

UNIVERSITÄT AUGSBURG
FAKULTÄT FÜR ANGEWANDTE INFORMATIK
LEHRSTUHL FÜR PHYSISCHE GEOGRAPHIE
UND QUANTITATIVE METHODEN
PROF. DR. J. JACOBET

DIPLOMARBEIT

UNTERSUCHUNGEN ZUR MISCHUNGSSCHICHTHÖHE ÜBER AUGSBURG MIT BODENGEBUNDENEN FERNMESSVERFAHREN

Eingereicht von:
Roman Friedl

Betreuung durch:
Prof. Dr. Klaus Schäfer
Forschungszentrum Karlsruhe – Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Atmosphärische Umweltforschung
Garmisch–Partenkirchen

&

Prof. Dr. Jucundus Jacobet
Universität Augsburg
Institut für Geographie
Lehrstuhl für Physische Geographie und Quantitative Methoden

Augsburg, Juni 2010

Verfasser: Friedl, Roman
Ludwigstr. 4
86152 Augsburg
romanfriedl@ymail.com

Matrikelnr.: 827284

Abgabetermin: 24.06.2010

1. Korrektor Prof. Dr. Jucundus Jacobeit
Lehrstuhl für Physische Geographie und Quantitative Methoden
Institut für Geographie
Universität Augsburg

2. Korrektor Prof. Dr. Klaus Schäfer
Institut für Atmosphärische Umweltforschung
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Garmisch–Partenkirchen

Inhaltsverzeichnis:

Abbildungsverzeichnis	V
1. Einleitung	- 1 -
2. Informationen zum Standort Augsburg	- 2 -
2.1 Naturräumliche Gliederung	- 2 -
2.2 Meteorologie der Stadt Augsburg	- 4 -
3. Grundlagen der Atmosphärischen Grenzschicht.....	- 6 -
3.1 Die vertikale Schichtung der planetaren Grenzschicht.....	- 6 -
3.2 Tagesgang der AGS	- 7 -
3.3 Gelände und Lufttemperatur	- 8 -
3.4 Strahlungsinversionen	- 9 -
3.5 dynamische Inversionen:	- 10 -
3.6 Stadtklimatologische Besonderheiten	- 10 -
3.7 Die Mischungsschicht	- 12 -
4. Messungen in Augsburg	- 14 -
4.1 Standorte	- 14 -
4.1.1 Standort FH	- 14 -
4.1.2 Standort AVA.....	- 16 -
4.1.3 Standort BlfA	- 17 -
4.2 Beschreibung der Messsysteme	- 19 -
4.2.1 Die Ceilometer	- 19 -
4.2.1.1 Funktionsweise	- 19 -
4.2.1.2 Probleme.....	- 21 -
4.2.2 SODAR/RASS	- 22 -
4.2.2.1 Funktionsweise	- 22 -
4.2.2.2 Probleme.....	- 24 -
4.2.3 Schadstoffmessung	- 26 -
4.2.4 Radiosonden.....	- 26 -
4.3 Datenverfügbarkeit.....	- 27 -
5. Datenbearbeitung	- 29 -
5.1 Ceilometer	- 29 -
5.1.1 Programmeigenschaften CL-View und CL-MH-Control	- 29 -
5.1.2 Beschreibung der MATLAB-Software	- 31 -

5.1.3	Bearbeitung der Ceilometerdaten mit MATLAB	- 32 -
5.2	SODAR/RASS	- 35 -
5.2.1	Auswertung mit METEK-Software	- 35 -
5.2.2	Bearbeitung der einzelnen Parameter mit MATLAB	- 36 -
5.2.3	Bestimmung von Schichtgrenzen mit SODAR	- 36 -
5.2.3.1	Rückblick auf frühere IMK-IFU Projekte mit SODAR	- 36 -
5.2.3.2	Algorithmen für den Standort Augsburg	- 38 -
5.3	Bestimmung von Schichtgrenzen mit RASS	- 39 -
5.4	Bestimmung weiterer Parameter mit SODAR-RASS-Daten	- 40 -
5.5	Datenverarbeitung Radiosondendaten und Schadstoffdaten	- 45 -
5.5.1	Bearbeitung Schadstoffe mit MATLAB	- 45 -
5.5.2	Bestimmung von Schichtgrenzen aus Radiosondendaten	- 46 -
6.	Ergebnisse	- 47 -
6.1	Darstellung der MLHs	- 47 -
6.2	Vergleich der beiden Ceilometer	- 48 -
6.2.1	Markante Cluster beim Vergleich der beiden Ceilometer	- 48 -
6.2.2	Identifizierung und Interpretation der Cluster	- 56 -
6.2.2.1	Gute Übereinstimmungen	- 57 -
6.2.2.2	Stabile Grenzschicht an der FH	- 64 -
6.2.2.3	Höhenniveau der CBL und Residualschicht	- 68 -
6.3	Analyse von Zeitreihen	- 72 -
6.3.1	Vergleich der Messmethoden am mittleren Tagesgang der MLH...	- 72 -
6.3.2	Jahresgang der MLH	- 75 -
6.3.3	Besonderheit Februar – März 2009	- 76 -
6.4	Vergleich der beiden Winter 08/09 und 09/10	- 78 -
6.5	Vergleich des mittleren Tagesganges der MLH mit Luftschadstoffen	- 81 -
7.	best practice	- 86 -
8.	Zusammenfassung der Ergebnisse	- 87 -
	Anhang A	- 87 -
	Literaturverzeichnis	- 87 -

ABBILDUNGSVERZEICHNIS:

Abbildung 1: Flächennutzung der Stadt Augsburg.....	- 2 -
Abbildung 2: Naturräumliche Gliederung des Raumes Augsburg.....	- 3 -
Abbildung 3: modellhafter Tagesgang der Schichtung des PBL.....	- 8 -
Abbildung 4: Dynamik einer Strahlungsinversion.....	- 9 -
Abbildung 5: Aufbau der urbanen Grenzschicht.....	- 11 -
Abbildung 6: Luftbildaufnahme Standort FH.....	- 15 -
Abbildung 7: Messcontainer an der FH.....	- 15 -
Abbildung 8: Luftbildaufnahme des Standortes AVA.....	- 16 -
Abbildung 9: Messsysteme am Standort AVA.....	- 17 -
Abbildung 10: Luftbildaufnahme des Standortes BlfA.....	- 18 -
Abbildung 11: Messwagen des IMK-IFU am Standort BlfA.....	- 18 -
Abbildung 12: Ceilometer CL31 an der AVA Augsburg.....	- 21 -
Abbildung 13: Festecho im Sodargramm der Reflektivität am 12.12.09.....	- 25 -
Abbildung 14: Datenverfügbarkeit SODAR/RASS 01.12.08 - 28.02.10.....	- 28 -
Abbildung 15: Unterbrechung von Strukturen in den Ceilometerdaten.....	- 33 -
Abbildung 16: Stabilität nach Richardson am 25.04.2009.....	- 42 -
Abbildung 17: akustische Rückstreuprofil vom 24.04.09.....	- 42 -
Abbildung 18: Häufigkeit der Windrichtungen Augsburg.....	- 43 -
Abbildung 19: Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen.....	- 44 -
Abbildung 20: Häufigkeit der Windklassen Augsburg.....	- 45 -
Abbildung 21: Darstellung der MLH 04.02.09.....	- 47 -
Abbildung 22: MLH-Niveaus vom 04.02.09 Augsburg.....	- 48 -
Abbildung 23: Vergleich der Ceilometer über den gesamten Messzeitraum.....	- 49 -
Abbildung 24: Vergleich der Ceilometer nach Windklassen.....	- 51 -
Abbildung 25: Vergleich Ceilometer-MLH's Winter Nacht.....	- 53 -
Abbildung 26: Vergleich Ceilometer-MLH's Winter Tag.....	- 53 -
Abbildung 27: Vergleich Ceilometer-MLH's Frühling Nacht.....	- 54 -
Abbildung 28: Vergleich Ceilometer-MLH's Frühling Tag.....	- 54 -
Abbildung 29: Vergleich Ceilometer-MLH's Sommer Nacht.....	- 54 -
Abbildung 30: Vergleich Ceilometer-MLH's Sommer Tag.....	- 55 -
Abbildung 31: Vergleich Ceilometer-MLH's Herbst Nacht.....	- 55 -
Abbildung 32: Vergleich Ceilometer-MLH's Herbst Tag.....	- 55 -
Abbildung 33: Backscatterplots der Ceilometer 21.-22.11.09.....	- 57 -
Abbildung 34: MLH-Plot vom 21.11.09.....	- 59 -
Abbildung 35: Sodargramme vom 21.11.09.....	- 60 -
Abbildung 36: Backscatterplots der Ceilometer vom 03.05.09.....	- 60 -
Abbildung 37: Sodargramme vom 03.05.09.....	- 62 -
Abbildung 38: Stabilitätsprofil nach Richardson vom 03.05.09.....	- 62 -
Abbildung 39: MLH-Plot vom 03.05.09.....	- 63 -
Abbildung 40: MLH-Niveau-Plot vom 03.05.09.....	- 63 -
Abbildung 41: Backscatterplots der Ceilometer vom 08.09.09.....	- 65 -
Abbildung 42: Sodargramme von 08.09.09.....	- 65 -
Abbildung 43: MLH-Plot vom 08.09.09.....	- 66 -
Abbildung 44: MLH-Plot vom 19.02.09.....	- 67 -
Abbildung 45: Profil der Stabilität nach Richardson vom 19.02.09.....	- 67 -
Abbildung 46: Backscatterplots der Ceilometer vom 27.11.09.....	- 69 -
Abbildung 47: Sodargramme vom 26.-27.11.09 (12:00 Uhr bis 12:00 Uhr).....	- 69 -
Abbildung 48: MLH-Plots des 26.11.09 und 27.11.09.....	- 71 -
Abbildung 49: mittlerer Tagesgang der MLH pro Monat.....	- 74 -
Abbildung 50: Potentielle Temperatur der Monate Februar und März 2009.....	- 77 -
Abbildung 51: Potentielle Temperatur der beiden Winter 08/09 und 09/10.....	- 79 -
Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten Winter.....	- 80 -
Abbildung 53: Häufigkeit der Windklassen beider Winterperioden.....	- 81 -

Abbildung 54: Mittlerer monatlicher Tagesgang von MLH und Luftschadstoffen.....	- 84 -
Abbildung 55: Tagesmittel der MLH AVA-Ceilometer und Luftschadstoffe	- 85 -
Abbildung 56: Messstandorte im Stadtgebiet Augsburg.	- 90 -
Abbildung 57: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Frühling Nacht.....	- 93 -
Abbildung 58: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Frühling Tag	- 94 -
Abbildung 59: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Winter Tag.....	- 95 -
Abbildung 60: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Herbst Nacht	- 96 -
Abbildung 61: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Herbst Tag	- 97 -
Abbildung 62: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Sommer Nacht	- 98 -
Abbildung 63: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Sommer Tag	- 99 -
Abbildung 64: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Winter Nacht	- 100 -
Abbildung 65: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Winter Nacht... - 101 -	-
Abbildung 66: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Winter Tag- 102 -	-
Abbildung 67: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Frühling Nacht - 103 -	-
Abbildung 68: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Frühling Tag ... - 104 -	-
Abbildung 69: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Sommer Nacht - 105 -	-
Abbildung 70: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Sommer Tag... - 106 -	-
Abbildung 71: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Herbst Nacht... - 107 -	-
Abbildung 72: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Herbst Tag- 108 -	-
Abbildung 73: Vergleich der Niveaus der Ceilometer-MLHs bei Windklassen ohne Wolkeneinfluss - oberes FH-Niveau, unteres AVA-Niveau.....	- 109 -
Abbildung 74: Vergleich der Niveaus der Ceilometer-MLHs bei Windklassen ohne Wolkeneinfluss - unteres FH-Niveau, oberes AVA-Niveau (eigene Darstellung)-	110 -

1. Einleitung

In Zeiten steigender Bevölkerungszahlen und wachsender Städte sowie auch unter dem Gesichtspunkt der Klimaerwärmung ist die Betrachtung der urbanen lufthygienischen Situation ein wichtiges Anliegen in Politik, Wissenschaft und Gesellschaft. Die Konzentration von Luftschadstoffen im städtischen Windfeld wird dabei von der Schichtung der Stadtatmosphäre beeinflusst, weshalb es sinnvoll ist, diese beschreiben zu können.

Bodengebundene Fernerkundung bietet hierfür eine gute Möglichkeit, da die kontinuierlichen Profilmessungen eine zeitliche und räumliche Analyse ermöglichen. Dabei ist zwischen optischen und akustischen Verfahren zu unterscheiden. Das IMK-IFU hat im Zuge einer Messkampagne in Augsburg diese verschiedenen Messsysteme installiert, deren Daten vom 01.12.2008 bis 28.02.2010 nun für die Analyse der Mischungsschicht über Augsburg verwendet werden können.

In der vorliegenden Arbeit sollen diese Messsysteme miteinander verglichen und die Mischungsschichthöhe für die Stadt Augsburg über einen Messzeitraum von fünfzehn Monaten untersucht werden.

Dabei wird zunächst der Untersuchungsraum gegliedert sowie klimatologische Grundlagen aufgezeigt, woraufhin schließlich die eigentliche Datenauswertung beschrieben wird. Ein wesentlicher Punkt dabei ist die Beschreibung der unterschiedlichen Software sowie der angewandten Algorithmen zur Bestimmung der MLH. Schließlich werden die Ergebnisse aus dem Vergleich der Messsysteme aufgezeigt und diskutiert.

2. Informationen zum Standort Augsburg

2.1 *Naturräumliche Gliederung*

Die Stadt Augsburg liegt im Süden Deutschlands etwa 55 km nordwestlich von München und ist mit einer Gesamtfläche von ca. 14.500 ha und einer Einwohnerzahl von 260.000 EW die drittgrößte Stadt in Bayern. Die Flächennutzung teilt sich wie folgt auf:

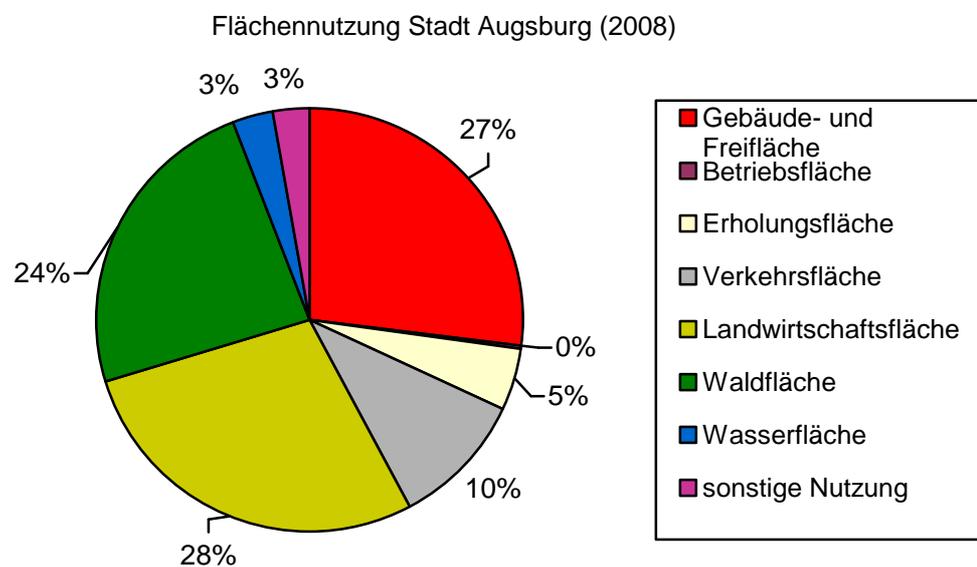


Abbildung 1: Flächennutzung der Stadt Augsburg. (eigene Darstellung nach STADT AUGSBURG 2009)

Die Ortszeit beträgt 16'24'' gegenüber MEZ.

Prägend für das Landschaftsbild in Augsburg ist die Lech-Wertach-Ebene, an die sich westlich die Iller-Lech-Schotterplatten, sowie östlich das Donau-Isar-Hügelland anschließen. Der Stadtkern von Augsburg befindet sich auf der durch Lech und Wertach gebildeten Terrassenstruktur auf der Hochterrasse, die zum Niveau der Flussebenen einen Höhenunterschied bis zu 20 Meter aufweist (vgl. Abb. 2).

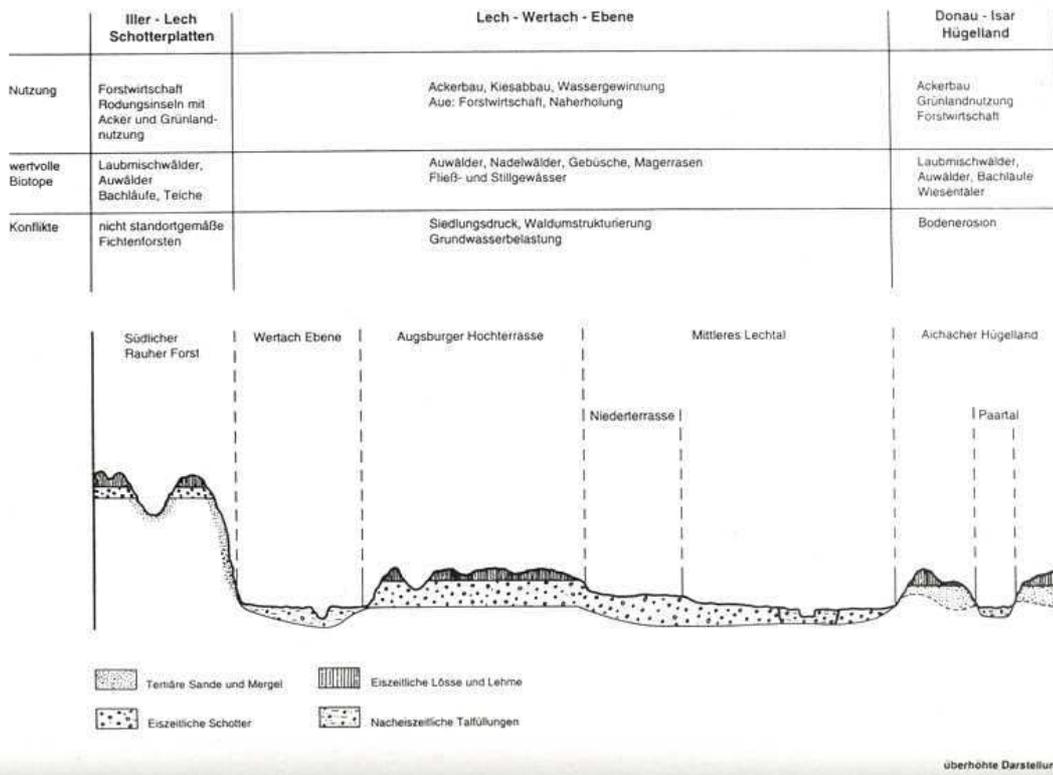


Abbildung 2: Naturräumliche Gliederung des Raumes Augsburg. (Quelle: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN 1996, S. 34)

Westliche Grenze der Wertachebene ist die meist bewaldete (Mischwaldbestände) Wertachleite, die das Ebenenniveau um bis zu 70 Meter überragt. Die Wertachebene selbst zeichnet sich wegen der intensiven Flussbegradigung durch einen niedrigen Grundwasserspiegel aus, Auwälder sind zum großen Teil der Landwirtschaft gewichen. Die östliche Grenze bildet die Augsburgische Hochterrasse, welche städtebaulich und landwirtschaftlich (aufgrund der Bodengüte) genutzt wird. Nach Osten bildet die Niederterrasse den Übergang zur Lechebene, welche für ihre inzwischen nur noch rudimentär vorhandenen Heideflächen bekannt ist. Auch hier leidet die Auwaldstufe unter den anthropogenen Eingriffen (Flussbegradigung, Ausweitung von Ackerland u. ä.). Schließlich folgt östlich des Lechs die bis zu 50 Meter hohe Lechleite (vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN 1997).

Für die klimatologische Betrachtung der Stadt Augsburg ist die Lage südlich der Schwäbischen Alb und gleichzeitig nördlich des Alpenkörpers von Bedeutung, wodurch sich im großräumigen Maßstab Effekte der diesen Raum betreffenden Westwinddrift deutlicher ausbilden, ebenso ist die Lage in der warmgemäßigten Klimazone mit entsprechendem Witterungsverlauf anzumerken. Einige meteorologische Parameter

jeweils des langjährigen Mittels der Monatsmittel der Jahre 1961-1990 aus Daten der Wetterstation Augsburg-Mühlhausen des DWD können in Tabelle 1 abgelesen werden.

Tabelle 1: Meteorologische Parameter der Stadt Augsburg (Quelle: STADT AUGSBURG (2009))

Jahresmitteltemperatur:	8,2 °C
Mittlerer Luftdruck:	959,4 hPa
Mittlere Luftfeuchte:	77,9 %
Mittlerer Jahresniederschlag:	810,5 mm
Mittlere Sonnenscheindauer/Jahr:	1691,1 h
Tagesmittel der Windstärke:	2,1 Bft
Tageshöchstwert der Windstärke:	22,6 m/s
Mittlere Anzahl der Sommertage (Max>25°C):	34
Mittlere Anzahl der Frosttage (Min<0°C) :	101
Mittlere Anzahl der Eistage (Max<0°C):	31

Weiterhin haben die in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Talniederungen von Lech und Wertach Einfluss auf das Lokalwindssystem, wie im Folgenden gezeigt werden wird.

2.2 Meteorologie der Stadt Augsburg

Anhand von Messfahrten in Augsburg konnte JACOBETIT feststellen, dass Unterschiede in der Luftfeuchte von bis zu 12% zwischen innerstädtischen oder industriell genutzten Versiegelungsflächen und baumbestandenen Grünflächen an strahlungsreichen Sommertagen zum Zeitpunkt der Tageshöchsttemperatur im Stadtgebiet von Augsburg auftreten. Positiv für die Versorgung der Luft mit Feuchtigkeit wirken sich lokal der Lech und die Wertach, sowie kleinere Stadtbäche aus, welche in der direkten Umgebung die Luftfeuchte im Gegensatz zu schlecht durchlüfteten Gassen im Altstadtbereich um bis zu 3% erhöhen (vgl. JACOBETIT 1986).

Ferner konnte anhand von Niederschlagsmessungen ausgewählter Tage von vier Messstationen im Raum Augsburg eine Begünstigung der westlichen Stadtteile bei Winden aus West bzw. Südwest und damit verbundenen Niederschlagsereignissen gefunden werden, die durch den Einfluss des westlichen Höhenrückens zu begründen ist.

Grundlage für die Bestimmung der langfristigen Windverhältnisse bieten JACOBET kontinuierliche Aufzeichnungen des DWD über die Zeitperiode 1951 bis 1960. Für die Betrachtung der Windverteilung ist die Lage der Stadt in der Westwinddrift, sowie der Orographien Schwäbische Alb im Norden und Alpen im Süden der Stadt Augsburg zu betrachten. Die festgestellten Hauptwindrichtungen Westsüdwest und – als sekundäres Maximum – Ostnordost entsprechen den orographischen Voraussetzungen.

Die Merkmale des Auftretens bestimmter Windrichtungen werden von JACOBET im Zusammenhang mit der atmosphärischen Temperaturschichtung betrachtet. Dabei ist festzustellen, dass die Hauptwindrichtungen bei indifferenter Schichtung denen der Gesamtzusammenschau entsprechen, sich aber bei labiler werdender Schichtung das Maximum nach Nordost verschiebt. Bei stabiler Temperaturschichtung sind eine Erhöhung der Süd- bzw. Nordkomponente festzustellen und damit eine Verschiebung der Maxima zu Südsüdwest und Nordnordost. Zudem nähern sich die Häufigkeiten der beiden Maxima einander an. Diese Richtungsverteilung ist auch bei Schwachwindereignissen anzutreffen, die Ursache hierfür ist in der Luftleitwirkung von Lech und Wertach zu finden, die allerdings bei höheren Windgeschwindigkeiten von der synoptischen Wettersituation überlagert werden. Infolge von Analysen des Auftretens lokaler Windsysteme anhand von Windaufzeichnungen verschiedener Messstationen im Raum Augsburg stellt JACOBET weiterhin fest, dass in etwa 80% aller Windfeldklassifizierungen (stündliches Mittel) die übergeordnete synoptische Strömung das Windfeld bestimmt, sowie in weiteren 18% dies zumindest partiell der Fall ist (vgl. JACOBET 1986).

Anhand von aktuellerem Datenmaterial aus dem Zeitraum 1980 bis 1988 einer Wetterstation (Flughafen Augsburg Mühhausen) im Norden der Stadt konnte ein Häufigkeitsmaximum von Südwestwinden mit einem Sekundären Maximum von Nordostwinden bei indifferenter Wetterlage bestätigt werden, sowie die leichte Richtungs- und Häufigkeitsverschiebung zu Gunsten einer Nord-Komponente.

Aus Vertikalsondierungen bei Oberschleißheim über den Zeitraum 1980 bis 1982 ist ersichtlich, dass das Auftreten von Inversionen im Winter die größte Häufigkeit (53%) besitzt, über die Hälfte davon mit einer Untergrenze unter 300 Meter. Im Herbst treten Inversionen immerhin noch mit einer Häufigkeit von 28% auf.

Nachdem nun eine Beschreibung des Untersuchungsraumes Augsburg gemacht wurde, soll in diesem Sinne eine weiterführende Darlegung der Eigenschaften des Untersuchungsraumes der Atmosphärischen Grenzschicht, in der sich die zu untersuchenden Prozesse abspielen, durchgeführt werden.

