisch-naturwissenschaftliches Gymnasium Tegernsee *Abitur*.

PRAKTIKA, VORTRÄGE UND STUDENTISCHE FERIALARBEITEN:

- Juli 2008 Ferialarbeit am Forschungszentrum Karlsruhe in Garmisch bei Prof. Schäfer
- Sept. 2009 Praktikum beim Wasserwirtschaftsamt in Rosenheim
- Sept. 2010 Vortrag an der DACH2010 in Bonn *Untersuchung der Ursachen für hohe Luftschadstoffbelastungen in der Stadt Augsburg*

ALPINE AUSBILDUNGEN UND TÄTIGKEITEN:

- seit 2008 Jugendleiter und Leiter der Jungmannschaft der DAV-Sektion Tegernsee
- seit 2010 Fachübungsleiter im DAV für Skibergsteigen und Skihochtouren
- seit 2011 Beginn der Ausbildung zum staatlich geprüften Berg- und Skiführer