3. Grundlagen der Atmosphärischen Grenzschicht

3.1 Die vertikale Schichtung der planetaren Grenzschicht

Die atmosphärische Grenzschicht (AGS) bildet den unteren Teil der Troposphäre und besitzt eine vertikale Ausbreitung bis zu 2000m (vgl. BENDIX 2008, S. 31). Sie wird in mehrere Schichten unterteilt: die laminare Grenzschicht oder viskose Unterschicht bildet die unterste Schicht, in ihr findet der Austausch von Wärme, Wasserdampf und Impuls über molekularen Transport statt. Aufgrund der hohen Reibung ist die Windgeschwindigkeit hier zu vernachlässigen, weshalb in dieser Schicht keine Turbulenz induziert wird (vgl. ETLING 2008, S. 298). Anschließend an diese oft nur wenige Millimeter dicke Schicht befindet sich die bodennahe Grenzschicht mit einer Ausdehnung bis zu 2m. Mit abnehmender Reibung steigt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Es findet hier ein Wandel vom molekularen Austausch zu turbulentem Transport statt. In der darüber liegenden bodennahen Luftschicht, auch Prandl-Schicht genannt, zu der oftmals auch die bodennahe Grenzschicht (vgl. ETLING 2008, S. 301) gezählt wird, verliert die Reibung immer mehr zugunsten der Windgeschwindigkeit an Bedeutung, es werden 70 bis 80% der Geschwindigkeiten an der Obergrenze der AGS erreicht (vgl. ETLING 2008, S. 299). In dieser Schicht ist der turbulente Austausch nahezu höhenkonstant vorzufinden bei einer Ausdehnung bis etwa 50m über Grund, wo sich die äußere Schicht oder Oberschicht anschließt, deren obere Grenze und somit auch die Grenze der planetaren Grenzschicht die Peplopause ist. Letztere Schicht ist gekennzeichnet durch weiterhin steigende Windgeschwindigkeiten, Auftreten von Temperatur- und Feuchteinversionen, sowie Richtungsänderung des Windes hin zum geostrophischen Wind, weshalb sie auch als EKMAN- oder Spiral-Schicht bezeichnet wird. Mit steigender Windgeschwindigkeit sinkt der Einfluss des turbulenten Austausches und es stellt sich laminare Luftströmung ein.

Wesentlich effektiver als die molekulare Wärmeleitung ist Austausch durch Turbulenz, dessen Effizienz zum großen Teil von der vertikalen Windkomponente abhängig ist. Man unterscheidet zwischen thermischer Turbulenz, d. h. Luftbewegung aufgrund von Druckunterschieden durch Temperaturdifferenzen, und mechanischer Turbulenz hervorgerufen durch Reibung.

Der vertikale Einfluss der Reibung wird durch die Rauigkeitslänge z_0 beschrieben, die maßgebend ist für die Mächtigkeit der Schicht, in der keine Luftbewegung stattfindet. In lockerer Bebauung oder Industrieflächen ist die Rauigkeitslänge 1m, das bedeutet bis

etwa einen Meter Höhe ist die Windgeschwindigkeit theoretisch Null (vgl. BENDIX. 2008, S. 239).

Durch die Reibung wird in einem bewegten Luftpaket Turbulenz verursacht. Die dadurch verursachte vertikale Windkomponente ist von Bedeutung für den Energieaustausch durch mechanische Turbulenz und kann durch den Turbulenzparameter Schubspannungsgeschwindigkeit u_* beschrieben werden:

$$u_* = v_a * k / \ln(z_a / z_0)$$

, wobei k die KARMAN-Zahl, z_a die Anemometerhöhe und v_a die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe repräsentieren (vgl. BENDIX 2008, S. 239).

Bewegt sich ein Luftpaket über verschiedene Oberflächen, bilden sich unter Umständen durch den Wechsel der Rauigkeiten oder thermischen Beschaffenheiten der Untergründe verschiedene interne Grenzschichten aus, die innerhalb der Hauptströmungsrichtung nach oben verdriftet werden und sich schließlich überlagern.

3.2 Tagesgang der AGS

Die AGS lässt sich in einem modellhaften Tagesgang darstellen, wobei beachtet werden muss, dass dieser in den meisten Fällen durch verschiedene Einflüsse des täglichen Wettergeschehens modifiziert ist:

Eine bodennahe thermische Inversion erzeugt nachts eine stabile Schichtung, d.h. der Temperaturgradient (mit T : Temperatur; z : Höhe)

$$dT/dz > 0,$$

ist positiv bei geringer, dynamisch erzeugter Turbulenz, weshalb diese Schicht als stabile Grenzschicht oder stable boundary layer (SBL) bezeichnet wird. Die Grenzen dieser Schicht werden nach Sonnenaufgang und Erwärmung des Untergrundes durch konvektive Bewegung nach oben verschoben. In der sich neu aufbauenden Schicht findet nun durch freie Konvektion thermische und mechanische Turbulenz statt, weshalb diese Schicht auch als Mischungsschicht, englisch mixing layer (ML) bezeichnet wird, da durch die hohe Turbulenz durch große sich vertikal bewegende Wirbel, so genannte Thermikblasen, eine gute Durchmischung erreicht wird. Die Entstehung betrachtend spricht man auch von der konvektiven Grenzschicht bzw. convective boundary layer (CBL). Je nach Intensität der Konvektion kann diese Schicht

bei maximaler Ausdehnung am Nachmittag eine Höhe von bis zu 3000m erreichen, innerhalb der Schicht nimmt die Temperatur mit der Höhe ab. Oberste Grenze der CBL ist die Peploauseninversion, an der sich durch die absinkenden Luftmassen die Entrainmentschicht bildet.

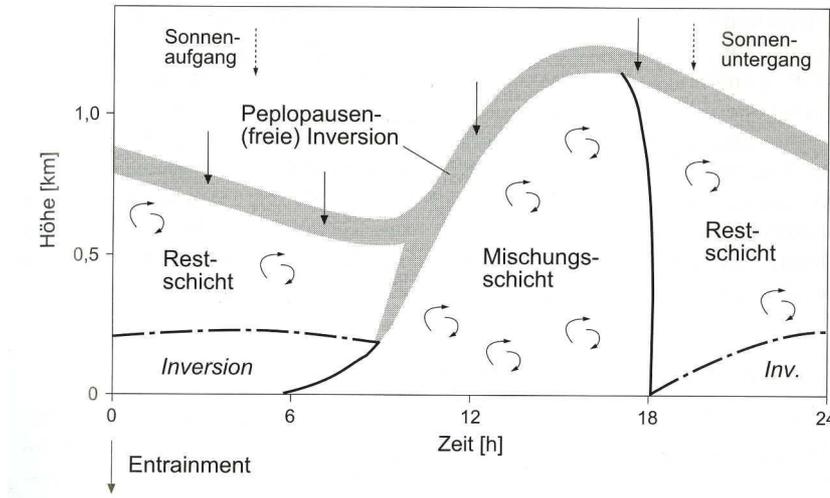


Abbildung 3: modellhafter Tagesgang der Schichtung des PBL. (Quelle: BENDIX 2004, S. 37)

Am Abend bei negativer Strahlungsbilanz baut sich schließlich vom Boden her ein neuer SBL auf, die „alte“ CBL bleibt aber weiterhin als Restschicht oder residual layer erhalten. In Abb. 3 wird dieser hier beschriebene Tagesgang veranschaulicht.

Dieses Modell unterliegt aber verschiedenen äußeren Einflüssen, die nun näher betrachtet werden sollen.

3.3 Gelände und Lufttemperatur

Einflüsse für den jahres- und tageszeitlichen Verlauf der Lufttemperatur sind sowohl der Strahlungsgang als auch Topographie und Oberflächenbedeckung und dadurch bedingter turbulenter Wärmeaustausch, sowie das Auftreten latenter Wärme. Bei hohen Windgeschwindigkeiten und damit verbundener großer Turbulenz über homogenen Gelände ist folglich die Lufttemperatur stark mit der Oberflächentemperatur verknüpft.

Zunehmende Strahlung bewirkt in der Regel eine Zunahme der Lufttemperatur, dabei verschiebt sich das Temperaturmaximum mit der Höhe zeitlich nach hinten, abhängig von der Zeit, die benötigt wird der für die Höhendifferenz durch Turbulenz zu überwinden. Bei Bewölkung ist die Temperaturamplitude meist abgeschwächt.

Nach Sonnenuntergang ist an einem Strahlungstag die Strahlungsbilanz durch langwellige Ausstrahlung an der Oberfläche negativ, worauf folglich eine Abkühlung der darüber liegenden Luftmassen von unten her resultiert und sich eine

Strahlungsinversion ausbilden kann. Das Temperaturminimum findet sich in der Regel kurz vor Sonnenaufgang. Die stabile Schichtung einer Strahlungsinversion ist in der Regel im Winter länger andauernd als im Sommer aufgrund der verkürzten Einstrahlungsdauer tagsüber (vgl. BENDIX 2004, S. 92).

3.4 Strahlungsinversionen

Begünstigend für Strahlungsinversionen sind geringe Windgeschwindigkeiten, die eine turbulente Durchmischung bewerkstelligen ohne eine stabile Schichtung zu zerstören, hohe Ausstrahlungsraten und geringer Wasserdampfgehalt und damit wenig latente Wärme der Luft, wodurch eine möglichst hohe Temperaturamplitude innerhalb der Schicht erreicht wird. Die Dynamik einer Strahlungsinversion ist in Abb. 4 veranschaulicht und wird im folgenden Text weiter erläutert.

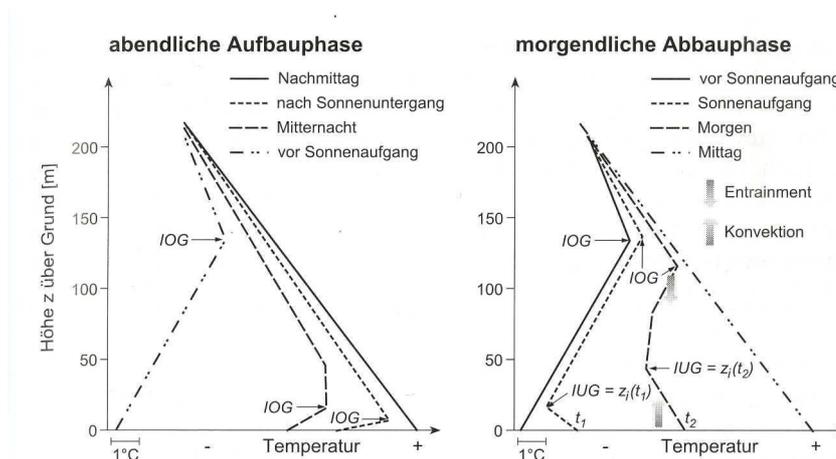


Abbildung 4: Dynamik einer Strahlungsinversion. (Quelle: BENDIX 2004, S. 93)

Die Obergrenze der Inversion steigt im Lauf der Nacht bis bei Sonnenaufgang Erwärmung der Oberfläche einsetzt und die Inversionsschicht von unten her gehoben wird. Es bildet sich eine abgehobene Inversion, deren untere Grenze sich durch aufsteigende Warmluftpakete durch die Oberflächenerwärmung nach oben verschiebt, während an der Obergrenze aufgrund der Massenbilanz ein Eindringen von warmen Luftschichten aus der darüber liegenden Schicht stattfindet. Dadurch wird im Laufe des Vormittages die Strahlungsinversion zugunsten eines bei ausbleibender Kondensation trockenadiabatischen Temperaturgradienten aufgehoben. Die stabile Schichtung einer Strahlungsinversion kann durch eine Dynamische Inversion noch verstärkt werden.

3.5 dynamische Inversionen:

Dynamische Inversionen sind durch großräumiges Absinken oder Aufgleiten von Luftmassen gekennzeichnet und betreffen die planetare Grenzschicht nur in bestimmten Fällen, etwa bei sehr starker Absinktendenz der Luftmassen oder geringer vertikaler Mächtigkeit der bodennahen Schicht. Die zeitliche Ausdehnung kann einige Tage erreichen.

Diese hier und in den vorangehenden Kapiteln besprochenen Prozesse bewirken grundsätzlich die Struktur des PBL, diese ist aber durch weitere Modifikationen zum Beispiel durch den Untergrund beeinflusst, weshalb hier im Besonderen die Stadtklimatologie erwähnt werden muss.

3.6 Stadtklimatologische Besonderheiten

Ein Stadtkörper bringt in die Gestaltung der lokalen Witterungsverhältnisse gegenüber dem Umland andere oder differenzierte Steuerungsgrößen und Faktoren ein. Zu nennen wären die erhöhte Absorption kurzweiliger Strahlung städtischer Baumaterialien sowie die daraus resultierende größere Ausstrahlungsmenge langweiliger Strahlung. Durch höhere Schadstoff- und Partikelkonzentrationen aufgrund der Emissionen aus Verkehr, Industrie und Hausbrand ist auch der Effekt verstärkter Gegenstrahlung zu erkennen. Ebenfalls für weitere Erwärmung sorgt die gegenüber dem Umland geringere Luftfeuchtigkeit durch Fehlen von Grünflächen (Evapotranspiration) und Wasserkörpern (Verdunstung) oftmals zugunsten der Versiegelung von Flächen, die zu einem raschen Abfließen von Niederschlagswasser in die Kanalisation führen und Boden-Luft-Feuchtigkeitsaustausch unterbinden (vgl. JACOBET 1986, S. 60). Daraus resultiert der wohl bekannteste Effekt definiert als die Überhitzung des Stadtkörpers gegenüber dem Umland, weshalb man von einer städtischen Wärmeinsel, engl. „urban heat island“ (UHI) spricht, deren Ausprägung man anhand des „urban heat index“ kategorisiert, wobei höchste Werte in der ersten Hälfte sommerlicher Nächte bei austauscharmer Wetterlage erreicht werden. Außerdem leidet in Städten bei fehlender Zirkulation zwischen Stadt und Umland die Luftqualität unter anthropogenen Emissionen gasförmiger Luftschadstoffe und Feinstäube (vgl. KUTTLER 2008).

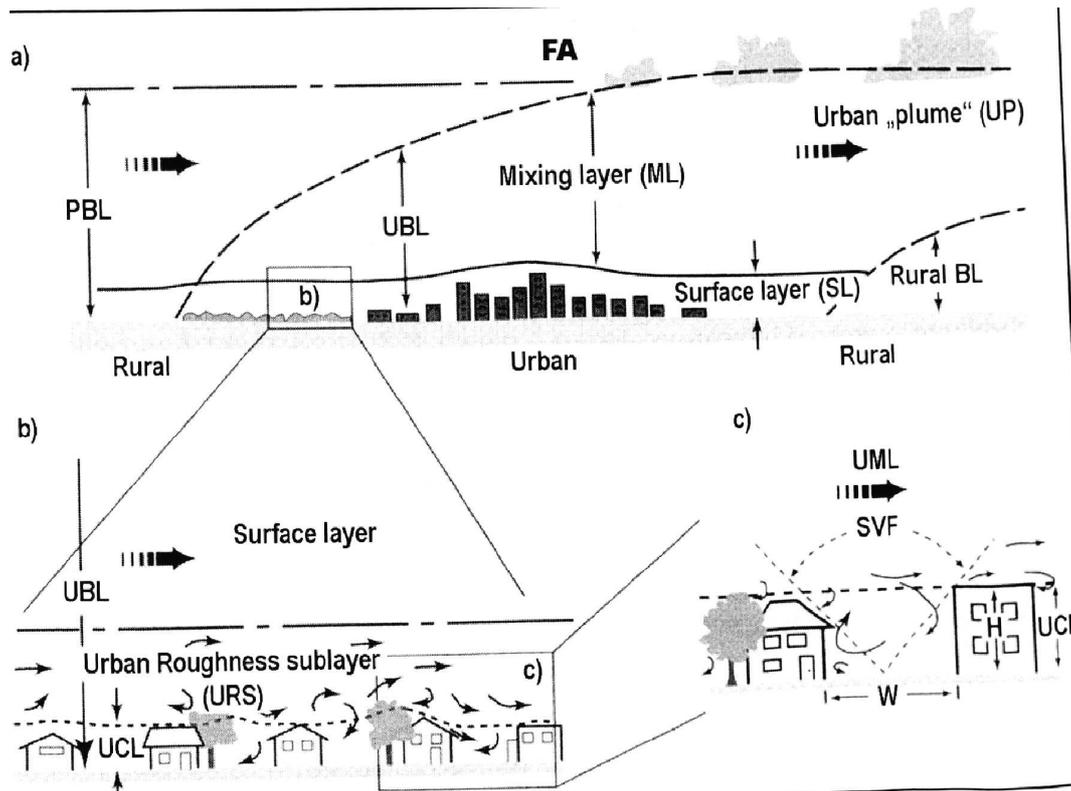


Abbildung 5: Aufbau der urbanen Grenzschicht (Quelle: HUPFER/KUTTLER 2006, S. 381)

Der Einfluss eines Stadtkörpers, der sich auf Temperatur-, Wind- und Feuchteverhältnisse bezieht, ist v. a. in der bodennahen Schicht bemerkbar, aber auch darüber hinaus noch nachweisbar, verschwindet allerdings spätestens in der freien Atmosphäre (vgl. HELBIG, A. 1987, S. 18). Gemäß dieser Modifikation der Luftschichten lässt sich die Stadtatmosphäre in verschiedene Schichten einteilen, die sich besonders bei windschwachen, strahlungsreichen Wetterbedingungen ausbilden (vgl. Abb. 5). Durch die Dichte und Struktur der Bebauung, sowie aufgrund der dadurch hervorgerufenen erhöhten Rauigkeit, findet über dem Stadtkörper eine zum Umland verschiedene Schichtung des PBL statt. Sie besitzt im Idealfall eine markante Grenze zum unbeeinflussten PBL, bzw. zur freien Atmosphäre und wird alle Teilschichten eingeschlossen als Stadtgrenzschicht, engl. „urban boundary layer“ (UBL), bezeichnet. Wie hier bereits angedeutet lässt sich der UBL in verschiedene weitere Unterschichten einteilen. Den untersten Bereich definiert die Stadthindernisschicht, engl. „urban canopy layer“ (UCL), deren obere Grenze sich etwa auch dem mittleren Dachniveau befindet. Zusammen mit der sich darüber befindlichen ebenfalls stark von der Oberflächenrauigkeit geprägten Schicht bildet sie die Stadtreibungsschicht, engl. „urban roughness sublayer“ (URS).

Erst darüber folgen Schichten mit ähnlichen Eigenschaften wie die der bodennahen Grenzschicht über freier Oberfläche und der Ekman'schen Schicht. Letztere wird schließlich als städtische Mischungsschicht, engl. „urban mixing layer“ (UML), bezeichnet. Die

vertikale Erstreckung der UBL steigt leeseitig der windzugewandten Stadtgrenze, wobei ihre obere Grenze unter Umständen auch weit hinter dem Stadtkörper erhalten bleibt und damit, während sich über dem Umland von der Landoberfläche her eine neue PBL aufbaut, eine Abluffahne, engl. „urban plume“, mit den Eigenschaften der UML (vgl. HUPFER, P. & KUTTLER, W. 2008, S 381). Der Effekt der „urban plume“ ist dann im Lee der Stadt noch über weite Strecken zu beobachten und muss beim Vergleich von Daten von verschiedenen Messstandorten (z.B. Innenstadt, Vorstadt, Umland) berücksichtigt werden.

3.7 Die Mischungsschicht

Der Begriff Mischungsschicht wird meist bei der Betrachtung des CBL genannt, da hier aufgrund der hohen Turbulenz eine gute Durchmischung stattfindet. Auch im Themenfeld der Stadtklimatologie (vgl. 3.6) wurde bereits der Begriff des UML eingeführt, darüber hinaus ist aber die Existenz einer Mischungsschicht nicht auf einen Stadtkörper beschränkt. Innerhalb der Mischungsschicht dispergieren Luftbeimengungen, weshalb es für Fragen der Luftreinhaltung und Sauberkeit der Luft von Bedeutung ist, über welche vertikale Erstreckung Partikel verteilt werden, da bei einer nur geringmächtigen Schicht höhere Schadstoffkonzentrationen zu erwarten sind. SEIBERT e. a. definieren die Mischungsschichthöhe, engl. mixing layer height (MLH) als

„the height of the layer adjacent to the ground over which pollutants or any constituents emitted within the layer or entrained into it become vertically dispersed by convection or mechanical turbulence within a time scale of about an hour.“ (SEIBERT 1999)

Somit ist die Betrachtung der Partikelverteilung bereits ein wichtiges Element bei der Analyse der Mischungsschicht, und deren obere Grenze ist erreicht, wenn eine Durchmischung nicht mehr stattfindet und sich damit die Partikelkonzentration ändert. Dies ist der Fall bei Abnahme der Turbulenz mit der Höhe oder durch Temperaturinversionen, beide Fälle sind natürlich nicht immer getrennt voneinander. Im Sinne dieser Vorgehensweise zur Festlegung der Eigenschaften der ML können also zwei maßgebliche Kriterien benannt werden, nämlich die gute Durchmischung zum einen und zum anderen die Begrenzung nach oben hin zum anderen.

Beide Kriterien sind allerdings nicht immer vorhanden: bei vertikal durchgehend hohen Windgeschwindigkeiten kann ein fließender Übergang von der EKMANN-Schicht zur freien Atmosphäre stattfinden, wodurch keine klare obere Grenze festzustellen ist,

streng genommen aber immer noch von einer Mischungsschicht gesprochen werden kann, oder aber es bildet sich in einem anderen Fall eine klare Grenzschicht zum Beispiel durch eine Strahlungsinversion aus, deren Unterschicht allerdings wenig Turbulenz aufweist.

Bezieht man also den Aspekt der Reinhaltung der Luft in die Überlegungen zur Mischungsschicht mit ein, spielt auch der SBL neben dem CBL eine Rolle, da die oft klare Begrenzung des SBL durch eine Temperaturinversion und deren im Vergleich zum CBL geringe Höhe große Auswirkungen auf Schadstoffkonzentrationen in der Luft haben können. Unter diesen Voraussetzungen wird im Folgenden die Annahme gemacht, dass auch in der SBL genügend Turbulenz vorhanden ist und somit die Obergrenze der SBL als MLH bezeichnet werden kann.

Im Hinblick auf die Sauberkeit der Luft muss weiterhin beachtet werden, dass unter bestimmten meteorologischen Voraussetzungen (keine Advektion, stabiler CBL) eine Residualschicht über Nacht, während sich bodennah ein SBL ausbildet, erhalten bleiben kann, die am folgenden Tag, wenn sich der SBL wieder auflöst, die gespeicherten Schadstoffe des Vortages wieder freisetzt.

Damit sind also die Grundlagen, die zur Erkundung der atmosphärischen Grenzschicht Voraussetzung sind, dargelegt worden, nun soll näher ins Detail gegangen werden, indem eine Beschreibung der Messsysteme und deren Standorte durchgeführt wird.

4. Messungen in Augsburg

Im Zuge einer Messkampagne des IMK-IFU wurden in Augsburg verschiedene Messsysteme installiert, die eine kontinuierliche Messung verschiedener Luftparameter bewerkstelligen. Die Messsysteme beinhalten ein Ceilometer im Innenstadtbereich und ein baugleiches Ceilometer im Nordosten von Augsburg, wenige Meter vom letztgenannten entfernt ein SODAR/RASS, sowie etwa 300 Meter südlich davon verschiedene Messgeräte zur Bestimmung von Luftschadstoffen. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Diplomarbeit waren diese Messsysteme noch aktiv und es war vorgesehen, diese noch einige Zeit weiter laufen zu lassen. Desweiteren werden Daten von Radiosondenaufstiegen des DWD bei München-Oberschleißheim verwendet. Im Folgenden sollen die Funktionsweise, die Standorte und typische Probleme kurz behandelt werden.

4.1 Standorte

4.1.1 Standort FH

Seit Herbst 2006 wird im Rahmen der Kooperativen Gesundheitsforschung in der Region Augsburg (KORA) auf einem Messcontainer an der Fachhochschule in Augsburg ein CL31-Ceilometer betrieben, dessen Daten zu verschiedenen Partikeluntersuchungen hinzugezogen werden und auch in diese Studie eingehen. Der Standort wird im Folgenden als Standort FH oder nur FH bezeichnet und bildet den Innenstadtmesspunkt, da sich die FH von Augsburg südlich der Altstadt und damit im Kernbereich der Stadt und etwa 300 m westlich der Bundesstraße B300 befindet.

Die Messcontainer der KORA sind am südwestlichen Rand des FH-Geländes aufgestellt, nördlich schließen sich die Gebäude der FH, südlich der Betriebshof der Straßenbahnen der Stadtwerke an. Anfang Juli 2009 wurden die Messcontainer um etwa 5 m nach Süden versetzt im Zuge von Bauarbeiten, die über den gesamten Messzeitraum andauerten.



Abbildung 6: Luftbildaufnahme Standort FH. (Quelle: GOOGLE EARTH, 15.05.2009)



Abbildung 7: Messcontainer an der FH, Ceilometer mittig auf dem rechten Container. (Quelle: eigenes Foto, Jun. 2009)

Die Abbildungen 6 und 7 sollen einen Eindruck von dem Messstandort geben und als Überblick dienen. Im Anhang A (Abb. 56) ist die räumliche Verteilung der Messstandorte im Stadtgebiet von Augsburg zu sehen.

4.1.2 Standort AVA

In Norden der Stadt Augsburg befindet sich auf dem Gelände der Abfallverwertung Augsburg GmbH, im Folgenden als Standort AVA, nur AVA oder Standort Augsburg Nord bezeichnet, der zweite Messstandort, an dem das zweite Ceilometer sowie das SODAR/RASS stehen. Die Messsysteme sind am nördlichen Ende des Geländes der AVA installiert zwischen der nördlichsten Arbeitshalle der AVA und der Autobahn A8, die sich in etwa 150 m Entfernung befindet (vgl. Abb. 8 und 9).



Abbildung 8: Luftbildaufnahme des Standortes AVA (Quelle: GOOGLE EARTH, 15.05.2009)



Abbildung 9: Messsysteme am Standort AVA. im Vordergrund das Ceilometer, mittig die SODAR-Antennen, bzw. rechts und links davon die RASS-Antennen (Quelle: eigenes Foto, Mrz. 2010)

4.1.3 Standort BlfA

Etwa 700 m südlich des Standortes AVA ist der Messwagen des IMK-IFU auf dem Freigelände der BlfA Umweltinstitut GmbH stationiert, dort finden die Schadstoffmessungen statt. Etwa 30 m nördlich der Messsysteme schließen sich die Gebäude des Umwelt-Technologie Gründerzentrums (UTG) sowie ca. 40 m östlich die des BlfA Umweltinstitutes an (vgl. Abb. 10 und 11). Dieser Standort wird im fortlaufenden Text als Standort BlfA oder nur BlfA bezeichnet.



Abbildung 10: Luftbildaufnahme des Standortes BifA. (Quelle: GOOGLE EARTH, 15.05.09)



Abbildung 11: Messwagen des IMK-IFU am Standort BifA. Links neben dem Messwagen: LD40-LIDAR (links), PM10-Messgerät (rechts), USA auf dem Dach, Ansaugkopf für Schadstoffmessung im Bild rechts neben dem Sendemast im Hintergrund. (Quelle: eigenes Foto Mrz. 2010)

Somit besteht zwischen SODAR/RASS und einem Ceilometer hinsichtlich der Nähe sehr gute Übereinstimmung, die In-Situ-Messungen der Schadstoffe finden in akzeptabler Entfernung dazu statt, mit dem Ceilometer im Innenstattbereich ist ein weiterer Vergleichspunkt gegeben.

Nachdem nun die äußeren Bedingungen beschrieben worden sind, soll der Blick auf die Messsysteme selbst gelenkt werden.

4.2 Beschreibung der Messsysteme

4.2.1 Die Ceilometer

4.2.1.1 Funktionsweise

Die Ceilometer an der AVA und FH sind augensichere LIDAR-Geräte der Firma VAISALA, es handelt sich um baugleiche Messsysteme, weshalb die folgenden Angaben zur Funktionsweise für beide Geräte gelten (vgl. Abb.12).

Die Entwicklung der Ceilometer zielte unter anderem darauf ab, Wolkenhöhen und Sichtweiten zu bestimmen, allerdings lassen sich damit auch weitere Parameter wie eben etwa die Mischungsschichthöhe oder Staubkonzentrationen anhand gewisser Annahmen zur Partikelverteilung ableiten (vgl. VAISALA 2006).

Zur Bestimmung der MLH wird davon ausgegangen, dass Aerosole in der Mischungsschicht aufgrund der Turbulenz höhenunabhängig gleich verteilt sind und die Konzentration höher als in der darüber liegenden Schicht ist. Gemäß dieser Annahmen ist die MLH dadurch definiert, dass hier der Gradient der optischen Rückstreuintensitäten im Grenzbereich zweier Schichten mit unterschiedlichen Partikelkonzentrationen einen von der Datenmittelung abhängigen Schwellenwert unterschreitet.

Für die Messung wird ein Lichtimpuls im nahen Infrarotbereich – im Rahmen dieser Messkampagne senkrecht – in die Atmosphäre gesendet, der an Luftpartikeln (MIE-Streuung) oder –Molekülen (Rayleigh-Streuung) gestreut und damit teilweise zurückgestrahlt wird. Somit kann, während der Lichtimpuls die Atmosphäre durchquert, ein Höhenprofil der Rückstreuintensität, deren Stärke unter anderem von der Partikelkonzentration abhängt, erstellt werden, da sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtimpulses (Lichtgeschwindigkeit), als auch die Zeit, die für die Strecke vom Sender zum Streukörper zum Empfänger benötigt wird, bekannt ist.

Die zu dem empfangenen Signal gehörende Höhe berechnet sich demnach aus:

$$h = \frac{1}{2} * c * t$$

mit c = Lichtgeschwindigkeit und t = Zeitspanne zwischen Senden und Empfangen (vgl. VAISALA 2006).

Die etwa einen Meter hohen CL31-Ceilometer besitzen unterdessen einen innovativen Aufbau mit nur einer Linse, im Unterschied dazu haben ältere Geräte wie etwa das ebenfalls vom IFU bei verschiedenen früheren Untersuchungen genutzte LD40 zwei separate Linsen für Senden und Empfangen (vgl. EMEIS 2006). Das System des CL31 mit nur einer Linse ist möglich, indem ein schräg gestellter Spiegel das zurück gestreute Signal an den Empfänger leitet, durch ein Loch in der Spiegelmitte kann der Lichtimpuls vom Sender ausgegeben werden. Der Spiegel ist zwischen Sender bzw. Empfänger und der Linse angebracht, welche das ausgehende Signal bündelt, wobei durch das Loch im Spiegel das ausgesandte Licht auf den inneren Bereich der Linse, der die Bündelung vornimmt, beschränkt wird, und das ankommende Signal im äußeren Bereich der Linse, während der innere Teil der Linse ausgespart bleibt, auf den Empfangsbereich fokussiert. Dieser Aufbau bewirkt zudem eine früher einsetzende Überlappung von Sendelichtkegel und Empfangsgesichtsfeld, was eine Messung in geringeren Höhen als beim Betrieb von Geräten mit separaten Linsen möglich macht. Belastbare Daten sind ab einer Höhe von etwa 30 Meter verfügbar.



Abbildung 12: Ceilometer CL31 an der AVA Augsburg (eigenes Foto, Mrz 2010)

4.2.1.2 Probleme

Ein bereits bekannter Mangel der MLH-Bestimmung mit Ceilometern zeigt sich am Spätnachmittag von Strahlungstagen, wenn sich die Konvektive Grenzschicht auflöst und sich eine schwache stabile Grenzschicht bildet, die Aerosolverteilung der CBL aber noch eine gewisse Zeit erhalten bleibt und somit weiterhin eine Mischungsschicht vermutet wird, auch wenn effektiv keine Durchmischung mehr stattfindet.

Die oben gestellten Annahmen bezüglich der Partikelverteilung in der Grenzschicht (vgl. 4.2.1.1) setzen allerdings örtliche bodennahe Quellen voraus, advektiv herangetragene Aerosole oder Akkumulationen über längere Zeiträume können zu fehlerhaften Interpretationen führen. Dennoch wird im Folgenden dieser Sachverhalt vernachlässigt und die Ceilometerdaten unter den gestellten Annahmen verwertet, da keine Informationen über horizontal angetragene Aerosolschichten vorhanden waren.

Eine weitere Beschränkung der Ceilometermessung bilden Wolken und Niederschlag, bei denen ab einer bestimmten Begrenzung der Sichtweite das Signal verschluckt wird und keine verwertbaren Rückstreuintensitäten mehr registriert werden können und somit die vertikale Erstreckung des Messfeldes limitiert wird. Daher kann im Fall von

Wolken nur deren Untergrenze als MLH definiert werden, sofern keine tiefer liegende MLH erkannt wird. Bei Niederschlag wird keine MLH registriert und nur die Wolkenhöhe angegeben.

Für den Betrieb der Ceilometer ist Hardware in Form eines PCs oder Laptops mit entsprechender Software notwendig, Stromversorgung und freies Sichtfeld. Zudem sollte die Linse regelmäßig auf Verschmutzungen überprüft werden. Beim Standort AVA kam es zu Stromausfällen, wenn das Stromkabel, das die Messsysteme mit der Netzsteckdose im nächsten anliegenden Gebäude der AVA verbindet, betriebsbedingt kurzzeitig ausgesteckt werden musste. Die Messsysteme wurden vor Überspannungen durch einen FI-Schalter geschützt, der bei Stromausfällen auslöste und wieder von Hand entsichert werden musste; bei vorhandener Stromversorgung ist das Betriebssystem für automatischen Start eingerichtet, sodass Datenlücken möglichst gering bleiben. Darüber hinaus ist das Ceilometer-Messsystem wenig anfällig für äußere Einflüsse.

4.2.2 SODAR/RASS

4.2.2.1 Funktionsweise

Im Folgenden soll die Funktionsweise eines monostatischen SODAR-Gerätes, wie es in der Messkampagne in Augsburg verwendet wurde, beschrieben werden.

Prinzipiell funktioniert das Messsystem, indem ein Schallimpuls von einer Antenne in die Atmosphäre ausgesendet wird, der teilweise an Temperatur-Inhomogenitäten reflektiert und von einem Empfänger aufgezeichnet wird. Diese können beispielsweise als Folgen von thermischer Turbulenz oder bei Gradienten von Temperaturinversionen auftreten. Dabei wird die Entfernung der Inhomogenität zum Empfänger anhand der Laufzeit der Schallwelle bestimmt. Die Frequenz des zurückgestreuten Signals verschiebt sich bei sich bewegenden Materien gemäß der Bewegungsrichtung. Bewegt sich beispielsweise eine Inhomogenität auf den Empfänger zu, erhöht sich die Frequenz, bewegt sie sich von ihm weg, so verringert sich die Frequenz. Dieser Mechanismus wird als Doppler-Effekt bezeichnet.

Bei dem SODAR am Standort AVA handelt es sich um ein Gerät der Firma METEK mit der Kennung DSD3x7, welches jeweils im Abstand von wenigen Sekunden einen Schallimpuls im Größenbereich von 1600 Hz aus einem der drei Sender abgibt. Da es sich um ein monostatisches Gerät handelt, dienen die Antennen sowohl als Lautsprecher als auch als Mikrofon, nach dem Senden eines Signals werden die

Antennen auf Empfang umgeschaltet. Dem üblichen Aufbau gemäß ist eine der drei Antennen (A3) senkrecht angebracht, die weiteren zwei Antennen leicht geneigt (Antenne A2: Zenitwinkel 15°, Azimutwinkel 57°; Antenne A1: Zenitwinkel 15°, Azimutwinkel 327°). Die beiden geneigten Antennen haben in ihrer Ausrichtung zueinander einen Winkel von 90° (vgl. Abb. 9). Die vertikale maximale Reichweite beträgt 550 m, die minimale Höhe beträgt 30 m. Die Mindesthöhe ist in der Regel durch die Geräteparameter bestimmt, da sie durch die Dauer des Umschaltens von Senden auf Empfangen beschränkt ist. Die maximale vertikale Reichweite ist einerseits von den Geräteparametern abhängig, andererseits beeinflussen äußere Bedingungen wie Windgeschwindigkeit oder Lärm die Qualität des zurückgestreuten Signals, was zu einer Verminderung verwertbaren Datenmaterials führen kann. Die Höhenauflösung ist eine Mittelung über 20 m, was einen untersten Datenpunkt bei 40 m und einen obersten Datenpunkt bei 540 m ergibt. Die erhaltenen Daten sind also eher als Volumenmessungen anzusehen. Weiterhin ist eine zeitliche Mittelung über 10 Minuten eingestellt. Durch die Nutzung von drei Antennen in drei unterschiedlichen Ebenen kann anhand der drei Windvektoren ein Profil der horizontalen Windgeschwindigkeit, der vertikalen Windkomponente (Varianz des Vertikalwindes, δw) und deren Standardabweichung sowie der Windrichtung erstellt werden.

Es ist möglich für die exaktere Temperaturprofilbestimmung ein SODAR-Gerät mit einem RASS-Gerät zu auszubauen. Am Standort AVA in Augsburg beinhaltet die Erweiterung mit einer RASS-Komponente zwei Radarantennen jeweils 2,5 m von dem Schallimpulsgeber entfernt, deren Senderantenne bei einer Leistung von 20 W im Bereich von 474 MHz arbeitet. Der Schallimpuls wird mit der senkrechten SODAR-Antenne A3 (im RASS-Modus als AR bezeichnet) und 85% der möglichen Lautstärke (SODAR-Modus 100%) erzeugt. Alle weiteren Einstellungen entsprechen denen des SODAR. Der übliche Messfehler der Temperaturbestimmung mittels RASS liegt bei diesem Gerät bei etwa 0,3 K (alle Einstellungen sind nochmals in Tabelle 2 aufgeführt). Im RASS-Modus wird die Ausbreitung der Schallwellen mittels Radarwellen aus der Senderantenne verfolgt, an der Wellenfront ändert sich die Dielektrizitätskonstante der Luft kurzzeitig und die elektromagnetische Welle wird reflektiert und von der Empfängerantenne aufgezeichnet. Da die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist erfährt die Radarwelle dem entsprechend eine Frequenzverschiebung (Dopplereffekt), aus der zunächst die Schallgeschwindigkeit und schließlich die Temperatur berechnet werden kann.

Tabelle 2: Einstellungen des SODAR/RASS

Einstellungen SODAR/RASS:	
Max. Reichweite:	550 m
Min. Höhe:	30 m
Höhenauflösung:	20 m
Zeitl. Mittelung:	10 min
Frequenz SODAR:	1600 Hz
Frequenz RASS:	474 MHz
Genauigkeit RASS:	0,3 K

4.2.2.2 Probleme

Wie oben bereits angesprochen (vgl. 4.2.2.1) ist die Qualität des Datenmaterials auch abhängig von den äußeren Bedingungen, die am Messstandort herrschen.

Zu hohe Windgeschwindigkeiten können dazu führen, dass das ausgesendete Signal zu stark verdriftet wird und keine Rückstreuung empfangen werden kann. Zudem ist eine Messung nur bei Temperaturen von -35°C bis +45°C belastbar, da die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist. Weitere meteorologische Störeinflüsse sind Schnee und Eis, welche den Empfang behindern, weshalb in der Regel die Antennen beheizt sind. Auch Regen wirkt sich negativ auf den Empfang aus, sowie Verunreinigungen wie etwa Laub.

Da die Empfänger nicht nur die Rückstreuung des ausgesendeten Signals aufnehmen, sondern sämtliche Schallwellen, die im Empfangsbereich liegen, muss der Umgebungslärm beachtet werden. Dies betrifft einzeln und punktuell auftretende Geräuschquellen jeglichen Ursprungs wie zum Beispiel Fahrzeuginnenraumgeräusche oder Vogelstimmen. Am Standort Augsburg Nord befinden sich unweit der Messgeräte die Gebäude der AVA deren nördlichste Halle etwa 100m entfernt ist, weshalb man hier Lärmquellen durch Geräusche des allgemeinen Arbeitbetriebs wie etwa Öffnen und Schließen der Hallentore, Rangieren von Fahrzeugen und ähnliches beachten muss. Nördlich des Messstandortes in etwa 200m Entfernung befindet sich die Autobahn A8, die Hauptverkehrsverbindung zwischen Stuttgart, Augsburg und München, die ebenfalls als Fehlerquelle Beachtung finden muss.

Hindernisse wie etwa Gebäude oder Bäume, die sich im Ausbreitungsbereich der Schallwelle befinden, können zu einer beständigen Reflexion des Signals führen und sind im Datenmaterial als Festecho in einem bestimmten Höhenbereich zu erkennen

und sollten vermieden werden indem die nicht senkrecht stehenden Antennen von Hindernissen weg gerichtet sein sollten.

Die im vorhergehenden Absatz angesprochene Halle der AVA bildet ein Hindernis, dessen Festecho sich in den Daten bis in eine Höhe von etwa 120m bemerkbar macht, worauf, wie später noch gezeigt werden wird (vgl. 5.2), reagiert werden muss. Jenseits der Autobahn A8 befindet sich zudem eine Waldgrenze, die bei bestimmten Wetterlagen ebenfalls zu einem Festecho führen kann, jedoch ist das Festecho des AVA-Gebäudes so markant, dass es allenfalls zu einer Verstärkung kommt, die aber nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Anhand des Sodargramms der Profile der akustischen Rückstreuintensität vom 12.12.09 ist gut das Festecho erkennbar. Vor allem im Niveau von 80 m, in der Nacht von 0:00 Uhr bis ca. 7:00 Uhr weisen erhöhte Rückstreuintensitäten, die den ganzen Tag über im selben Niveau erkennbar sind (gelbe bis rote Markierung) auf das Vorhandensein eines Festechos hin (vgl. Abb. 13).

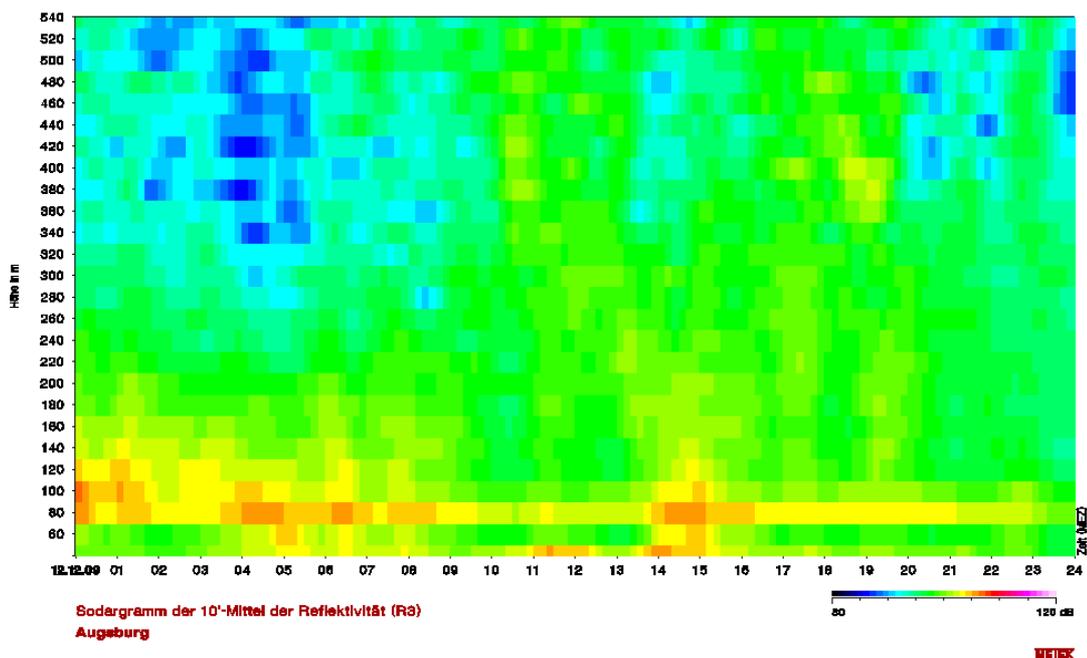


Abbildung 13: Festecho im Sodargramm der Reflektivität am 12.12.09. (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Desweiteren muss beachtet werden, da das ausgesendete Signal im hörbaren Schallwellenbereich liegt, dass Anlieger nicht durch die Messung gestört werden. Da sich allerdings am Standort AVA keine Wohnsiedlungen oder empfindliche Biotope befinden, eignet sich dieser Standort gut für den SODAR-Betrieb, da durch die AVA zudem der nötige Platz, wie auch die Stromversorgung bereitgestellt wird.

Fehlerquellen, die hier beschrieben worden sind, haben in der Auswertung der Rohdaten durch Plausibilitätsabfragen und Datenbegrenzung auf belastbare Daten und bei der Bearbeitung der Daten durch die Verwendung eines Filters Beachtung gefunden, was in Abschnitt 5.2 noch genauer gezeigt werden wird.

4.2.3 Schadstoffmessung

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung liegen Daten von Schadstoffkonzentrationen aus dem Messprogramm des IMK-IFU mit begrenzter Verfügbarkeit vor, es handelt sich um Konzentrationen von NO/NOX-, CO- und PM10, die am Standort BlfA gemessen wurden. Dabei handelt es sich um die Rohdaten, an denen noch keine Qualitätsprüfung vorgenommen wurde und die daher nur exemplarisch für das Aufzeigen gewisser Korrelationen in der weiteren Bearbeitung verwendet werden sollen. Dies ist zu beachten!

Die Messungen finden auf dem Feigelände des BlfA im Norden von Augsburg statt und werden regelmäßig (zweimal pro Woche) kontrolliert und betreut, zudem werden in regelmäßigen Abständen Kalibrationen der Messgeräte durchgeführt, einmal pro Jahr wird der Messwagen am Landesamt für Umwelt, das ebenfalls Schadstoffmessungen durchführt, für Vergleichsmessungen stationiert. Neben den erwähnten werden Messungen des Ozon und meteorologischer Parameter vorgenommen, die aber hier keine weitere Verwendung finden.

4.2.4 Radiosonden

Die Daten von Radiosondenaufstiegen des DWD bei Oberschleißheim stehen ebenfalls zur Verfügung, aus denen die Parameter Temperatur und Luftfeuchte verwendet werden. Die Aufstiege finden täglich sofern möglich um 0:00 Uhr und 12:00 Uhr statt.

4.3 Datenverfügbarkeit

Da es sich bei den Messsystemen SODAR/RASS und LIDAR um Profilmessungen handelt, sind bei der Betrachtung der Datenverfügbarkeit sowohl eine zeitliche wie eine räumliche Komponente zu beachten. Aufgrund der technischen und logistischen Voraussetzungen kommt es trotz regelmäßigen Kontrollen (bei dieser Messkampagne etwa zweimal in der Woche) und Wartung der Messsysteme zu Ausfällen, die die Datenaufzeichnung beeinflussen. In der im Anhang befindlichen Tabelle (vgl. Anhang A, Tabelle 3) sind die Messausfälle aufgelistet, die aufgrund der oben beschriebenen Probleme zu verzeichnen sind.

Obwohl die Ceilometer eine vertikale Reichweite von mehreren 1000 m haben, ist zu beachten, dass nicht zu jedem Zeitpunkt die maximale Profilhöhe erreicht werden kann, da das optische Signal einer Streuung unterliegt und somit bei geringen Sichtweiten etwa aufgrund von Bewölkung keine ausreichende Rückstreuung erfasst wird.

Die akustische Rückstreuintensität von SODAR und RASS unterliegt in der Regel ebenfalls einer Abschwächung mit zunehmender Höhe, zudem ist die Reichweite gerätbedingt auf maximal 550 m festgelegt. Die Messung wird durch weitere äußere Einflüsse (akustische Störungen, hohe Windgeschwindigkeiten) beeinflusst, so dass die vertikale Datenverfügbarkeit vermindert wird.

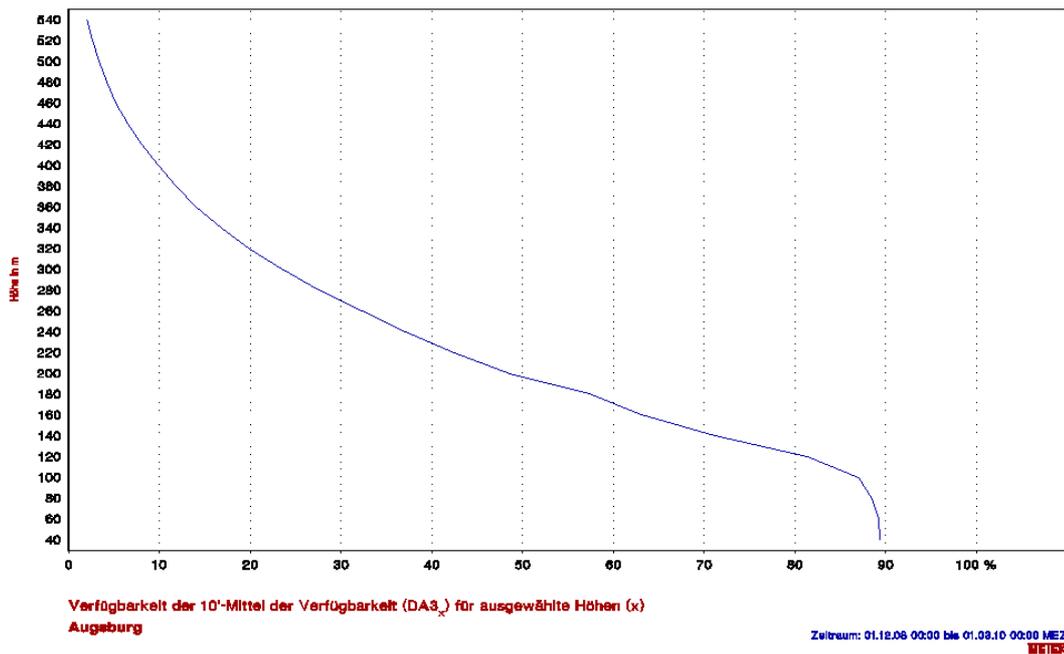


Abbildung 14: Datenverfügbarkeit SODAR/RASS 01.12.08 - 28.02.10 (Eigene Auswertung mit METEK-Software)

Die Datenverfügbarkeit der SODAR und RASS Daten kann mit der Software des Messsystems dargestellt werden (siehe Abb. 14). Es wird die Datenverfügbarkeit ausgewählter Höhen für die Antenne A3 und den gesamten Messzeitraum 1.12.2008 bis 28.02.2010 dargestellt, dabei zeigt sich, dass mit der Höhe ein Datenverlust einhergeht. Diese Software wird schließlich auch für die erste Auswertung der Rohdaten von SODAR und RASS verwendet, bevor eine weitere Bearbeitung mit MATLAB, die auch die Daten der übrigen Messsysteme mit einschließt, durchgeführt wird. Die dabei entwickelte Vorgehensweise soll im Folgenden für die einzelnen Rohdaten dargestellt werden.

5. Datenbearbeitung

5.1 Ceilometer

5.1.1 Programmeigenschaften CL-View und CL-MH-Control

Während der Messung werden die vom Ceilometer gemessenen Daten mit der Software CL-View am PC empfangenen und gespeichert. Diese Rohdaten sind im DAT-Format vorhanden, beinhalten im Normalbetrieb Datenmaterial von sechs Stunden und werden mit einem log-letter (A für Standort FH, B für Standort AVA), dem Datum im Format „ymmdd“ („Jahr-Monat-Tag“) sowie den Startzeitpunkt der Datenaufzeichnung im Format „HH“ („Stunde“) benannt.

CL-MH-Control ist eine von der Firma VAISALA zur Verfügung gestellte Software zur Auswertung der Ceilometer-Rohdaten zur Bestimmung der MLH. Es besteht aus drei Teilen: eine graphische Oberfläche für die Konfiguration der Auswerte-Parameter (CL31 MH control.exe), ein Unter-Programm für die Erstellung der Daten-Text-Files (cl31_mh.exe) und Plots sowie einer weiteren MATLAB-Runtime-Komponente (MCRInstaller).

Bei dieser Arbeit wird mit der CL-MH-Control -Version 2.2 gearbeitet.

Vom Programm CL-MH-Control können minimal zwei und maximal vierundzwanzig Stunden ausgewertet werden, Start- und Endzeitpunkt können minutengenau bestimmt werden. Für die Datenbearbeitung im Rahmen dieser Studie werden jeweils ganze Tage von 0:00 bis 23:59 Uhr ausgewertet, für die Datenglättung wird ein Filter über 2400 Sekunden und 240 Meter als Mittelungsparameter eingestellt. Des Weiteren wird die Mindest- und Maximalhöhe für die MLH-Bestimmung auf 30 bzw. 2500 Meter festgelegt, der untere Wert ist durch die Geräteeigenschaften (niedrigere Werte sind zwar technisch möglich, aber nicht unbedingt ausreichend belastbar) und letztlich durch die Programmeinstellungen selbst definiert, ein oberer Grenzwert von 2500 Metern scheint für diese Untersuchung auch im Hinblick auf die Luftbelastungssituation genügend.

Zum Zeitpunkt der Datenauswertung lagen Radiosondendaten von Aufstiegen des DWD bei Oberschleißheim bis einschließlich Juni 2009 vor, deren Temperatur- und Feuchtedaten in die Plots der entsprechenden Tage bei Vorhandensein integriert wurden.

Alle weiteren Einstellungen folgen den Standardeinstellungen, wie sie von VAISALA empfohlen werden.

Der Programmalgorithmus ermittelt die MLH anhand der Gradientmethode, das bedeutet es wird nach einem Abfall der Rückstreuintensität gesucht, mindestens 15% bei einer Rückstreuintensität von mindestens $200 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ wurde in den Einstellungen für diese Untersuchung definiert. Daraus ergibt sich für die jeweilige Rückstreuintensität in einer bestimmten Höhe der Schwellenwert des negativen Gradienten, der zur Ausweisung einer MLH unterschritten werden muss. Dieser Algorithmus sucht pro Messintervall von unten nach oben das Rückstreuprofil ab und kann dann bis zu fünf Gradientenminima angeben, da bei dieser Untersuchung eine Maximalhöhe für die MLH-Ermittlung von 2500 Meter festgelegt wurde, ist es hinreichend, dass nur vier Gradientenminima gesucht werden.

Bei der Ermittlung der Wolkenhöhe bestimmt diese Programmversion nur eine MLH, also jeweils das unterste Gradientenminimum, weshalb dies in einem eigenen Durchlauf der Datenverarbeitung gemacht werden muss. Bei Vorhandensein von Wolken ohne Niederschlag und keiner ermittelten MLH unter dem Wolkenniveau dient die Wolkenhöhe als MLH. Diese ermittelt sich durch den strengen Abfall der Rückstreusignalstärke unter der vollständigen Absorption des Signals und bietet damit keine verlässliche Aussage über die tatsächliche Wolkenerstreckung und somit über die Prozesse in der Wolke. Desweiteren wird die Wolkenuntergrenze angegeben. Bei Niederschlag werden nur die Wolkeninformation und keine MLH angezeigt.

Der Aufbau der Textfiles, die später für die Bearbeitung mit MATLAB verwendet werden, gliedert sich von links nach rechts in einer Zeile nach den Angaben: Datum („dd/mm/yyyy“), Uhrzeit („HH:MM“), erste, zweite, dritte und vierte Höhe des Gradientenminimums (in Meter), bzw. bei der Wolkenhöhenbestimmung: Datum („dd/mm/yyyy“), Uhrzeit („HH:MM“), Höhe der MLH (unterstes Gradientenminimum, in Meter), Höhe der Wolkenuntergrenze (in Meter) (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „Ceilometerdaten“). Tabelle 4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die verwendeten Einstellungen:

Tabelle 3: Einstellungen Ceilometersoftware

Parameter	Einstellung
Zeitliche Mittelung:	2400 sec
Höhenmittelung:	240 m
Minimum Rückstreuintensität bei MLH-Bestimmung:	$200 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
Minimum der Abnahme der Rückstreuintensität für MLH-Bestimmung:	15 %
MLH-Mindesthöhe:	30 m
MLH-Maximalhöhe:	2500 m
Ausgabe Zeitintervall:	10 min
Länge der Ausgabe-Files:	1 d

5.1.2 Beschreibung der MATLAB-Software

Mit dem Programm CL-MH-Control werden zunächst aus den Ceilometer-Rohdaten bis zu vier Gradientenminima, die einen Hinweis auf die MLH geben, sowie die Höhe der Wolkenuntergrenze ermittelt und in Textfiles verarbeitet bzw. in Plots dargestellt. Die weitere Datenverarbeitung dieser TXT-Files sowie aller anderer relevanter Daten aus den übrigen Messungen dieser Messkampagne wird mit dem Programm MATLAB durchgeführt. Da also MATLAB die Grundlage der Datenverarbeitung in dieser Studie bildet, soll hier zunächst ein kurzer Überblick über dessen Programmstruktur gegeben werden, woraufhin im folgenden Kapitel 5.1.3 und in den Kapitel 5.2.2 und 5.3.2 die verwendeten Skripten jeweils genauer erläutert werden sollen.

Das Programm MATLAB wurde 1970 basierend auf der Programmiersprache C in den USA entwickelt mit dem Ziel, einfaches wissenschaftliches Rechnen zu ermöglichen. Der Name leitet sich ab aus der Bezeichnung „MATrix LABoratory“. Die Programmstruktur besteht im Grunde aus einem Eingabefenster, in dem in der MATLAB eigenen Programmiersprache geschriebene Befehle, Programme oder Funktionen ausgeführt werden können, sowie einem Arbeitsspeicher (Workspace), in dem die verwendeten und/oder erzeugten Variablen gespeichert werden. MATLAB besitzt eine Vielzahl eigener Programme und Funktionen für mathematische Matrixoperationen, darüber hinaus können vom Benutzer eigene Funktionen und

Skripte erstellt werden. Diese bilden jeweils eine Bündelung von Befehlen, der Unterschied besteht darin, dass bei Funktionen Input und Output vor der Ausführung definiert werden, um komplexe Berechnungen übersichtlicher zu gestalten. Im Rahmen dieser Arbeit genügt es Scripts zu erstellen, da diese leichter zu bearbeiten und umzuändern sind. Schließlich bleibt noch zu erwähnen, dass mit der MATLAB-Version 7.4.0.287 (R2007a) gearbeitet wird.

5.1.3 Bearbeitung der Ceilometerdaten mit MATLAB

Für die Bearbeitung in MATLAB können TXT-Files mit Hilfe eines Import-Befehls in den aktuellen Workspace geladen werden. Um bei späteren Aktionen häufiges Laden von einzelnen Files vermeiden zu können, wird hier eine Matrix der Ceilometerdaten jeweils eines Standorts über den ganzen zu betrachtenden Messzeitraum erzeugt, auch wenn der Nachteil dieser Methode aufgrund der Größe der entstehenden Matrix lange Rechenzeiten bedeutet.

Zunächst wird also ein Zeitvektor über den Messzeitraum mit zehn-Minuten-Schritten, wie auch die Messdaten vorliegen, erstellt, woraufhin in einer Schleife die Daten der einzelnen Tage importiert und den jeweiligen Zeitpunkten zugeordnet werden, bei nicht vorhandenen Tagen und bei keiner detektierten MLH wird „NaN“ (engl. „not a number“) eingesetzt. Ergebnis ist eine Matrix, die in der ersten Spalte die Information über den Messzeitpunkt enthält und in den nächsten vier Spalten die Höhen der Gradientenminima, wenn vorhanden, dem Wert nach sortiert (niedrigster Wert in der ersten Spalte). Es zeigt sich, dass die Daten im zeitlichen Verlauf immer wieder relativ große Sprünge in den Höhen aufweisen, dies ist der Fall, wenn eine tiefere Schicht detektiert oder nicht mehr erkannt wird. Das Auftreten einer bodennahen Struktur über einen nur kurzen Zeitraum verursacht dabei eine besondere Problematik, da bei einer zeitlichen Mittelung die Höhe der relevanten Struktur unterschätzt wird. Die oben genannte Definition der MLH berücksichtigt die Dispersion von Schadstoffen über eine Zeitskala von etwa einer Stunde, unter der Voraussetzung, dass sich das Zeitintervall bei geringen Höhen verkürzt, wird dennoch im folgenden davon ausgegangen, dass extrem kurze Events dem per Definition gegebenen Anspruch nicht mehr genügen. Daher werden Ereignisse mit maximaler Dauer von 30 Minuten nicht beachtet. Durch die Anwendung eines gleitenden Mittels auf die MLH über das gleiche Zeitintervall später soll dieses Vorgehen zusätzlich gerechtfertigt sein.

Um diese kurzzeitigen Strukturen zu finden werden die mit dem Programm CL-MH-Control ermittelten Werte in Höhengniveaus eingeordnet. Dazu wird zunächst die Datenmatrix um eine leere Spalte für bodennahe Werte am Anfang sowie eine leere Spalte am Ende für höchste Werte erweitert. Nun werden die Werte der zweiten Spalte, also das unterste ermittelte Gradientminimum, mit dem Mittelwert der vorhergehenden existierenden Werte innerhalb von 50 Minuten, dies entspricht maximal fünf Werten, und mit einem festgelegten Wert für das unterste Niveau von 50m verglichen, da festgestellt werden kann, dass kurzzeitige Ereignisse oft im Höhenbereich von 40 bis 80m auftreten. Anhand der Differenz des aktuellen Wertes mit dem Mittelwert bzw. dem Bodenwert lässt sich entscheiden, welcher Struktur der Wert voraussichtlich angehört. Ist es nötig, den Wert zu verschieben, werden auch die übrigen Daten des Messzeitpunktes entsprechend versetzt, da anzunehmen ist, dass das zweite Gradientminimum der vorhergehenden Struktur entspricht. Es ist zu beobachten, dass bei der Ausbildung kurzzeitiger Ereignisse im bodennahen Bereich zum Teil mehrere Gradientminima unter einer zeitlich relativ konstanten Struktur erfasst werden. Abbildung zeigt beispielhaft eine derartige Struktur: während bei ca. 850 bis 700 m eine zeitlich konstante Struktur vorhanden ist, wird diese durch kurzzeitiges Auftreten einer tiefer liegenden Schichtung unterbrochen.

Datei	Bearbeiten	Format	Ansicht	?
15/02/2010	12:00	439	849	0 0
15/02/2010	12:10	849	0	0 0
15/02/2010	12:20	799	0	0 0
15/02/2010	12:30	779	0	0 0
15/02/2010	12:40	399	849	0 0
15/02/2010	12:50	319	759	0 0
15/02/2010	13:00	319	829	0 0
15/02/2010	13:10	329	859	0 0
15/02/2010	13:20	319	859	0 0
15/02/2010	13:30	829	0	0 0
15/02/2010	13:40	859	0	0 0
15/02/2010	13:50	859	0	0 0
15/02/2010	14:00	819	0	0 0
15/02/2010	14:10	809	0	0 0
15/02/2010	14:20	789	0	0 0
15/02/2010	14:30	379	799	0 0
15/02/2010	14:40	789	0	0 0
15/02/2010	14:50	359	799	0 0
15/02/2010	15:00	369	789	0 0
15/02/2010	15:10	789	0	0 0
15/02/2010	15:20	789	0	0 0
15/02/2010	15:30	769	0	0 0
15/02/2010	15:40	749	0	0 0
15/02/2010	15:50	729	0	0 0
15/02/2010	16:00	719	0	0 0
15/02/2010	16:10	719	0	0 0
15/02/2010	16:20	729	0	0 0
15/02/2010	16:30	699	0	0 0

Abbildung 15: Unterbrechung von Strukturen in den Ceilometerdaten (eigene Auswertung mit CL-MLH-Control)

Kurzzeitig höhere Partikelkonzentrationen durch advektiv herangetragene Luftpakete oder erhöhte örtliche Emissionen könnten hierfür die Ursache sein. Auch diese Strukturen sollen möglichst die weitere Bearbeitung beeinflussen, weshalb die Werte der aktuellen Matrix nach der ersten Spalte ausgerichtet werden und der gesamte Vorgang noch einmal wiederholt wird.

Die Bildung der verschiedenen Niveaus hat einen weiteren Vorteil, denn auch im Hinblick auf die Schadstoffbelastung der Luft kann es von Bedeutung sein, wenn sich mehrere Schichtgrenzen übereinander befinden, da sich bei Auflösung der unteren Schicht Partikel beider Schichten vermischen und dabei die Ausmaße der oberen Schicht, die dann die Mischungshöhe bildet, von Interesse sind.

Im Sinne der oben genannten Definition der MLH als vom Boden ausgehende Schicht wird der unterste ermittelte Wert vorübergehend, da noch eine Betrachtung der Wolken angefügt werden muss, als MLH definiert.

Wolken begrenzen die Sichtweite von Ceilometern aufgrund der starken Absorption des Signals, so dass oberhalb von Wolken meist keine MLH mehr detektiert werden kann und die Wolkenhöhe im CL-MH-Contol-Programm als MLH dient (siehe 5.1.1). Da Informationen über die Bewölkung nur bis zu einer gewissen Höhe, ab der keine verwertbare Rückstreuung mehr stattfindet, verfügbar sind, bietet dies keine aussagekräftige Datengrundlage. Daher wird die ermittelte Wolkenuntergrenze für die Betrachtung der Wolken herangezogen. Befindet sich die Wolkenuntergrenze unter der ermittelten MLH, dies ist z.B. der Fall bei Bewölkung ohne Niederschlag und ohne erfassbaren Gradientenminimum unter dem Wolkenniveau, wird diese Höhe als MLH definiert.

Auch bei der Betrachtung der Bewölkung sollen Prozesse von maximal 30 Minuten Dauer vernachlässigt werden. Da nur ein Algorithmus zur Bestimmung der Wolkenhöhe dient und somit keine verlässliche Aussage über übereinander liegende Strukturen gemacht werden kann, werden hier lediglich Ereignisse gesucht, bei denen kurzzeitig eine Wolke erkannt wird. Dies ist im Jahr 2009 an der FH nur elf mal, an der AVA nur einmal der Fall.

Somit wird die MLH aus den Ceilometerdaten ohne Berücksichtigung kurzzeitiger Events aus dem ersten ermittelten Gradientenminimum, bzw. der Wolkenuntergrenze gebildet. Schließlich werden die Daten noch durch ein gleitendes Mittel über 30 Minuten gefiltert. Dazu werden zunächst einzelne Datenlücken (d.h. ein fehlendes Zeitintervall) durch lineare Interpolation gefüllt und danach der Filter angewendet.

5.2 SODAR/RASS

5.2.1 Auswertung mit METEK-Software

Die Firma METEK bietet eine Software zur Visualisierung der Rohdaten des SODAR/RASS. Für die Darstellung lassen sich verschiedene Einstellungen wählen, etwa als Sodagramm, Vektorplot oder Profilserie, das Zeitintervall ist frei wählbar. Zudem können Plausibilitätsabfragen gestellt werden, um nicht belastbare Werte auszuschließen. Die erstellten Grafiken können in verschiedenen Formaten abgespeichert werden, unter anderem auch als TXT-Datei (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „SODAR_RASS Daten“).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die akustische Rückstreuintensität des senkrechten Impulses, die Varianz des Vertikalwindes, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit, die vom SODAR gemessen werden, sowie die potentielle Temperatur, die vom RASS ermittelt wird, verwendet. Es wird mit der METEK-Software jeweils das Sodagramm des gewählten Parameters für den ganzen Messzeitraum erstellt und als TXT-File abgespeichert, so dass es für die weitere Bearbeitung in MATLAB zur Verfügung steht. Mit Ausnahme der Rückstreuintensität werden folgende Plausibilitätsabfragen verwendet:

1. Das lokale Maximum ist im Verhältnis zum Hauptmaximum zu hoch.
2. Signal/Rauschverhältnis zu gering.
3. Zu geringe statistische Sicherheit des zurückgestreuten Signals, die meisten Einzelspektren wurden verworfen.

Versuche nur zwei der drei Kriterien zu verwenden haben kein befriedigendes Ergebnis gezeigt, da der Gewinn an Daten auch zu einer Vergrößerung der Menge fehlerhafter Einzeldaten führte und schließlich aufgrund des schlechten Verhältnisses der beiden Eigenschaften ein großzügiger Umgang mit den Plausibilitätsabfragen nicht lohnenswert erschien.

Zudem wurde eine Höhenglättung über drei Intervalle, die ebenfalls mit der METEK-Software durchführbar ist, für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Varianz des Vertikalwindes angewendet. Wie schon bei der Bearbeitung der Ceilometer-Daten wird auch hier in der weiteren Bearbeitung mit MATLAB ein gleitendes Mittel über 30 Minuten verwendet werden, was aufgrund der Intervallbreite einer Mittelung über drei

Werte und somit auch diesem Glättungsintervall entspricht. Die Rückstreuintensität und potentielle Temperatur werden nicht geglättet, da es sich hierbei um direkt ermittelte Werte handelt, die zunächst unverändert weiterverarbeitet werden sollen.

5.2.2 Bearbeitung der einzelnen Parameter mit MATLAB

Die mit der METEK-Software erstellten TXT-Files der einzelnen Parameter werden für die weitere Bearbeitung in MATLAB importiert und in eine Matrix für den gesamten Messzeitraum überführt (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „MATLAB Skipte“).

Da die Daten durch die Plausibilitätsabfragen schon weitgehend von fehlerhaften Messwerten bereinigt wurden, wird zu Glättung der Daten lediglich ein gleitendes Mittel über 30 Minuten verwendet. Dazu werden zunächst Datenlücken von maximal einem fehlenden Messwert durch lineare Interpolation über die Zeit geschlossen, woraufhin der Filter für die Glättung eingesetzt wird. Dieses Vorgehen ist vertretbar, da der Algorithmus des gleitenden Mittels den Mittelwert aus dem Eigenwert und den beiden Nachbarwerten bildet und somit durch die Interpolation keine Werte verloren gehen.

Die einzelnen Messwerte werden schließlich auf zwei Nachkommastellen genau gerundet (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Varianz des Vertikalwindes), bzw. gemäß dem Format der Rohdaten auf ganze Zahlen (Windrichtung, Rückstreuintensität).

5.2.3 Bestimmung von Schichtgrenzen mit SODAR

5.2.3.1 Rückblick auf frühere IMK-IFU Projekte mit SODAR

Bereits in früheren Untersuchungen des IMK-IFU wurden Algorithmen zur Bestimmung der MLH aus SODAR-Daten entwickelt (vgl. TÜRK/EMEIS 2003).

Im Rahmen des Projektes VALIUM wurde in Hannover ein SODAR mit maximaler Reichweite von 1200 m über einen Zeitraum von zwei Jahren (Okt. 2001 bis Mrz. 2003) betrieben, um die Beziehung von Luftschichtungen und Schadstoffkonzentrationen in einer Straßenschlucht zu untersuchen. Dabei wurde die MLH aus den SODAR-Daten anhand zweier Kriterien ermittelt, deren Grundlage die Profile von Rückstreuintensität (R) und Varianz des Vertikalwindes ($\bar{\sigma}_w$) sind. Das erste Kriterium sucht nach einem Abfall der Rückstreuintensität mit der Höhe als markante Eigenschaft der Obergrenze der MLH:

$$R(z) < 88\text{dB und } R(z+1) < 86\text{dB und } R(z+2) < 84\text{dB,}$$

das zweite und zweigeteilte Kriterium sucht abgehobene Inversionen anhand von Rückstreuintensitätsmaxima. Es werden hier zum einen die Höhen gesucht, die bei geringer Turbulenz ($\delta_w < 0,7$ m/s) einen negativen Gradient der Rückstreuintensität oberhalb und einen positiven Gradient unterhalb aufweisen, dabei können bis zu fünf übereinander liegende Schichtgrenzen ausgewiesen werden. Zum anderen ermittelt der Algorithmus Höhen mit sehr geringer Turbulenz ($\delta_w(z) < 0,3$ m/s), bei der die Rückstreuintensität einen Schwellenwert (kritische Rückstreuintensität, $R_{kr} = 105$ dB) überschreitet. Durch die Einbeziehung der Vertikalgeschwindigkeit sollen einzelne aufgrund von Turbulenz auftretende Rückstreuintensitätsmaxima ausgeschlossen werden.

Diese Algorithmen wurden für eine Studie über Lärm- und Schadstoffausbreitung im Inntal östlich von Innsbruck herangezogen (vgl. EMEIS 2007). Hier wurde im Zeitraum Oktober 2005 bis Februar 2006 neben einem LD40-Ceilometer für die Untersuchung ein SODAR-Gerät mit einer Höhenauflösung bis maximal 1300 m verwendet. Zur Bestimmung der Luftschichten wurden die bestehenden Algorithmen teilweise überarbeitet. Das erste Kriterium, das nach der Höhe der turbulenten Schicht sucht, wurde beibehalten, das zweite Kriterium wurde in zwei separate Untersuchungen aufgeteilt. Dadurch sucht nun ein zweiter Algorithmus nach abgehobenen Inversionen anhand des Rückstreugradienten, formativ unverändert nach der entsprechenden Formel aus der Hannover-Untersuchung, ein dritter Algorithmus sucht nach der Höhe einer bodennahen stabilen Grenzschicht. Das Kriterium ist erfüllt, wenn bei geringer Turbulenz ($\delta_w(z) < 0,3$ m/s) die Rückstreuintensität einen Schwellenwert ($R_{kr} = 105$ dB) in der Höhe z überschreitet und entweder in der Höhe $z+1$ dieser Schwellenwert unterschritten wird oder die Turbulenz steigt ($\delta_w(z+1) > 0,3$ m/s).

Bei beiden Untersuchungen wurde die MLH aus dem untersten Niveau aller Höhen zu einem Zeitpunkt ermittelt. In einer weiteren Veröffentlichung von EMEIS e.a. werden diese Algorithmen in nochmals überarbeiteter Form mit leicht veränderten Schwellenwerten angegeben. Im Rahmen dieser Untersuchung wird ebenfalls die EARE-Methode verwendet (EARE: Enhanced Acoustic Receival Echo), im Prinzip den Algorithmen der Untersuchung von Innsbruck entsprechend, mit teilweiser Anpassung der Schwellenwerte und leichter Modifizierung (vgl. EMEIS 2008).

5.2.3.2 Algorithmen für den Standort Augsburg

Für die Bestimmung der MLH aus den SODAR-Daten werden wie bei vorhergehenden Untersuchungen des IMK-IFU drei Kriterien zur Identifizierung der Höhe z einer turbulenten Schicht, mehrerer Inversionen und der stabilen Grenzschicht nach der EARE-Methode verwendet, das bedeutet eine Analyse anhand der Rückstreuintensität R und der Varianz der Vertikalwindgeschwindigkeit $\bar{\sigma}_w$.

- Das erste Kriterium sucht nach einem Abfall der Rückstreuintensität um 6dB über drei Höhenstufen als Markierung der Obergrenze einer Turbulenten Schicht. Der Algorithmus entspricht:

$$\begin{aligned} R(z+1) < R(z) - 3\text{dB} & \quad \text{UND} \\ R(z+2) < R(z+1) - 3\text{dB} \end{aligned}$$

- Das zweite Kriterium sucht nach abgehobenen Inversionen anhand eines negativen Gradienten der Rückstreuintensität oberhalb und eines positiven Gradienten unterhalb der Höhe z bei geringer Varianz der Vertikalwindgeschwindigkeit:

$$\begin{aligned} dR / dz |_{z+1} < 0 & \quad \text{UND} \\ dR / dz |_{z-1} > 0 & \quad \text{UND} \\ \bar{\sigma}_w(z) < 0,7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

- Im dritten Kriterium wird nach der Höhe einer stabilen Grenzschicht gesucht, bei der in der Höhe z die Varianz der Windgeschwindigkeit gering ist, die Rückstreuintensität einen Schwellenwert von 105 überschreitet und in der nächsten Messhöhe entweder der Schwellenwert von R unterschritten wird oder die Varianz steigt:

$$\begin{aligned} R(z) > 105 \text{ dB} & \quad \text{UND} \\ R(z+1) < 105 \text{ dB} & \quad \text{UND} \\ \bar{\sigma}_w(z) < 0,3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ODER

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_w(z) < 0,3 \text{ m/s} & \quad \text{UND} \\ \bar{\sigma}_w(z+1) > 0,3 \text{ m/s} & \quad \text{UND} \\ R(z) > 105 \text{ dB} \end{aligned}$$

Bei der Bearbeitung zeigte sich, dass beim ersten Kriterium eine Angabe eines festen Wertes für $R(z)$, wie es bei vorhergehenden Untersuchungen des IMK-IFU gehandhabt wurde, nur zu unbefriedigenden Ergebnissen führte. Daher wurde darauf verzichtet, jedoch aber eine höhere Abnahme der Rückstreuintensität (3dB statt 2dB pro Höhenstufe) vorausgesetzt (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „MATLAB-Skripte“).

Anschließend werden die MLHs aus den verschiedenen Algorithmen in eine Matrix zusammengeführt. Die Daten der 40 und der 80 Meter Stufe werden dabei nicht verwendet, da in diesen Höhen ein relativ starkes Festecho erkennbar ist. Für die Datenglättung wird wiederum ein gleitendes Mittel über 30 Minuten verwendet, nachdem einzelne Datenlücken (maximal ein fehlender Wert) durch lineare Interpolation geschlossen worden sind. Entsprechend der Bearbeitung der Ceilometerdaten werden auch hier Höhengniveaus gebildet, um „Sprünge“ der MLH durch kurzzeitige Events auszuschließen.

Der nun jeweils kleinste Wert eines Messzeitpunktes entspricht der endgültigen MLH aus SODAR-Daten, da nur die Rückstreuintensität und die Varianz der Vertikalgeschwindigkeit für die Bestimmung herangezogen wurden. In einem weiteren Schritt lassen sich anhand der RASS-Daten Aussagen über die Luftschichtung treffen.

5.3 Bestimmung von Schichtgrenzen mit RASS

Das in dieser Messkampagne verwendete RASS bietet das Höhenprofil der potentiellen Temperatur bis zu 540 m. Diese ist für die Betrachtung der Atmosphärensichtung sehr gut geeignet, da es sich zum einen um eine vom RASS direkt gemessene Größe handelt, zum anderen ist die vertikale Struktur der Atmosphäre stark geprägt durch das Temperaturprofil.

Da die RASS-Daten im gleichen Format wie die SODAR-Daten vorliegen, ist die Bearbeitung mit MATLAB mit Ausnahme der Algorithmen zur Erkennung von Schichtgrenzen gleich der SODAR-Datenverarbeitung.

Zur Beschreibung der Struktur der Grenzschicht dient der vertikale Temperaturgradient, wobei davon ausgegangen wird, dass die Grenze zweier übereinander liegender Schichten durch einen Temperatursprung angezeigt wird. Es wird also in einem Algorithmus nach der Höhe z gesucht, in der der vertikale Gradient der potentiellen Temperatur Θ einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Vergleiche verschiedener Werte zwischen 0,5 K und 1,5 K haben gezeigt, dass ein Gradient von 0,7 K geeignet scheint, wodurch also die Höhe z angegeben wird, wenn:

$$|\Theta(z) - \Theta(z-1)| \geq 0,7 \text{ K}$$

Dadurch wird das unterste Höhenintervall ausgeschlossen, was sinnvoll ist, da über die Struktur der darunter liegende Luftmasse keine Aussage gemacht werden kann. Bei einer Verwendung von Daten mit Höhenglättung schien ein Grenzwert von 0,5 K bis 0,6 K gute Resultate zu erzielen, ohne Höhenglättung ist der Gradient zwischen 0,7 K und 0,9 K zu wählen.

Letztlich folgt die weitere Datenmanipulation dem Prinzip der SODAR-Bearbeitung mit Niveaubildung, Glättung und Definierung der MLH.

Somit wurden mit SODAR bzw. RASS unabhängig voneinander unter Einbeziehung von Rückstreuintensität, Varianz des Vertikalwindes und potentieller Temperatur MLHs über den gesamten Messzeitraum gebildet und in einer Tabelle zusammengefasst (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „Tabelle MLH“). In einem nächsten Schritt können nun durch die Verwendung der Daten beider Messgeräte weitere Parameter und Methoden zur MLH-Bestimmung abgeleitet werden.

5.4 Bestimmung weiterer Parameter mit SODAR-RASS-Daten

Das in dieser Messkampagne verwendete SODAR-RASS-Gerät bietet wie bereits erwähnt neben der Rückstreuintensität, der Varianz der Vertikalwindgeschwindigkeit und der potentiellen Temperatur die Profile der Windgeschwindigkeit und Windrichtung, welche ebenfalls für die Analyse verwendet und dazu in MATLAB importiert werden.

Aus den vorliegenden Daten können schließlich weitere Parameter zur Beschreibung der meteorologischen Situation bestimmt werden. Für diese Studie wird die Gradient-Richardsonzahl sowie Klassen zur Beschreibung der Windverhältnisse gebildet.

Die Richardsonzahl ist ein Wert, der Auskunft über die Fähigkeit einer Luftschicht für turbulenten Transport gibt. Dieser ist gekennzeichnet durch kurze und ungerichtete

Nebenbewegungen (u.a. Vertikalbewegung) zur Hauptströmungsrichtung. Der turbulente Vertikalaustausch ist bei stabiler Schichtung und niedrigen Windgeschwindigkeiten gering, dementsprechend groß bei hohen Windgeschwindigkeiten und labiler Schichtung. In der SBL nimmt zudem die Turbulenz nach oben hin ab, was Strahlungs- und Advektionsprozesse begünstigt. Daher kann die Stabilität der Luftschichtung anhand der Gradient-Richardson-Zahl abgeleitet werden, welche sich nach AYRA (1988) (vgl. BENDIX 2004, S. 43) berechnet durch:

$$Ri = g/\Theta * d\Theta/dz * (dv/dz)^{-2}, \text{ mit:}$$

G = Schwerebeschleunigung, Θ = pot. Temperatur, v = Windgeschwindigkeit, z = Höhe.

Ab dem Schwellenwert $Ri_{cr} > 0,25$ (kritische Richardsonzahl) findet kein turbulenter Austausch mehr statt. Bei stabiler Schichtung ist Ri positiv, bei neutraler Schichtung gleich Null und bei labiler Schichtung negativ.

Auf dieser Grundlage wurden Plots der Stabilität erstellt, dabei wurde für die Bestimmung einer neutralen Schichtung ein Intervall von -0,05 bis 0,05 der Richardsonzahl festgelegt, da dies dem Rundungsintervall auf zwei Dezimalen entspricht. Die Darstellung der Grafiken ist dem Format der Sodargramme der METEK-Software nachempfunden (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „Ri-Plots“).

Als Beispiel sei hier die Grafik des 25.04.2009 dargestellt im Vergleich mit dem Sodargramm der Reflektivität desselben Tages (siehe Abb. 16 und 17). Gut sichtbar anhand der Reflektivität ist eine stabile Schichtung nachts sowie abends ab 18:00 Uhr, während man ab ca. 07:00 Uhr den Aufbau der CBL vermuten kann, was durch die angezeigte Auflösung der Stabilität bekräftigt wird. Das Sodargramm und die Stabilitäts-Grafik stimmen gut überein.

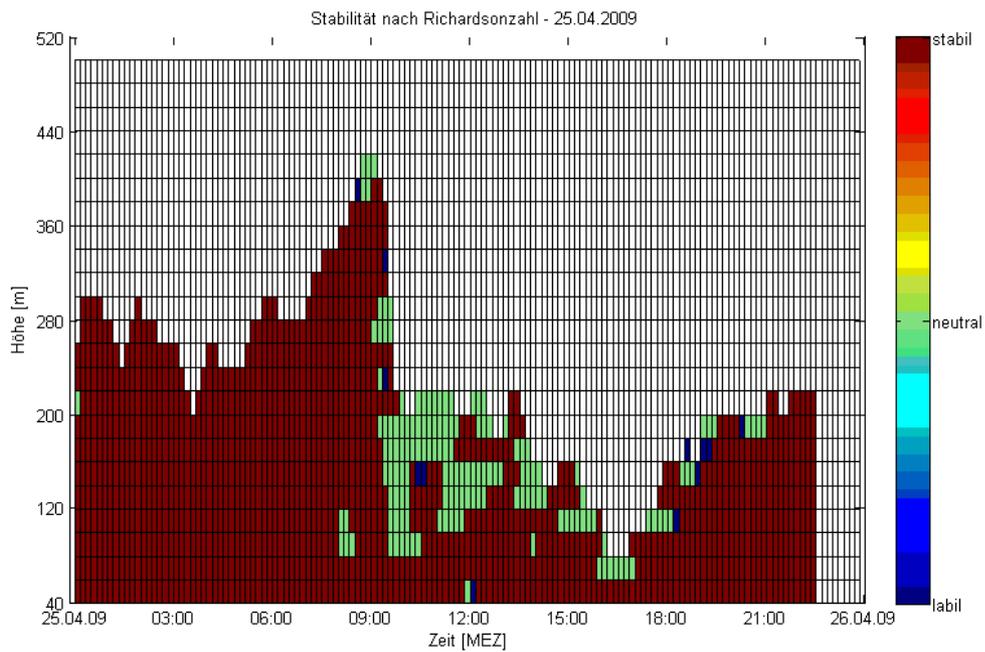


Abbildung 16: Stabilität nach Richardson am 25.04.2009

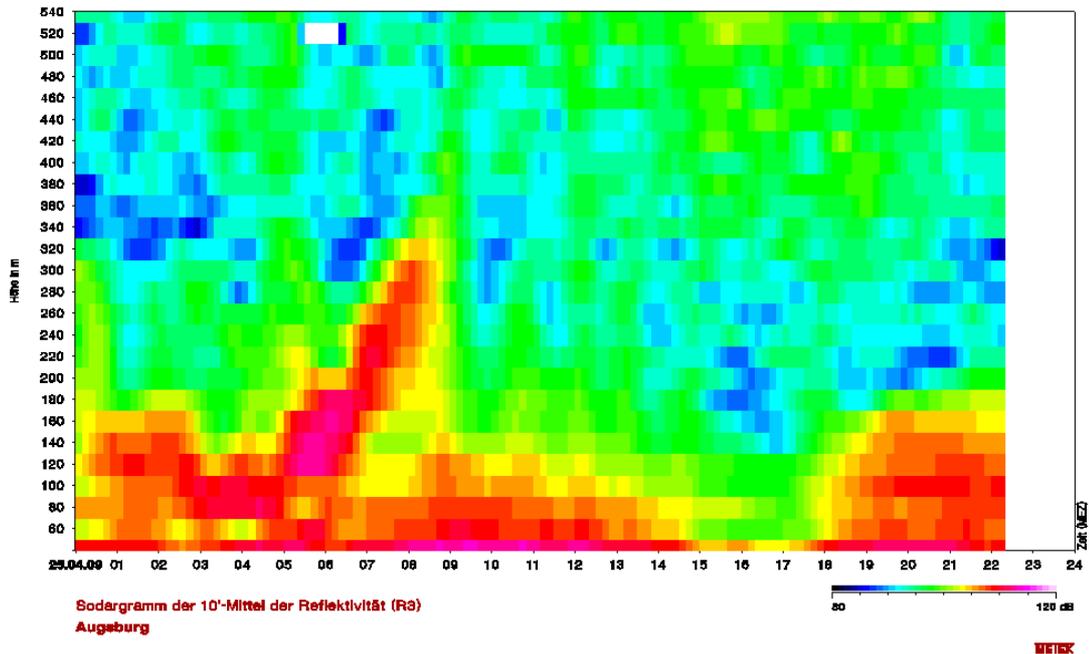


Abbildung 17: akustische Rückstreuprofil vom 24.04.09

Die Bestimmung der meteorologischen Verhältnisse an einem Standort lassen sich also anhand der Stabilitätsbetrachtung veranschaulichen, aber darüber hinaus sind anhand der SODAR-Daten noch weitere Aussagen möglich.

Anhand der Daten für Windgeschwindigkeit und Windrichtung können Klassen gebildet werden, die die Windsituation beschreiben, dies ist vor allem für die Betrachtung der Schadstoffkonzentrationen von Bedeutung. Die Lage von Emittenten zum Stadtkern, sowie Schichtung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit wirken sich auf die Belastungssituation der Luft im Stadtkern bzw. im Umland aus, weshalb neben der Beurteilung der Luftschichtung auch die Betrachtung der Windverhältnisse eine Rolle spielen. Das SODAR am Standort AVA gibt Daten über die Windrichtung und Windgeschwindigkeit, allerdings ist in niedrigen Höhen ein Festecho vorhanden, das die Datengüte beeinflusst, andererseits nimmt die Datenverfügbarkeit ab 140 m wesentlich ab. Da sich das Festecho vor allem in den Höhenbereichen 40 m und 80 m bis 100 m bemerkbar macht, die Daten des Höhenintervalls um 60 m aber relativ unbeeinflusst sind, werden diese zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung verwendet.

Die Parameter werden zunächst gemäß den Vorgaben der TA-Luft vereinfacht (vgl. TA-Luft, S. 227-228), die Windrichtungen werden in 36 Sektoren zu je zehn Grad, die Windgeschwindigkeiten werden in Klassen mit festgelegten Rechenwerten eingeteilt.

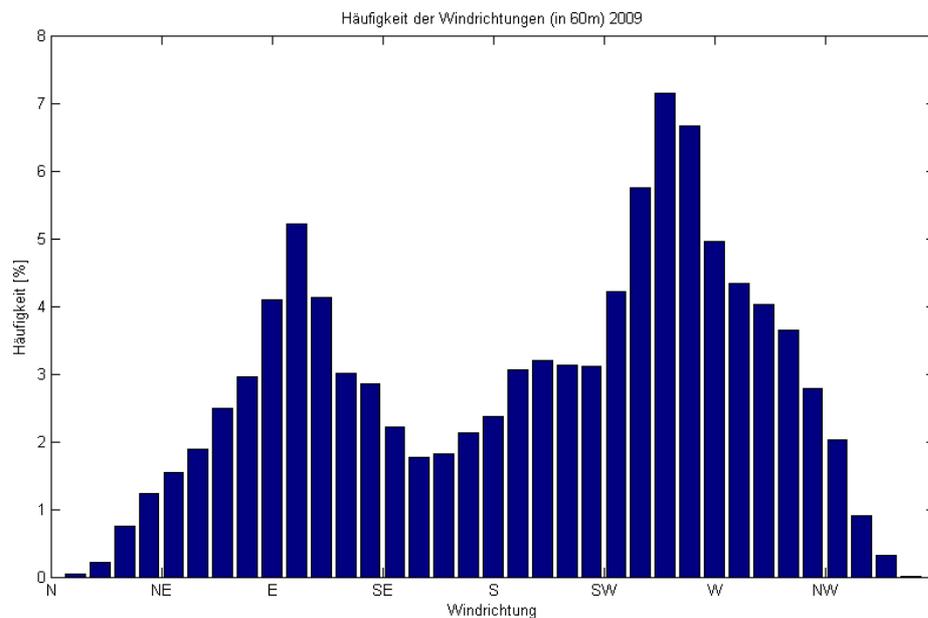


Abbildung 18: Häufigkeit der Windrichtungen Augsburg

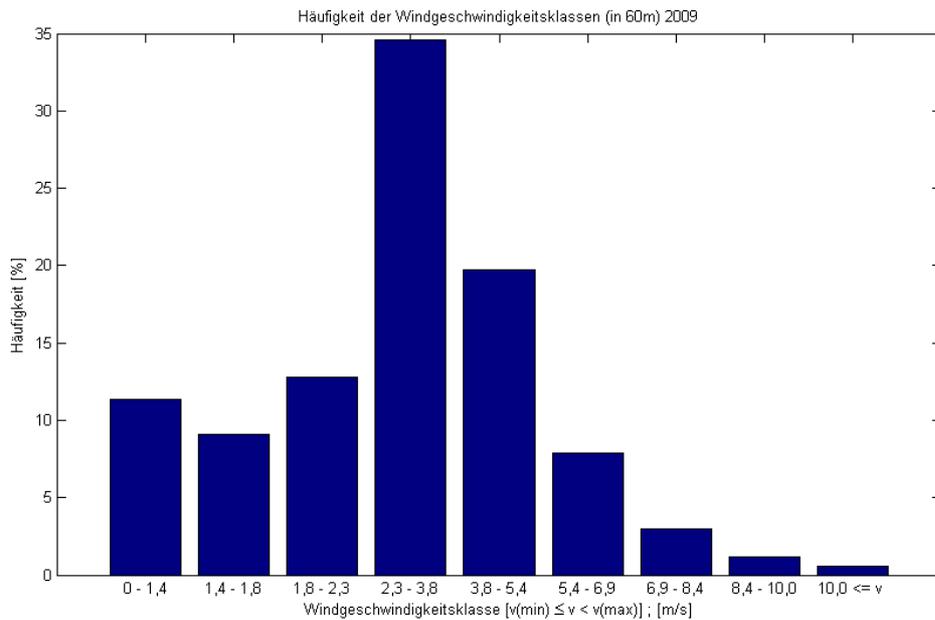


Abbildung 19: Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen

Die Analyse der Häufigkeiten der Windrichtungen (vgl. Abb. 18) ergibt die zwei Hauptwindrichtungen Ost (0° bis 155°) und West (156° bis 359°), die Windgeschwindigkeiten können zu drei Klassen zusammengefasst werden (vgl. Abb. 19), nämlich schwache Winde (0 bis einschl. $1,8$ m/s), mäßige Winde ($1,8$ bis einschl. $8,4$ m/s) und starke Winde (über $8,4$ m/s). Daraus ergeben sich sechs Klassen zur Beschreibung der Windverhältnisse (vgl. Abb. 20):

- I. schwache Ostwinde
- II. mäßige Ostwinde
- III. starke Ostwinde
- IV. schwache Westwinde
- V. mäßige Westwinde
- VI. starke Westwinde

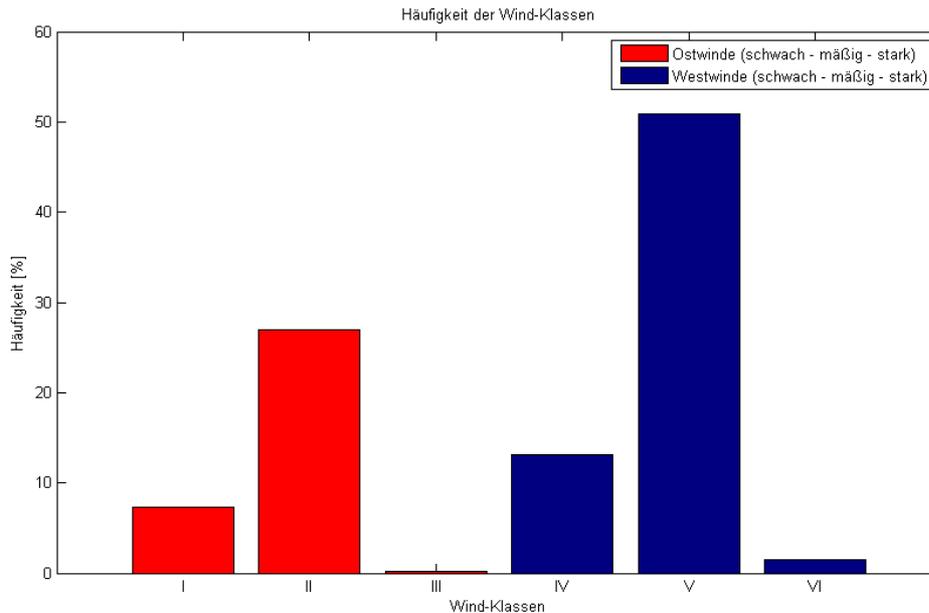


Abbildung 20: Häufigkeit der Windklassen Augsburg

Neben der bodengebundenen Fernerkundung betreibt das IMK-IFU auch In-Situ-Messung von Schadstoffen in Augsburg, deren Daten ebenfalls in diese Studie eingehen, indem sie in Beziehung zur MLH gestellt werden. Die Bearbeitung erfolgt ebenfalls in MATLAB (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „MATLAB Skripte“).

5.5 Datenverarbeitung Radiosondendaten und Schadstoffdaten

5.5.1 Bearbeitung Schadstoffe mit MATLAB

Da es sich bei den vorliegenden Daten aus Schadstoffmessungen um nicht korrigierte Rohdaten handelt, werden sie nur für die Veranschaulichung von bestimmten Verhältnismäßigkeiten verwendet. Bearbeitet werden die Konzentrationen von PM10, CO und NOX.

Die Daten des Feinstaubmessgerätes des IMK-IFU sind als Tagesmittel und Halbstundenmittel vorhanden, letztere bilden das kleinste gemeinsame Zeitintervall aller Parameter, weshalb dies die Grundlage für die weitere Bearbeitung ist.

Die Rohdaten sind in verschiedenen Formaten vorliegend und werden zunächst in MATLAB importiert und in eine Matrix über den gesamten Messzeitraum geschrieben. Die Intervallgröße der einzelnen Parameter ist unterschiedlich (NOX: 1 min bis 10 min; CO: ca. 30 sec; PM10: 30 min) und werden für die Vergleichbarkeit sofern nötig auf 30 Minuten gemittelt. Zeitpunkte von Kalibrierungen und fehlerhafte Daten (Im

Ausgabeformat der CO und NOX-Daten werden Alarme vermerkt.), sowie der Zeitraum der Vergleichsmessung am LfU finden gehen nicht in die Bearbeitung ein.

5.5.2 Bestimmung von Schichtgrenzen aus Radiosondendaten

Die Daten der Radiosondenaufstiege – täglich um 0:00 Uhr und 12:00 Uhr - des DWD in Oberschleißheim liegen über den gesamten Messzeitraum, sofern Aufstiege stattfanden, als TXT-Files ganzer Monate vor. Nachdem die Daten der untersten 2500 m jedes Aufstieges, dies entspricht der maximalen Höhe der Ceilometer-Plots, die mit dem Programm CL-MLH-Control erstellt wurden, in MATLAB importiert wurden, findet keine weitere Datenmanipulation statt, da es sich um direkt gemessene Parameter handelt.

Zur Bestimmung der MLH wird für die Vergleichbarkeit mit den RASS-Messungen die Temperatur verwendet, sowie die relative Luftfeuchte, die wie die Lufttemperatur einen Einfluss auf die Atmosphärenschichtung zu haben scheint. Es wird jeweils die Höhe des maximalen Gradienten bestimmt, bei mehreren Gradientmaxima wird der unterste herangezogen (siehe Anhang B (CD-ROM), Ordner „MATLAB Skripte“).

Somit stehen für die Analyse der verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung der MLH mit den Daten der Radiosondenaufstiege, den Schadstoffdaten und den abgeleiteten Parametern über die Synoptik verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die im nächsten Kapitel erläutert werden sollen.

6. Ergebnisse

6.1 Darstellung der MLHs

Für eine erste Analyse der Vergleichbarkeit der verschiedenen Messmethoden werden die MLHs, die basierend auf unterschiedlichen Algorithmen gebildet wurden, graphisch dargestellt. Dazu werden Plots einzelner Tage erstellt, die auf der x-Achse die Zeit (0:00 Uhr bis 23:59 Uhr) und auf der y-Achse die Höhe der MLH (0–1000 m) aufgetragen haben (vgl. Abb. 21). Eingezeichnet werden die Höhen der Wolkenuntergrenzen, die aus den Ceilometerdaten entnommen sind, (Kreise, beige: FH, grau: AVA), die MLH's (rotes Pluszeichen: MLH Ceilometer FH, blaues Kreuz: MLH Ceilometer AVA, gelbes Dreieck: MLH aus SODAR - Algorithmen, grünes Dreieck: RASS-Gradient), sowie die Höhen der maximalen Gradienten der Temperatur (großes Pluszeichen, hellblau, leicht nach rechts versetzt zur besseren Sichtbarkeit) und der relativen Luftfeuchte (großes Pluszeichen, magenta) der Radiosondenaufstiege, im Hintergrund zeigen Graue Flächen Niederschlagsereignisse an, die den Ceilometerdaten entnommen werden können. Da die Ceilometer viele Daten liefern, wird hier nur jeder zweite Wert dargestellt, um Übersichtlichkeit zu gewährleisten (vgl. Abb. 21, sowie Anhang B (CD-ROM), Ordner „MLH-Plots“).

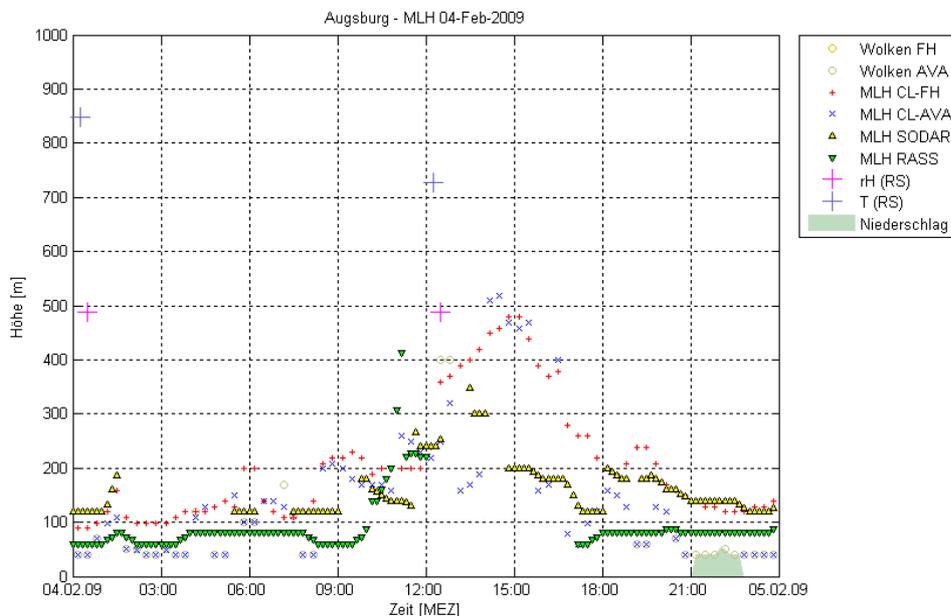


Abbildung 21: Darstellung der MLH 04.02.09

In gleicher Weise können auch die gebildeten Niveaus dargestellt werden, hier wird das obere Niveau durch eine leichte Abdunkelung der jeweiligen Markerfarbe gekennzeichnet (Beispiel vgl. Abb. 12 sowie Anhang B (CD-ROM), Ordner „NIV-Plots“).

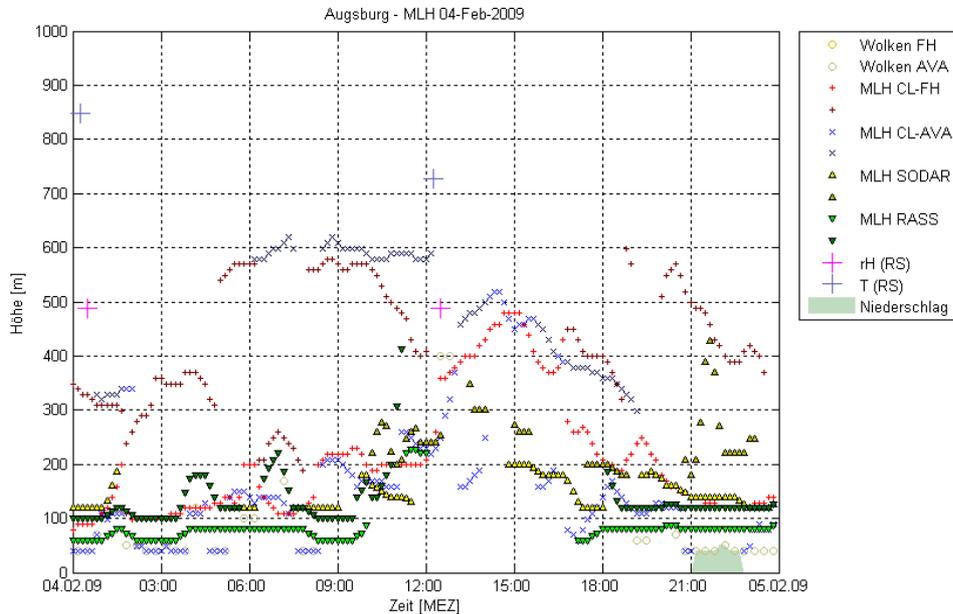


Abbildung 22: MLH-Niveaus vom 04.02.09 Augsburg

6.2 Vergleich der beiden Ceilometer

6.2.1 Markante Cluster beim Vergleich der beiden Ceilometer

Da es sich bei den beiden Ceilometern, die in der Messkampagne des IMK-IFU eingesetzt werden, um baugleiche Geräte mit denselben Einstellungen handelt, ist anzunehmen, dass es hier eine gute Übereinstimmung der ermittelten MLH's gibt. Die bisher erstellten Plots zeigen allerdings, dass es unter Umständen zu erheblichen Unterschieden kommen kann. Nun stellt sich die Frage, wodurch diese Differenzen hervorgerufen werden.

Für die Analyse werden Halbstundenmittel der jeweiligen zu betrachtenden Parameter verwendet, dies ist sinnvoll, da singuläre Vorkommnisse gefiltert werden, die Datenmenge vermindert und somit Rechenzeiten verkürzt werden und eine Vergleichbarkeit zu allen gemessenen Parametern (auch PM10) gewährleistet ist. Eventuell vorhandene Daten während Niederschlagsereignissen gehen nicht in die

Betrachtung mit ein. Obwohl die Ceilometer eine wesentlich höhere Reichweite haben, wird hier der Vergleich auf die unteren 1000 m beschränkt, da sich in diesem Höhenintervall die Prozesse des ML weitgehend abspielen, wenn auch höhere MLH's nicht auszuschließen sind, und gleichzeitig noch Vorgänge unterhalb von 540 m, was die Reichweite des SODAR/RASS betrifft, in adäquater Weise betrachtet werden können.

Zunächst werden die MLH's der beiden Ceilometer in einem Scatterplot gegenübergestellt, die Darstellung zeigt die ausgegebenen Höhen beider Geräte zu jedem Zeitpunkt, an dem ein Datenpaar vorhanden ist, befindet sich eine Markierung links der gedachten Diagonalen wird die MLH bei der AVA höher angegeben als bei der FH, rechts der Diagonalen ist es umgekehrt. Dabei wird zum einen die insgesamt recht gute Übereinstimmung der beiden Ceilometer deutlich, was an der Häufung der Marker nahe der Diagonalen des Diagramms gut zu sehen ist (vgl. Abb. 23).

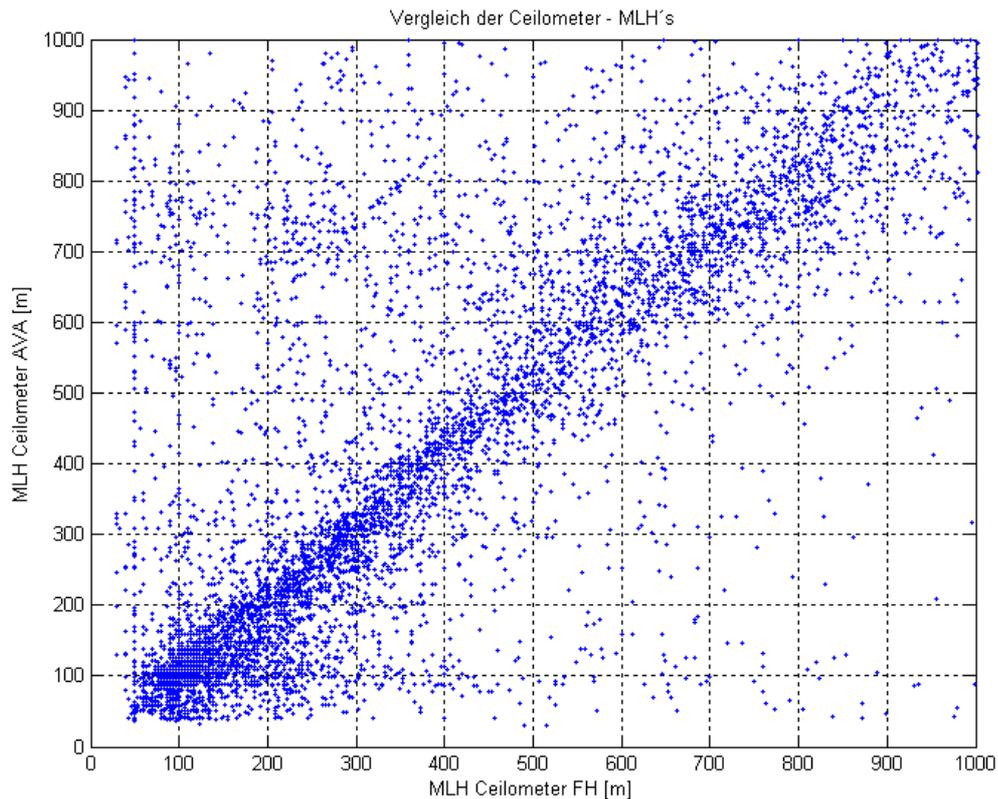


Abbildung 23: Vergleich der Ceilometer über den gesamten Messzeitraum

Beste Übereinstimmungen scheint es im Bereich von 200 bis 500 m zu geben, darüber macht sich eine gewisse Streuung bemerkbar.

Zum anderen sind auch die deutlichen Abweichungen der MLH's zu erkennen, wobei sich verschiedene Muster abzeichnen:

- i. Während das Ceilometer an der FH Strukturen im Bereich von 40 bis etwa 100 m erkennt, werden diese von Ceilometer an der AVA nicht registriert und es werden z. T. wesentlich höhere MLH's angegeben.
- ii. Ein ähnliches Verhalten kann auch umgekehrt betrachtet festgestellt werden, wenngleich weniger deutlich.
- iii. Im Bereich von 100 bis 300 m scheint das AVA-Ceilometer häufiger die MLH unterhalb der des FH-Ceilometers zu finden als umgekehrt.
- iv. Ein weiteres Cluster ist im Höhenbereich des FH-Ceilometers von 180 bis 500 m zu erkennen, in dem die MLH des AVA-Ceilometers zwischen 620 und 850 m liegt.

Ein Vergleich mit der Klassifizierung der Windverhältnisse führt in Bezug auf die Erklärung der angedeuteten Muster zu keinem zufrieden stellenden Ergebnis, da diese mit Ausnahme der Starkwindsituationen in allen Windklassen nachzuweisen sind (vgl. Abb. 24).

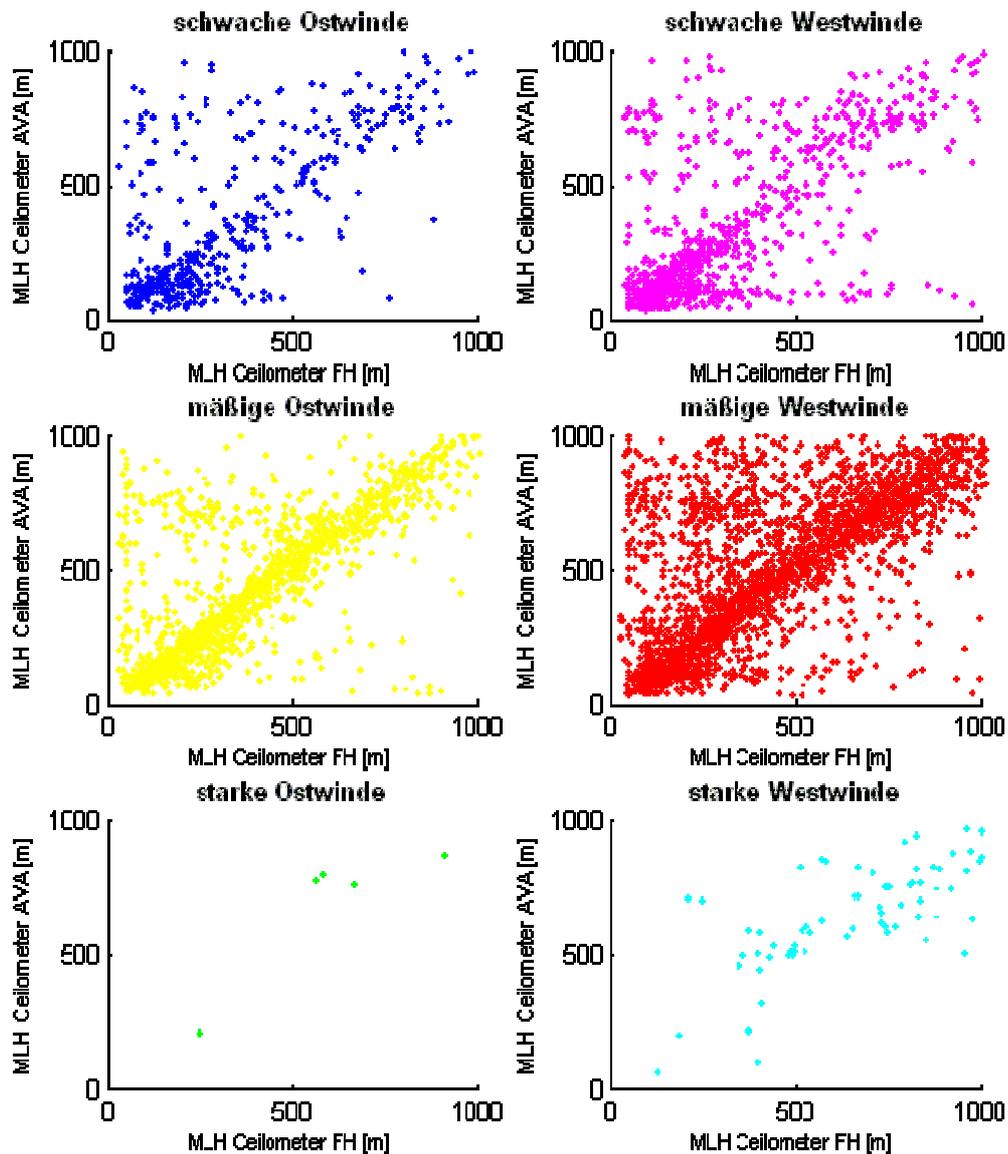


Abbildung 24: Vergleich der Ceilometer nach Windklassen

Dennoch sind hier einige Sachverhalte erkennbar:

- Bei starken Westwinden wird von den Ceilometern die MLH meist über 500 m bestimmt, wobei die Differenz der MLH's bis zu über 400 m beträgt. Generell scheint die MLH in Augsburg Nord bei diesen Situationen niedriger zu liegen als in der Innenstadt.
- Zwei Cluster sind bei schwachen Winden und auch bei mäßigen Ostwinden zu vermuten: zum einen unterhalb von 450 m und zum anderen zwischen 650 m und 800 m, der letztgenannte scheint dabei bei der AVA öfter erkannt zu

werden. Dies könnte ein Hinweis auf nächtliche SBL mit darüber liegendem Residual Layer sein. Um dies zu überprüfen scheint es sinnvoll, Tag- und Nachtperioden gesondert zu untersuchen, daher werden im Folgenden die von den Ceilometern ermittelten MLH's abhängig von der Tageszeit mit den Intervallen 18:00 Uhr bis einschließlich 6:00 Uhr und 6:00 Uhr bis einschließlich 18:00 Uhr, sowie von der Jahreszeit betrachtet.

Die bereits angedeuteten Cluster sind beim Vergleich der Ceilometer abhängig von Tages- und Jahreszeit ebenfalls zu erkennen und wurden farblich markiert, wodurch sich vier bis fünf interessante Bereiche feststellen lassen (vgl. Abb. 25-32):

- i. Das Gradientenminimum liegt bei beiden Geräten etwa im selben Niveau (blau). Dies ist bei allen Tages- und Jahreszeiten zu erkennen, besonders fällt aber die Verteilung im Sommer auf, da hier nachts deutlich zwei Niveaus erkennbar sind, zum einen unterhalb von 300 m, zum anderen oberhalb von 600 m, während tagsüber diese Zweiteilung teilweise aufgelöst ist, indem die MLH auch in dem dazwischen liegenden Höhenbereich detektiert wird.
- ii. An der AVA deutet die Partikelverteilung auf eine wesentlich höher reichende Durchmischung hin als an der FH, wo die MLH unter 150 m zu liegen scheint (magenta). Dieser Effekt tritt vor allem tagsüber auf, ist allerdings in Winter und Frühling weniger deutlich zu erkennen. Unter der Annahme, dass der Effekt auch nachts auftritt, ist interessant zu beobachten, dass das Gradientenminimum bei der FH dann scheinbar höher liegt als tagsüber, obwohl es aufgrund der Bildung einer nächtlichen Inversion eher andersherum zu vermuten wäre. Da aber nachts das Cluster nicht allzu deutlich ausgeprägt ist, scheint es möglich, dass in diesem Zeitintervall der Effekt folgendem Sachverhalt (iii) zugehörig ist:
- iii. Das Gradientenminimum liegt in Augsburg Nord oberhalb von 550 m, im Stadtzentrum darunter (grün). Dies ist nachts deutlicher zu erkennen als tagsüber, vor allem in Sommer und Herbst, und entspricht der dipolaren Verteilung, die bei der Besprechung des ersten Clusters (i) bereits beobachtet wurde. Interessant dabei ist, dass umgekehrt dieser Effekt kaum feststellbar ist, weshalb vermutet werden kann, dass die Luftschichtung über dem Stadtkörper häufig ein Gradientenminimum tiefer als über der Stadtrandlage verursacht.
- iv. Der Effekt von (ii) ist auch - wenngleich weniger deutlich - umgekehrt vorhanden: die MLH wird in Augsburg Nord in den unteren 100 bis 200 m ermittelt, während das Gradientenminimum im Innenstadtbereich wenige bis einige hundert Meter höher liegt (rot). Im Gegensatz zu dem bereits erwähnten tritt dieser Sachverhalt vor allem in Winter und Frühling innerhalb des Nacht-

Intervalls in Erscheinung, unterhalb von 300 m ist er bei allen Tages- und Jahreszeiten einigermaßen sichtbar. Aufgrund der Menge der Werte ist allerdings bei dieser Darstellung eine Abhängigkeit nur zu vermuten, weshalb auch keine farbliche Markierung vorgenommen wurde, dennoch sollte festgehalten werden:

- v. Unterhalb von jeweils 300 m scheint das Gradientminimum in Augsburg Nord häufig unter dem entsprechenden in Augsburg Innenstadt zu liegen.

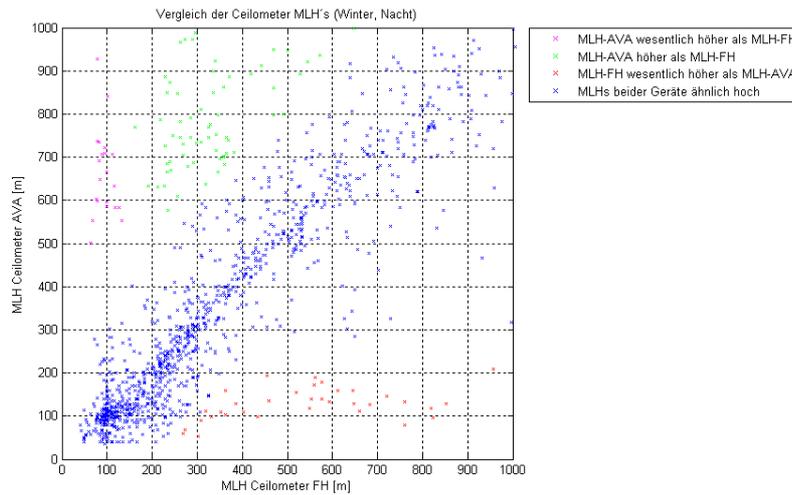


Abbildung 25: Vergleich Ceilometer-MLH's Winter Nacht (eigene Darstellung)

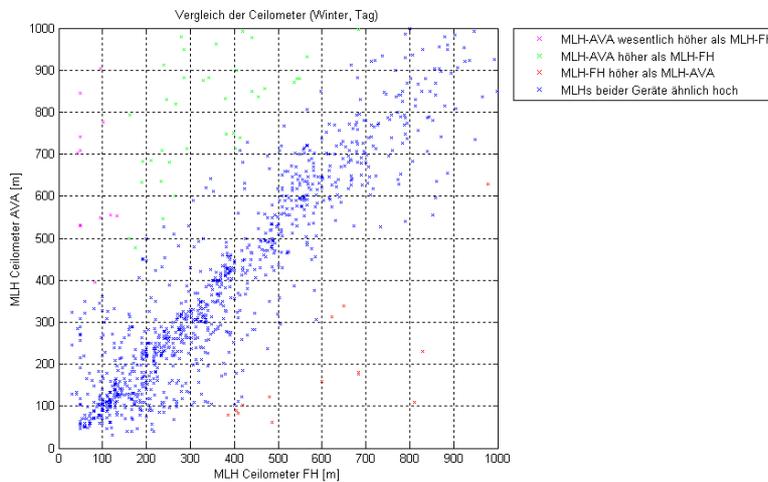


Abbildung 26: Vergleich Ceilometer-MLH's Winter Tag (eigene Darstellung)

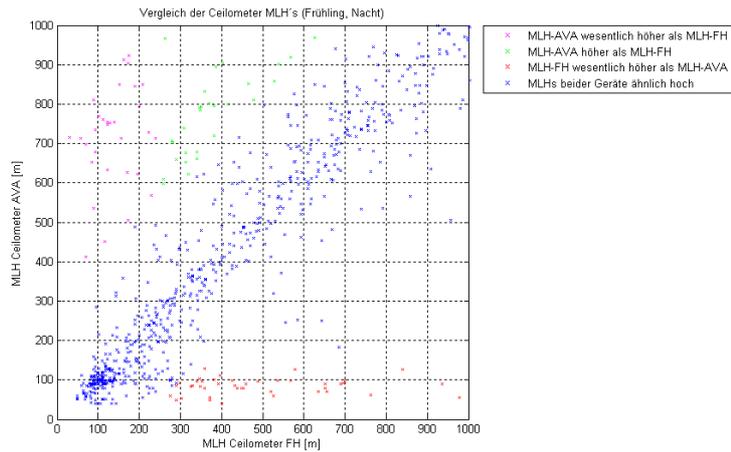


Abbildung 27: Vergleich Ceilometer-MLH's Frühling Nacht (eigene Darstellung)

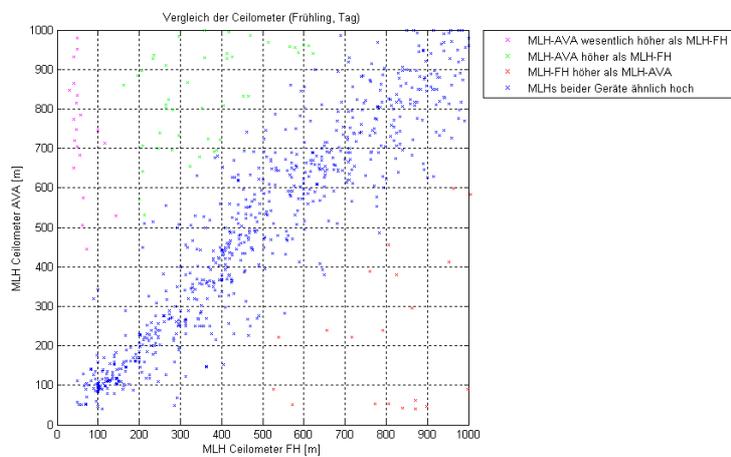


Abbildung 28: Vergleich Ceilometer-MLH's Frühling Tag (eigene Darstellung)

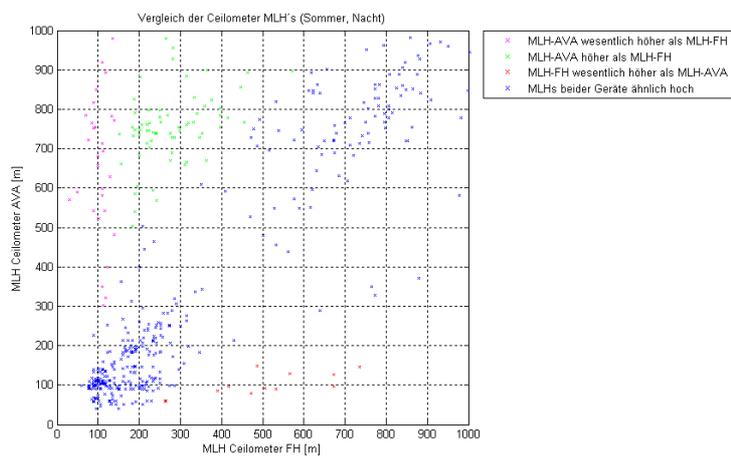


Abbildung 29: Vergleich Ceilometer-MLH's Sommer Nacht (eigene Darstellung)

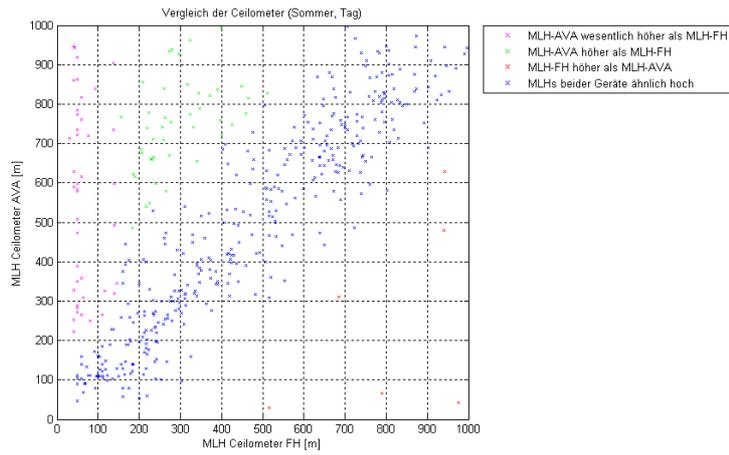


Abbildung 30: Vergleich Ceilometer-MLH's Sommer Tag (eigene Darstellung)

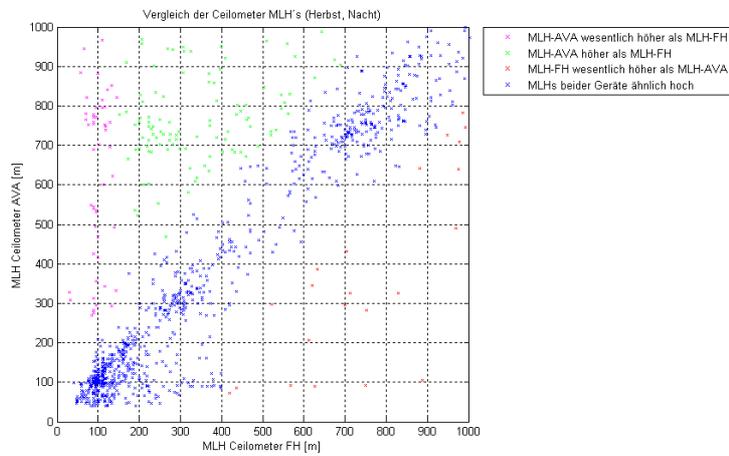


Abbildung 31: Vergleich Ceilometer-MLH's Herbst Nacht (eigene Darstellung)

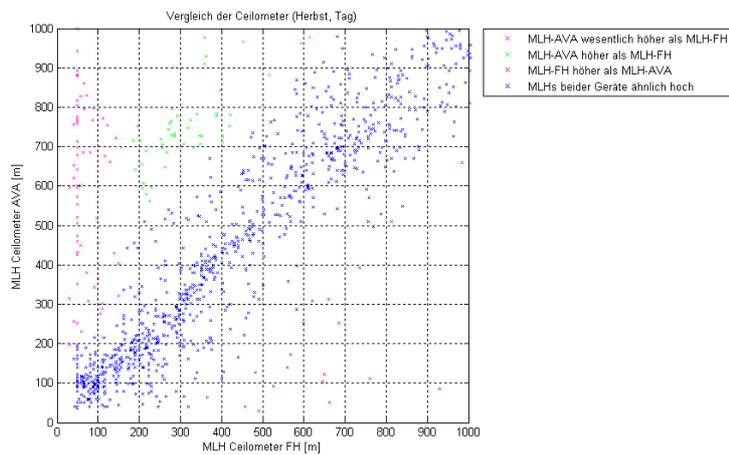


Abbildung 32: Vergleich Ceilometer-MLH's Herbst Tag (eigene Darstellung)

Die erkannten Strukturen scheinen also sowohl von Windrichtung und – Geschwindigkeit, wie auch von Tages- und Jahreszeit abhängig zu sein, es bleibt weiterhin zu klären, wodurch die Cluster ausgelöst werden. Dafür sollen die Ceilometer schließlich aufgelöst nach Windklassifizierung und zeitlicher Einteilung untersucht werden, um schließlich Perioden zu finden, die die zu untersuchenden Sachverhalte erklären.

6.2.2 Identifizierung und Interpretation der Cluster

Nachdem beim Vergleich der Ceilometer sowohl Abhängigkeiten von der Windsituation als auch von Tages- und Jahreszeiten erkannt wurden, macht es Sinn, diese Abfragen zusammenzuführen, um die Faktoren, die zur Bildung der Cluster führen, herauszufiltern. Daraus ergeben sich für die vier Jahreszeiten, unterteilt jeweils nach Tag- und Nachtperiode, je sechs Grafiken im bereits erläuterten Stil zu den einzelnen Windsituationen (vgl. Anhang A, Abb. 57 bis 64).

Der vorher gewonnene Eindruck der verschiedenen Cluster kann hier erwartungsgemäß bestätigt werden, darüber hinaus kann das Vorkommen bestimmter Cluster auf die zeitliche und meteorologische Situation weiter eingegrenzt werden. Beispielsweise ist die in (ii) beschriebene Situation mit tiefer Schichtgrenze im Innenstadtbereich und höherer am Stadtrand vor allem tagsüber bei mäßigen Ostwinden erkennbar, größere Differenzen sind vor allem bei Westwinden zu beobachten.

Die Problematik von Wolken beim Betrieb von Ceilometern wurde bereits angedeutet (vgl. 5.1), daher sollen weiterhin Situationen für die Bearbeitung gewählt werden, in denen keine oder nur über dem Untersuchungsbereich liegende Wolken vorhanden sind, um einzelne Ausreißer zu eliminieren, werden nur Zeiträume beachtet, in denen mindestens ein Gerät über sechs Stunden kontinuierlich ein Gradientenminimum erkannt hat.

Aufgrund des offensichtlichen Vorhandenseins großer Differenzen zwischen den ermittelten MLH's zu den einzelnen Messintervallen (vgl. Anhang A, Abb. 65 bis 74) sind die Fragen zu stellen, welche Bedingungen Strukturen schaffen, die unterschiedliche Gradientenminima hervorrufen, bzw. wodurch gute Übereinstimmungen erreicht werden.

6.2.2.1 Gute Übereinstimmungen

Betrachtet man den Vergleich der MLH's fällt auf, dass vor allem nachts bei Ostwetterlagen und mäßigen Windgeschwindigkeiten längere Perioden ohne Wolkeneinfluss gute Übereinstimmungen der beiden Ceilometer vor allem unterhalb von 500 m aufweisen, bei Schwachwindsituationen ist dies auch tagsüber in Frühjahr und Herbst zu bemerken. Daher soll im Folgenden eine Periode einer Herbstnacht näher betrachtet werden, nämlich der 21.11.09 bis 22.11.09.

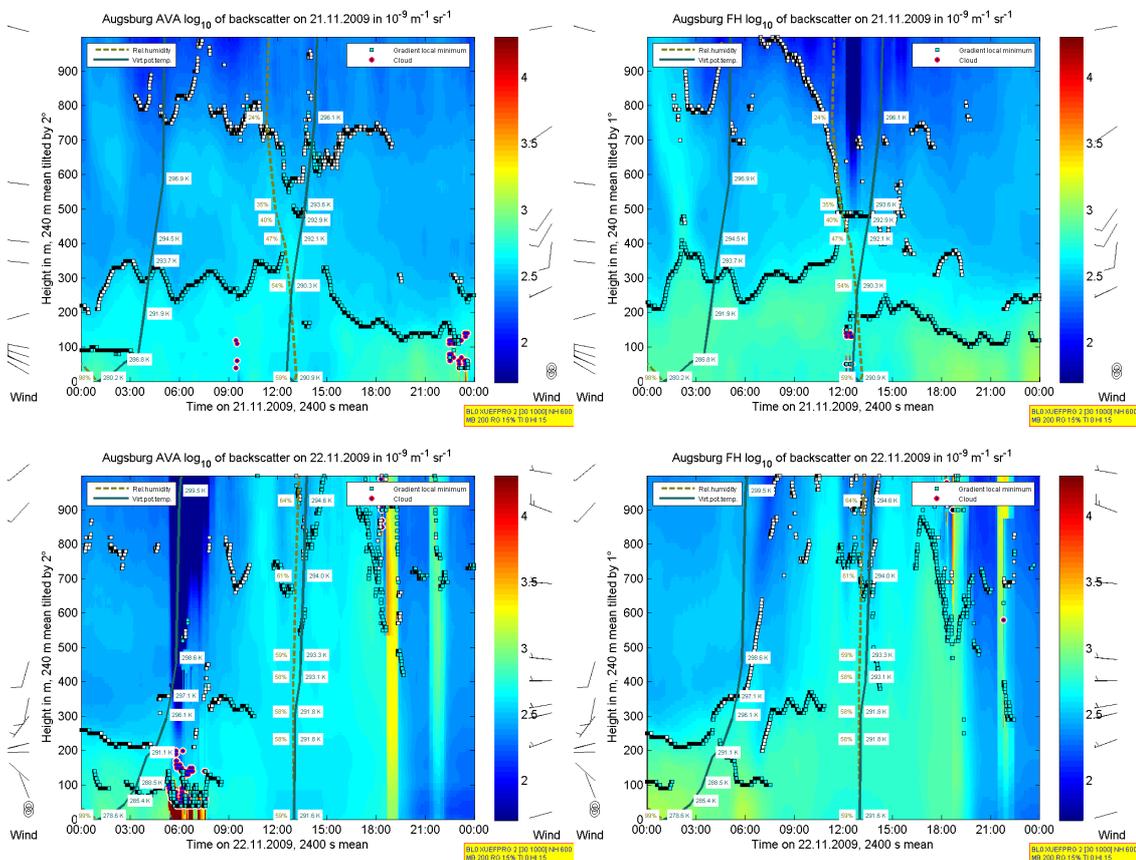


Abbildung 33: Backscatterplots der Ceilometer 21.-22.11.09 (eigene Auswertung mit CL-MLH-Control)

Die mit CL_MLH-Control erstellten Backscatterplots der beiden Standorte machen die gute Übereinstimmung sichtbar (vgl. Abb. 33, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „21112009“). Dargestellt wird hier das Vertikalprofil bis 1000 m der Rückstreuintensität. Dabei werden die beiden untersten Gradientminima in cyan- bzw. weiß gefärbten Quadraten dargestellt, Wolken wie zum Beispiel um 23:00 Uhr an der

AVA werden als blauer Punkt mit violetter Umrandung gekennzeichnet. Die Hintergrundfärbung gibt die optische Rückstreuintensität wieder mit dunkelblauer Kennzeichnung für niedrige, dunkelroter für hohe Werte. Ebenfalls sind die virtuelle Temperatur und Luftfeuchte aus den Radiosondenaufstiegen bei Oberschleißheim bei 0:00 Uhr und 12:00 Uhr und am Rand die zugehörigen Windinformationen eingezeichnet.

Zwischen 3:00 Uhr und 12:00 Uhr erkennen beide Ceilometer eine Abnahme der Partikelverteilung zwischen 200 m und 300 m mit steigender Tendenz im Laufe des Vormittags, was dem Aufbau eines CBL entspricht. Ab 12:00 Uhr deutet sich an beiden Standorten eine Niveaustufe bei etwa 150 m an, bei der FH zunächst deutlicher als bei der AVA, welche schließlich erhalten bleibt und – angedeutet durch den abfallenden Verlauf der Markierungen – scheinbar nach unten gedrückt wird, so dass über einer Schicht mit relativ hoher Rückstreuung eine Schicht mit geringerer zu liegen scheint. Gegen 22:00 Uhr, bei der FH auch schon vorher, ist sogar eine Dreiteilung erkennbar mit einer bodennahen Schicht bis etwa 100 m, einer 100 m mächtigen Schicht geringerer Rückstreuintensität darüber, die von einer weiteren Schicht überlagert wird. Diese Struktur bleibt bis ca. 6:00 Uhr des 22.11.09 erhalten und löst sich dann, an der AVA angedeutet durch Nebel, schließlich in relativ kurzer Zeit auf. Da sich die meisten hier besprochenen Prozesse unterhalb von 500 m abspielen, lohnt es sich die Daten von SODAR und RASS mit einzubeziehen, da sie das Bild weiter erklären können.

Besonders deutlich werden die Vorgänge, die hier das Verhalten der MLH's prägen, anhand von Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Sodargramme zeigen die Windrichtungen (0 - 360°) und Windgeschwindigkeiten (0 – 20 m/s) der Höhenintervalle bis zu 540 m der jeweiligen Zeitintervalle (vgl. Abb. 35, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „21112009“).

Die Strukturen des 21.11.09 bis 10:00 Uhr und zwischen 15:00 Uhr und 22:00 Uhr sind offensichtlich durch advective Prozesse hervorgerufen. Nachts und vormittags befindet sich über der bodennahen Schicht ein Bereich mit wesentlich höheren Windgeschwindigkeiten aus Westnordwest, die für die geringere Rückstreuintensität verantwortlich sind. Am Mittag flaut der Wind ab und dreht um beinahe 180° bevor die zweite Phase mit stärkeren Winden diesmal aus Ostsüdost beginnt. Danach dreht der Wind nochmals und es bildet sich ein Südwestwindssystem aus, ab 6:00 Uhr lösen starke Südwestwinde die Struktur auf.

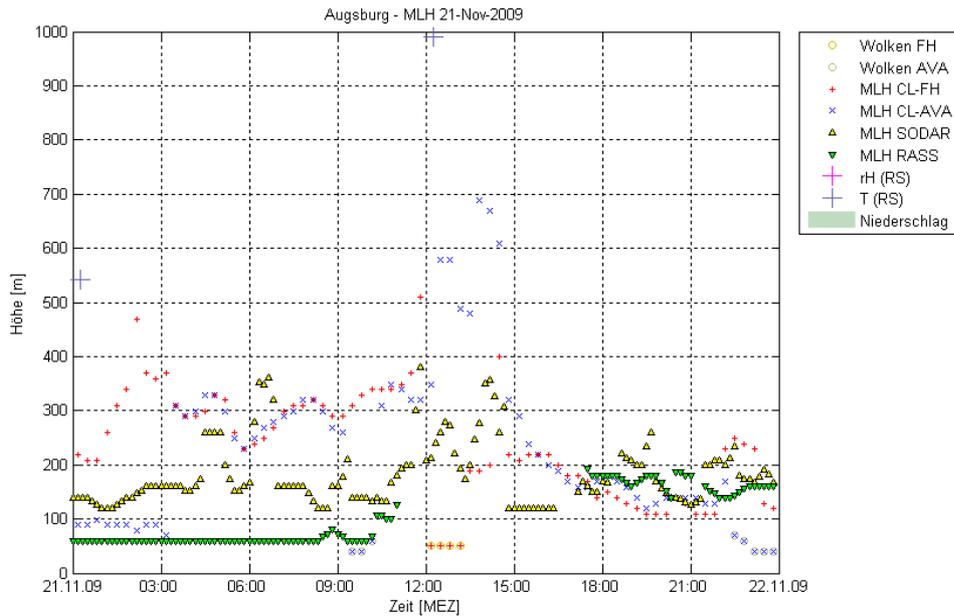


Abbildung 34: MLH-Plot vom 21.11.09 (eigene Darstellung)

Der Vergleich mit der MLH aus den SODAR-Algorithmen und dem RASS-Gradienten (vgl. Abb. 34) zeigt abends eine gute Übereinstimmung, bei der vormittäglichen Struktur liegt die SODAR-MLH tiefer als die der Ceilometer, das RASS liegt sogar wesentlich tiefer. Das Temperaturprofil (vgl. Abb. 35) deutet auf eine stabile Schichtung hin mit einem hohen Gradienten, was in diesem Fall ein Problem für die Ermittlung des RASS-Gradienten bedeutet, da in nahezu jeder Höhenlage der Gradient gefunden wird. Deutlich bessere Ergebnisse zeigt die SODAR-MLH: aus dem Profil der akustischen Rückstreuintensität (vgl. Abb. 35) lassen sich nachts und am frühen morgen zwei Schichtgrenzen herauslesen, eine bei 120 m (Übergang violett zu grün) und eine bei ca. 320 m (Übergang grün zu blau). Bis etwa 3:00 Uhr wird die untere Schichtgrenze auch vom AVA-Ceilometer erkannt, später wird von beiden Lidar-Geräten nur die obere Schichtgrenze erfasst, während das SODAR die untere Grenze erkennt. Betrachtet man sich denselben Tag in der Niveaudarstellung (Anhang B (CD-ROM), Ordner „NIVEAU Plots“) sieht man, dass das RASS auch die obere Stufe erkennt. Am Abend und vor allem nachts und geringen Windgeschwindigkeiten erkennen alle Geräte etwa dieselbe Schichtgrenze.

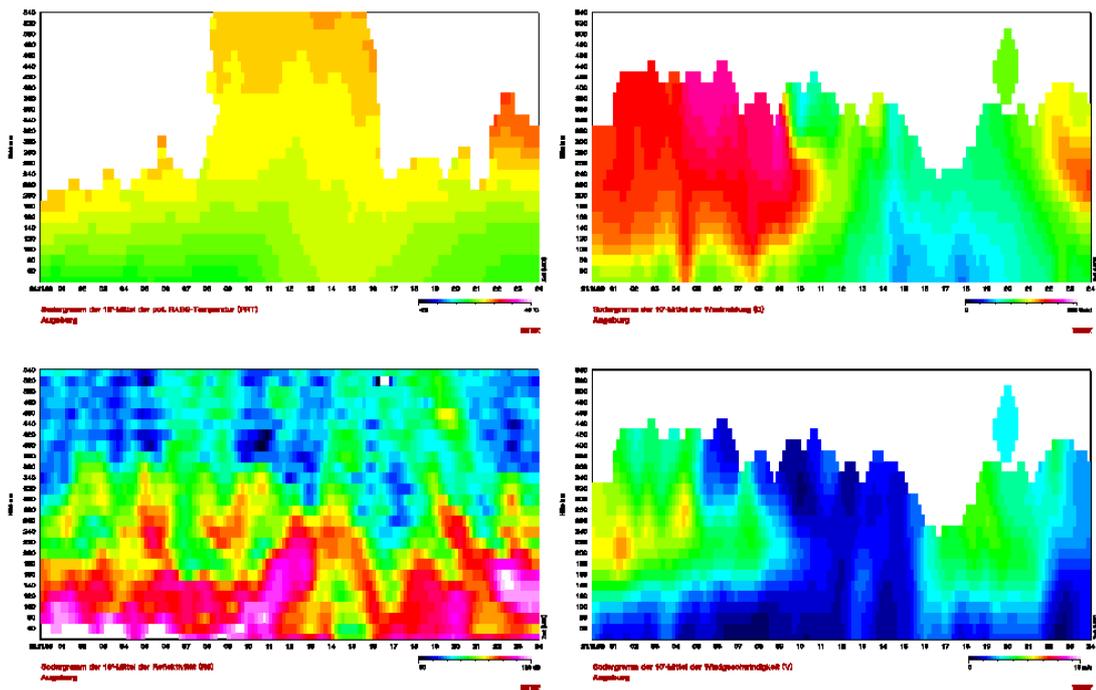


Abbildung 35: Sodargramme Temperatur (links oben), Windrichtung (rechts oben), Reflektivität (links unten) und Windgeschwindigkeit (rechts unten), 21.11.09, (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Um auszuschließen, dass es sich hierbei um einen Sonderfall handelt soll eine weitere Periode, in der offensichtlich gute Übereinstimmung der beiden Ceilometer herrscht, diskutiert werden. Die Plots der jahreszeitlichen Windklassen zeigen, dass auch bei schwachen Westwinden tagsüber, was einen gewissen Unterschied zu der vorher gestellten Auswahl bedeutet, die Differenz der Gradientminima gering ist, daher wird aus diesen Daten der 03.05.2009 gewählt (vgl. Abb. 36, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „03052009“)

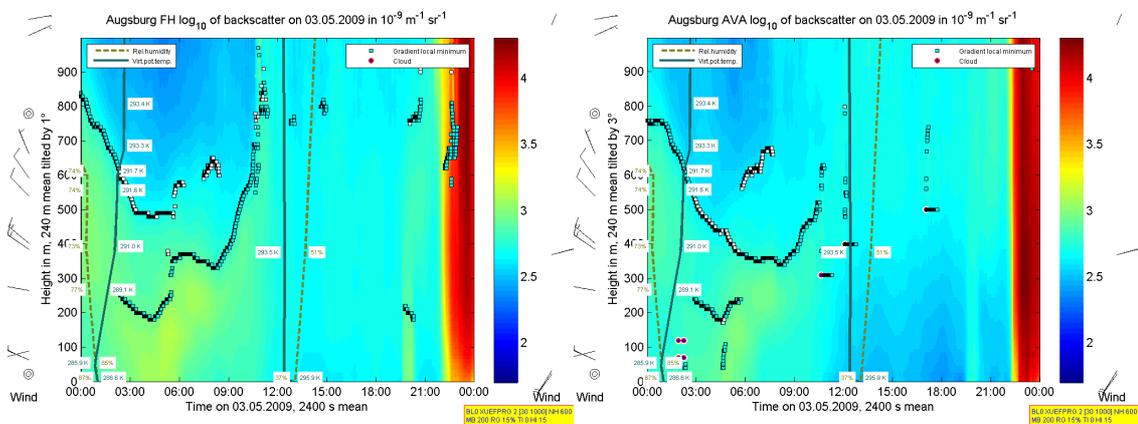


Abbildung 36: Backscatterplots der Ceilometer vom 03.05.09 (eigene Auswertung mit CL-MLH-Control)

Das Zeitintervall, das für die Auswahl ausschlaggebend war, ist offensichtlich der Abschnitt 6:00 Uhr bis ca. 11:00 Uhr. Auch schon davor gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen 750 m und 550 m, wo ein oberes Niveau festgestellt wird, und zwischen 200 m und 300 m, dort weist die Abnahme der optischen Rückstreuintensität auf ein tiefer liegendes Niveau hin. Die Windrichtung dreht im Höhenprofil von Süd nach West, im Bereich von 160 m bis 200 m erhöht sich die Windgeschwindigkeit wesentlich. Diese Situation hält bis zum morgen an, dann dreht der Wind wieder etwas nach Süden, die Windgeschwindigkeit fällt.

Am Vormittag steigt die MLH dann stark an und wird ab 12:00 Uhr kaum noch erkannt oder befindet sich über dem Untersuchungsbereich. Zwischendurch scheint es kurze Schauer zu geben, die hier aufgrund der zeitlichen Mittelung nicht zu sehen sind. Diese Situation dauert bis ca. 22:30 Uhr an, wenn stärkere Regenfälle einsetzen.

Das Temperatursodargramm dieses Tages (vgl. Abb. 37, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „03052009“) zeigt einen starken Anstieg am Vormittag, was den Anstieg der MLH durch Konvektion erklärt. Die Darstellung der Windrichtung zeigt in diesem Zeitfenster ein indifferentes Bild, bei eher geringen Windgeschwindigkeiten wechselt die Windrichtung häufig, was wohl durch den Aufstieg von Thermikblasen bewirkt wird und eine insgesamt gute Durchmischung zur Folge hat. Die Darstellung der Stabilität nach der Richardsonzahl (vgl. Abb. 38) bestätigt diese Annahme, interessant ist neben der hohen Stabilität nachts, dass morgens ab ca. 7:00 Uhr vom Boden her eine neutrale bis labile Schichtung gebildet wird, welche die stabil geschichtete Luftmasse anhebt. Ab etwa 9:00 Uhr sind dann oberhalb von 200m nicht mehr ausreichend Daten zur Verfügung um die Richardsonzahl zu bestimmen.

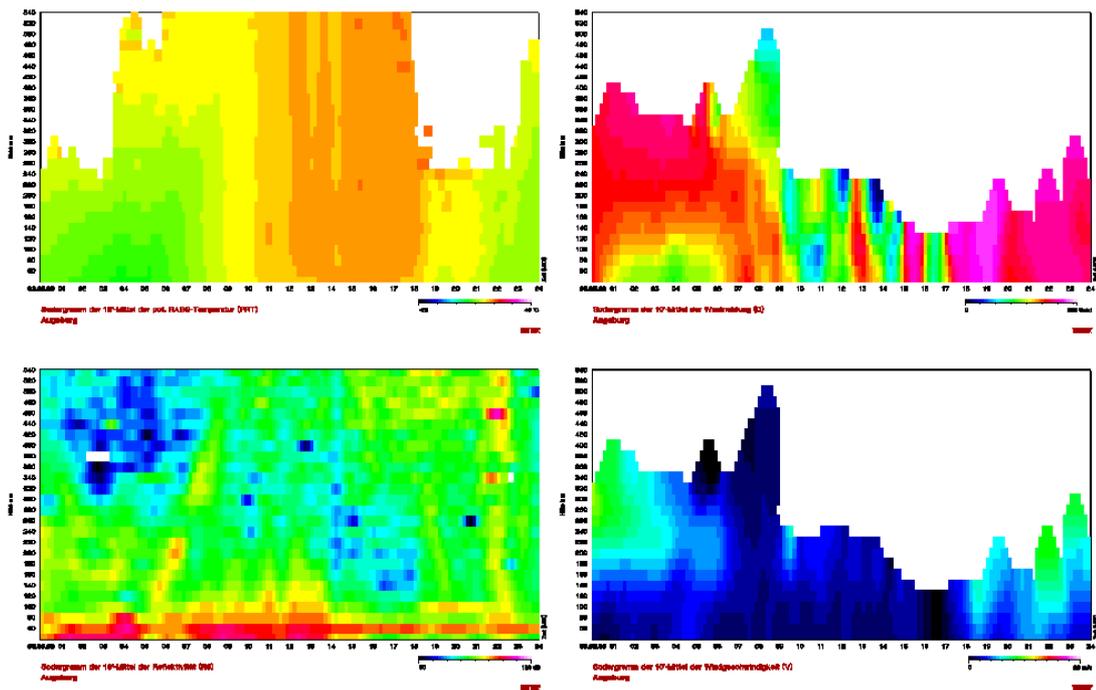


Abbildung 37: Sodargramme Temperatur (links oben), Windrichtung (rechts oben), Reflektivität (links unten) und Windgeschwindigkeit (rechts unten), 03.05.09, (eigene Auswertung mit METEK-Software)

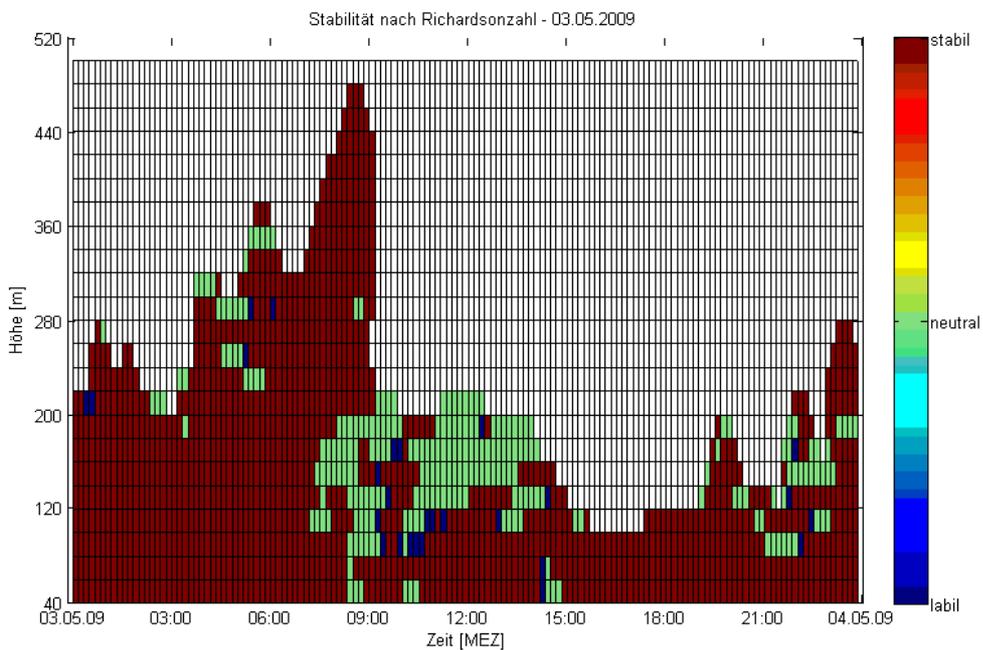


Abbildung 38: Stabilitätsprofil nach Richardsdon vom 03.05.09 (eigene Darstellung)

Beim Vergleich der verschiedenen Messgeräte (vgl. Abb. 39) zeigt sich eine gute Übereinstimmung der ermittelten MLH's, vor allem nachts, wohingegen am Morgen der SODAR-Algorithmus die MLH niedriger ansetzt. Bezieht man das zweite SODAR-Niveau mit ein zeigt dies bessere Übereinstimmung (vgl. Abb. 40).

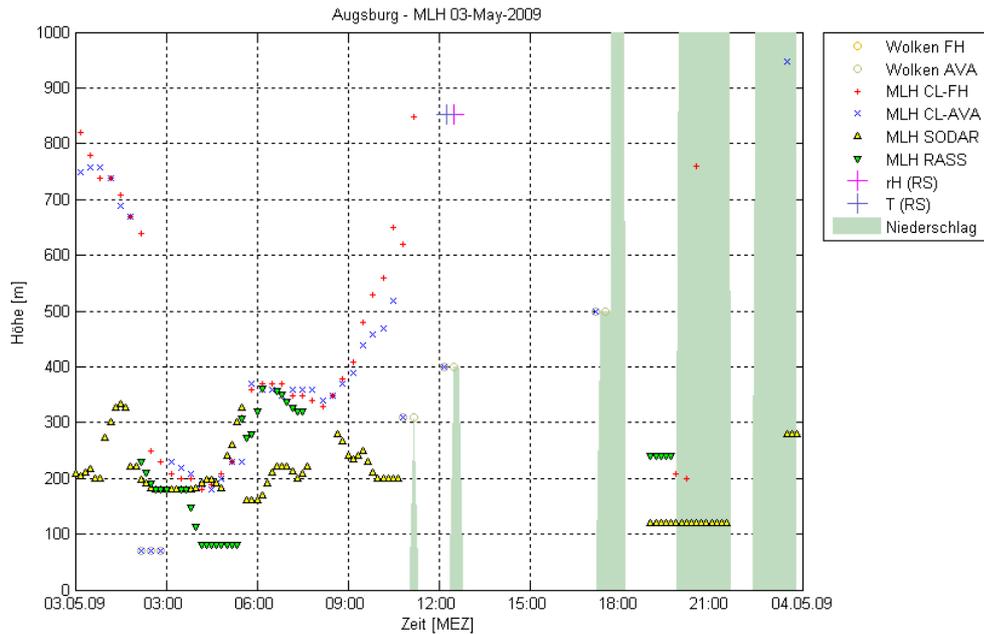


Abbildung 39: MLH-Plot vom 03.05.09 (eigene Darstellung)

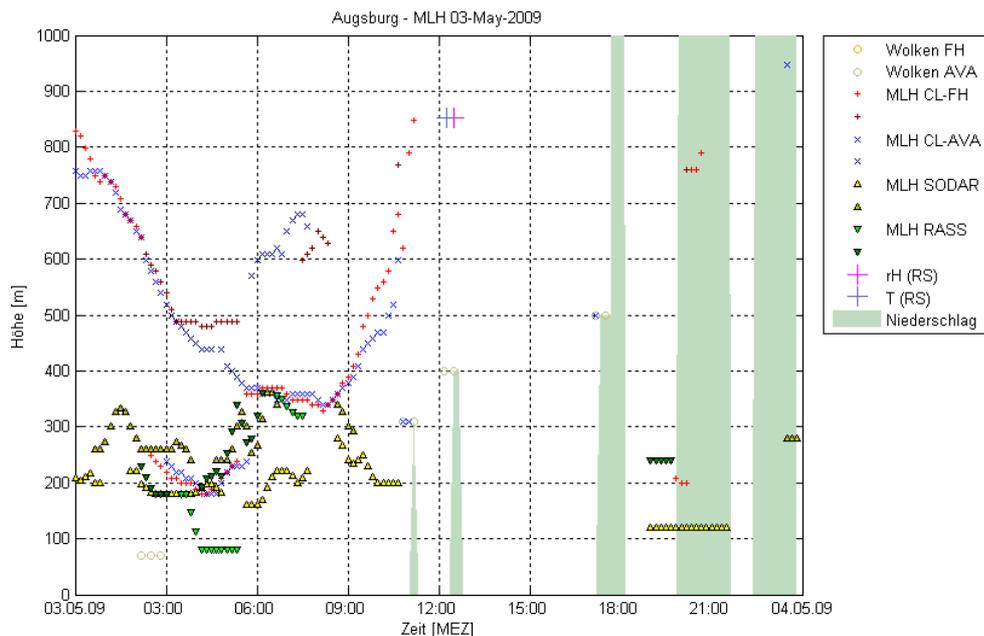


Abbildung 40: MLH-Niveau-Plot vom 03.05.09 (eigene Darstellung)

Schließlich kann als Ergebnis festgehalten werden, dass bei genügend hohen Windgeschwindigkeiten (> 2 m/s) und einem großen Windgeschwindigkeits- und Richtungsgradient eine Schichtung von SODAR, RASS und Ceilometern in gleicher Weise gut erkannt wird, höhere Windgeschwindigkeiten aber unter Umständen dazu führen, dass durch die Partikelverteilung durch erhöhte Turbulenz eine Schichtgrenze von den Ceilometern nicht mehr, vom SODAR aber weiterhin erfasst wird.

Es ist zu diskutieren, welche Auswirkungen eine derartige untere Schicht für die Luftbelastung hat, da ja die Partikelanzahl ausschlaggebend für die Ceilometer ist, die diese Schichtgrenze nicht erkannt haben. Da aber das SODAR deren Vorhandensein bestätigt hat, ist die Frage zu stellen, ob eine Auswirkung auf die Konzentrationen verschiedener Größenklassen besteht. Eine Untersuchung der Verteilung unterschiedlicher Partikel aufgeschlüsselt nach Größen könnte zielführend sein, wird aber aufgrund der Datenlage in dieser Arbeit nicht durchgeführt und soll hier nur als Ausblick erwähnt werden.

Ein höhenkonstant großer Temperaturgradient ist problematisch für die Ermittlung der MLH mit RASS mit der hier verwendeten Methode.

6.2.2.2 Stabile Grenzschicht an der FH

In den Darstellungen der Ceilometervergleiche nach Jahreszeiten und Windklassen (siehe Anhang A, Abb. 57 bis 64) vor allem deutlich in Sommer und Herbst Situationen zu erkennen, bei denen eine tiefe Schichtgrenze im Stadtkern von Augsburg festgestellt wird, wohingegen zum Stadtrandstandort eine Differenz von bis zu 1000 m festzustellen ist. Bei dem entsprechenden Graphen ohne tiefe Wolken und kurzzeitige Events fehlen diese Bereiche weitgehend und sind allenfalls noch im Frühling erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass es sich hierbei entweder um kurzzeitige Vorkommnisse handelt, was aufgrund der Menge eher auszuschließen ist, oder dass die Ursache im Auftreten von Nebel liegt.

Es wird der 08.09.2009 betrachtet, an dem zwischen 8:30 Uhr und 14:30 Uhr eine Differenz von 40 bis über 1000 m entsteht. Die Backscatterplots der Ceilometer zeigen, dass die angestellte Vermutung richtig war und an der FH Nebel, der morgens einsetzt und sich den Tag über bis etwa 16:30 Uhr hält, dafür sorgt, dass die MLH sehr tief angegeben wird, während an der AVA die Entwicklung der CBL gut zu beobachten ist (vgl. Abb. 41, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „08092009“). Nachts scheint der Wärmeineffekt, die Überhitzung der Stadt gegenüber dem Umland, von Augsburg im Vergleich zur verstärkten Kondensation aufgrund höherer Konzentration von Kondensationskernen zu überwiegen, nach Sonnenaufgang kehrt sich dieses Verhältnis um, da die sich schneller erheizenden Stadtoberflächen für einen rascheren Aufstieg sorgen und so das Kondensationsniveau erreicht wird.

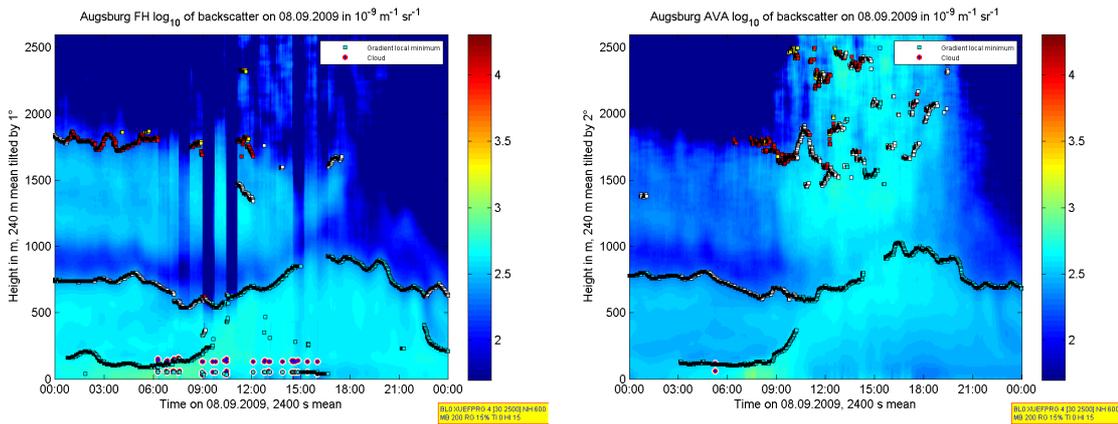


Abbildung 41: Backscatterplots der Ceilometer vom 08.09.09 (eigene Auswertung mit CL-MLH-Control)

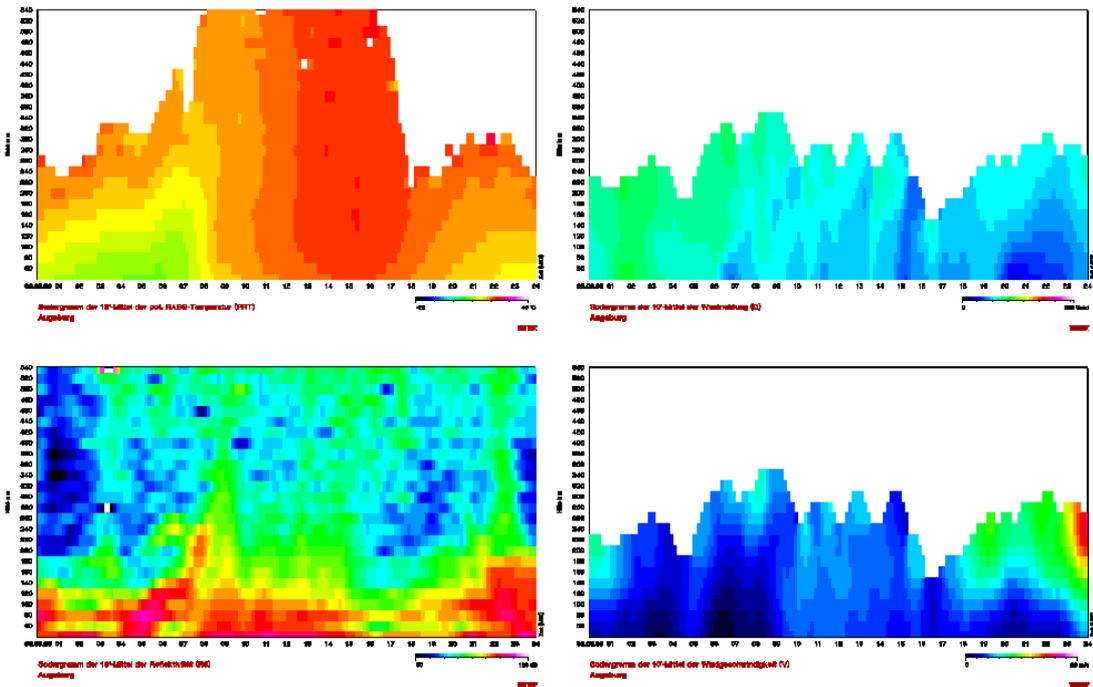


Abbildung 42: Sodargramme von 08.09.09 (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Das Temperaturprofil des RASS deutet an, dass eine nächtliche Inversion ab Sonnenaufgang relativ schnell abgebaut wird und eine konvektive Schicht aufgebaut wird. Der Wind weht mit relativ konstanter Geschwindigkeit aus südöstlicher Richtung. Beim Vergleich aller drei Messmethoden (siehe Abb. 43, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „08092009“) zeigen sich vor allem nachts gute Übereinstimmungen. Das SODAR kann die Schicht über der Inversion kaum erfassen, da die akustische Rückstreuintensität stark fällt. Weil diese aber wesentlicher Bestandteil der Algorithmen ist, kann die MLH dennoch gut erfasst werden.

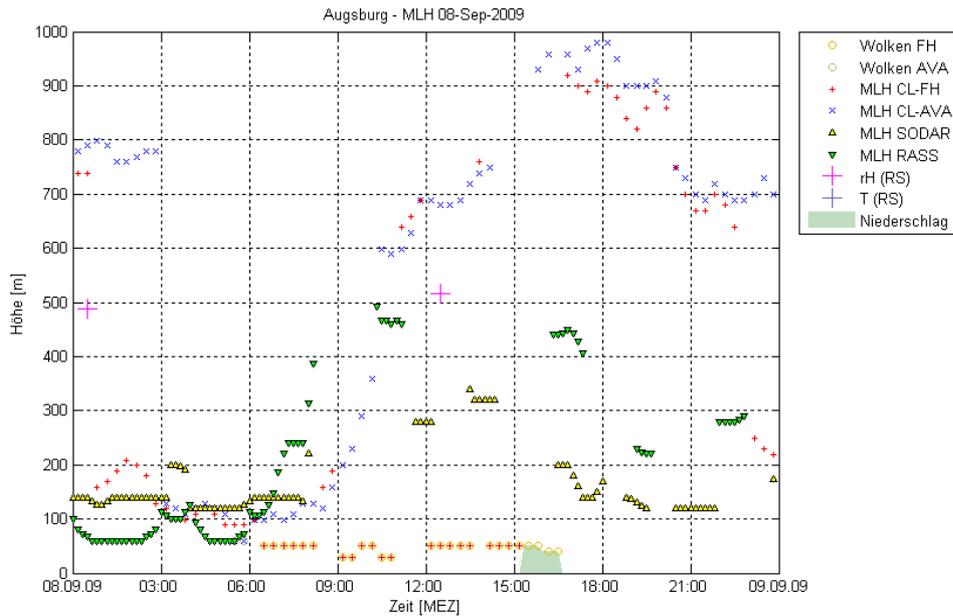


Abbildung 43: MLH-Plot vom 08.09.09 (eigene Darstellung)

Der RASS-Algorithmus erkennt früher ein Ansteigen der MLH als die Ceilometer. Dies liegt daran, dass der Aufbau der CBL durch die Temperatur bedingt ist, die Partikelverteilung aber, auf die der Ceilometer-Algorithmus zugreift, mit Verzögerung aufgrund der Trägheit der Teilchen reagiert.

Auffällig ist, dass der Effekt umgekehrt, also mit niedriger MLH bei der AVA und hoher bei der FH kaum zu erkennen ist. Daher kann die Vermutung angestellt werden, dass eine SBL, die am Stadtrand vom Ceilometer in Augsburg Nord erfasst wird, ebenso im Stadtkernbereich zu ermitteln ist. Ein Vergleich der in MATLAB gebildeten Niveaus kann darüber Aufschluss geben, denn betrachtet man sich das untere AVA-Niveau im Gegensatz zum oberen FH-Niveau ist vor allem bei Westwinden eine markante Schichtgrenze bei 100 m deutlich sichtbar, dieses Cluster zeigt sich bei der Gegenüberstellung der beiden unteren Niveaus kaum noch, hier tritt dann hingegen wieder das 800 m –Cluster auf (siehe Anhang A, Abb. 73 und 74). Dies ist gut am Beispiel des 19.02.2009 zu sehen (siehe Abb. 44), hier finden beide Ceilometer die Höhe der SBL bei etwa hundert Meter, das nächste Niveau liegt zwischen 300 m und 500 m am Morgen und Vormittag. Hier löst sich die stabile Grenzschicht erst gegen 10:00 Uhr zu Gunsten der Entwicklung einer konvektiven Grenzschicht, deren maximale Ausdehnung bei ca. 850 m und somit über dem Messbereich des SODAR liegt. Abends bildet sich ab 18:00 Uhr wieder bodennah eine SBL aus, welche wie auch die zu Beginn des Tages von allen vier Messmethoden gut erkannt wird. Diese Situation wird auch aus der Darstellung der Stabilität nach der Richardsonzahl deutlich, die nächtliche stabile Schichtung wird am Vormittag gehoben und löst sich schließlich

ab Mittag auf, bzw. ist am etwa 12:00 Uhr keine hoch reichende Stabilität mehr gegeben. Erst am Abend beginnt sich erneut ein SBL auszubilden (siehe Abb. 45).

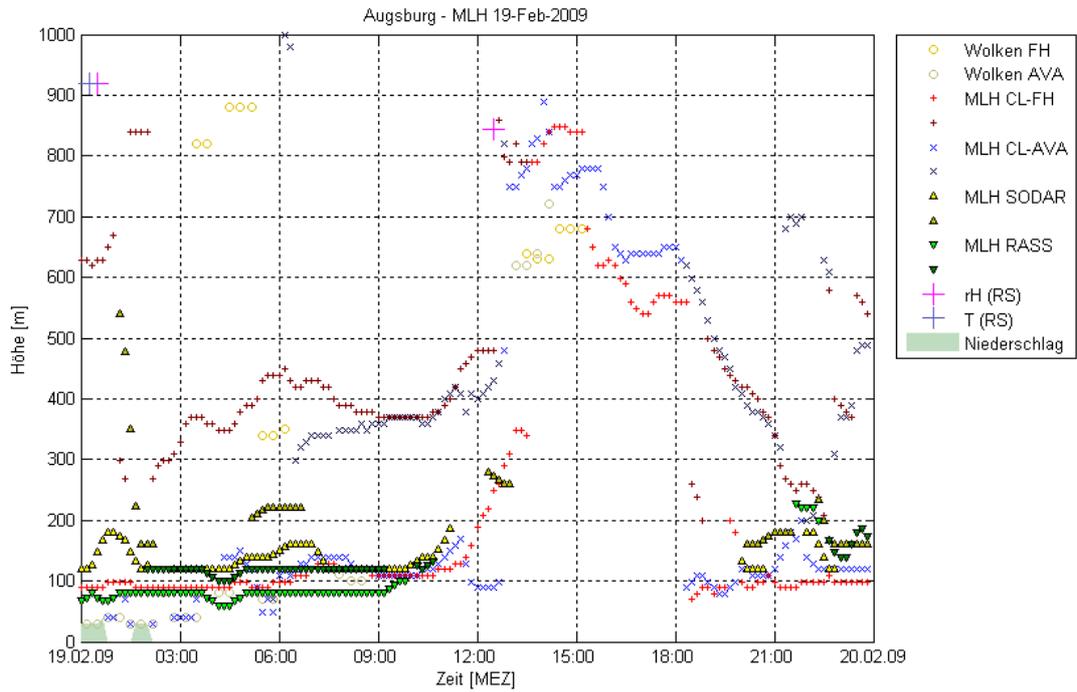


Abbildung 44: MLH-Plot vom 19.02.09 (eigene Darstellung)

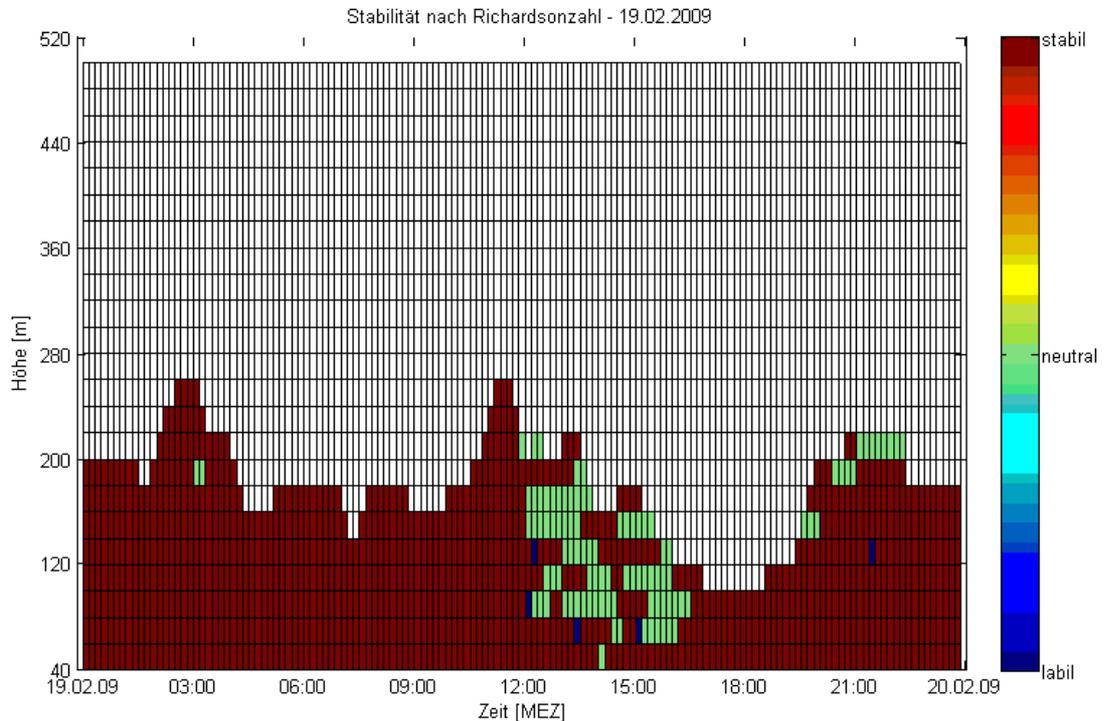


Abbildung 45: Profil der Stabilität nach Richardson vom 19.02.09 (eigene Darstellung)

Schließlich kann aus der Betrachtung der beiden Tage 08.09.2009 und 19.02.2009 festgehalten werden, dass eine (nächtliche) stabile Grenzschicht von allen Geräten gleichermaßen gut erkannt wird, während lokale Einflüsse bei einem der Geräte zu Differenzen der MLH führen können, da aber bei stabiler Wettersituation als markante Cluster im Scatterplot deutlich werden. Eine Niveaubestimmung hilft bei der Identifizierung von Stadtklimaeffekten. Zudem wurde deutlich, dass das RASS methodenbedingt schneller auf konvektive Prozesse reagiert als die Ceilometer.

In den Ceilometer-Plots vom 08.09.2009 ist im Höhenniveau von etwa 700 m bis 800 m zudem schön der RL zu erkennen. Dies ist, wie in der einführenden Analyse schon bemerkt wurde (vgl. 6.2.1), eine markante Höhe, die bei der AVA häufiger zu beobachten ist während bei der FH die MLH tiefer ermittelt wird, und soll deshalb an einem weiteren Beispiel untersucht werden.

6.2.2.3 Höhenniveau der CBL und Residualschicht

Besonders an Herbsttagen sind zwei Niveaus in 100 m bis 300 m und 700 m bis 900 m sehr gut zu erkennen, aber auch zu anderen Zeitpunkten ist dies ein wiederkehrendes Phänomen. Wie in den vorhergehenden Beispielen zu sehen war sind dort die Höhen der SBL bzw. CBL und RL zu finden, dennoch ist auffällig, dass an der FH häufig das Gradientenminimum etwas tiefer findet, oder anders betrachtet im Bereich des Stadtkörpers das Niveau der CBL- bzw. RL-Grenze weniger häufig vorhanden ist oder nicht erfasst wird, was am Beispiel der Nacht zwischen 26. und 27.11.2009 untersucht werden soll. Hier wird die MLH in Augsburg Nord häufig oberhalb von 600 m angegeben, während die des Ceilometers am Innenstadtstandort darunter liegt, wobei dort die Daten keine klare stabile Grenzschicht andeuten und das Wertespektrum zwischen 90 m und 900 m liegt.

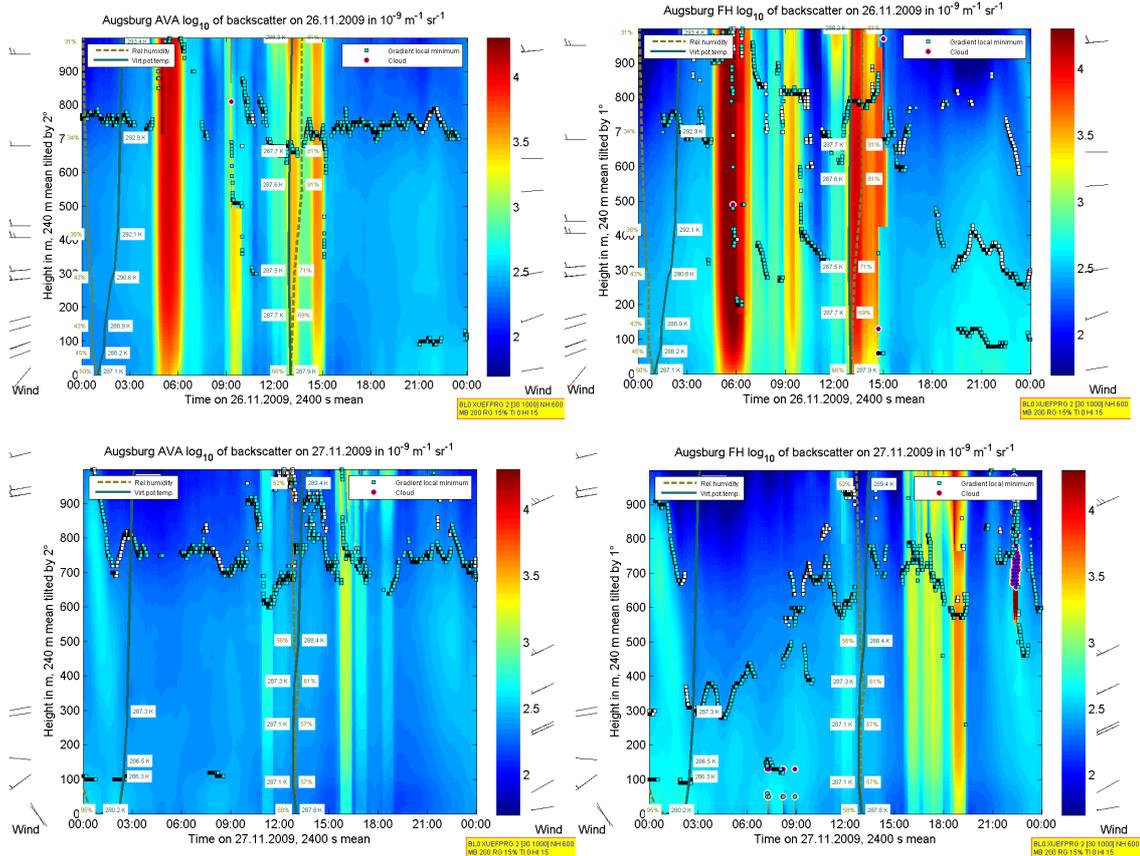


Abbildung 46: Backscatterplots der Ceilometer vom 27.11.09 (eigene Auswertung mit CL-MLH-Control)

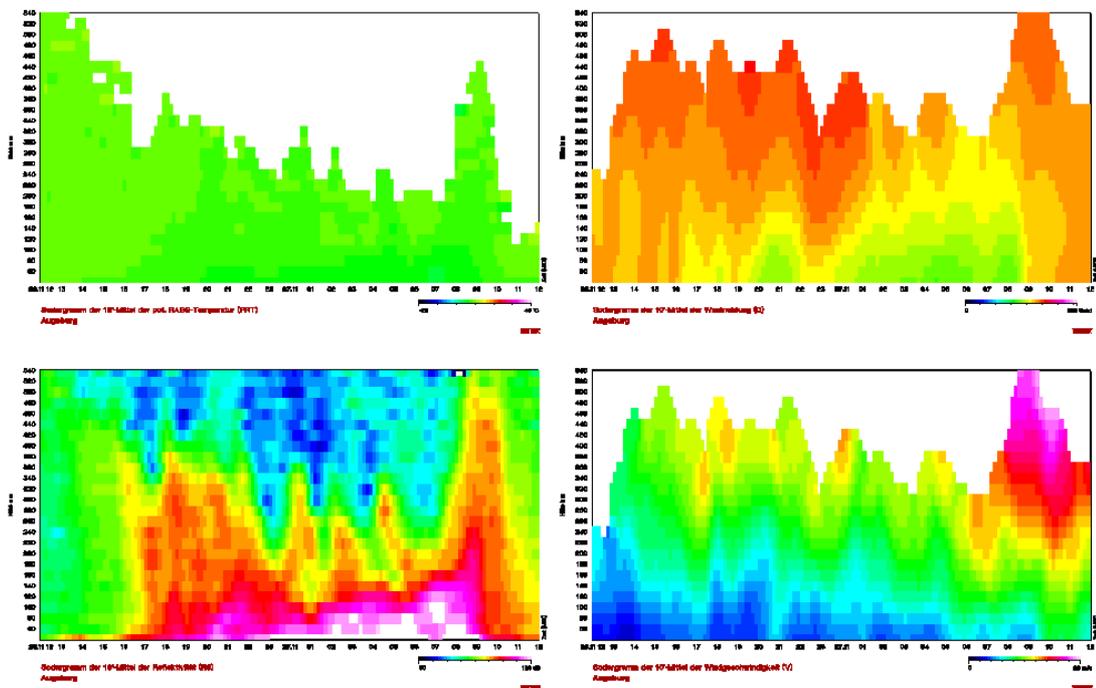


Abbildung 47: Sodargramme vom 26.-27.11.09 (12:00 Uhr bis 12:00 Uhr) (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Die Backscatterplots der beiden Tage 26.11.09 und 27.11.09 verdeutlichen die Differenzen in der MLH-Ermittlung, denn während bei der AVA hauptsächlich das angesprochene 800 m Niveau und vereinzelt eine untere Schichtgrenze bei 100 m angezeigt wird, sind an der FH drei markante Höhen feststellbar bei 100 m, 300-400 m und 800 m (vgl. Abb. 46, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „26112009“). Das Temperatursodargramm dieser Nacht deutet auf eine neutrale Temperaturschichtung hin, der Wind weht nachmittags am 26.11. mit mäßiger Geschwindigkeit aus Südwestlicher Richtung, gegen 20:00 Uhr nimmt bodennah die Südkomponente zu. Die Windgeschwindigkeit steigt im Ganzen Zeitintervall mit der Höhe und allmählich auch im zeitlichen Verlauf, der violette Bereich am 27.11. morgens über 400 m deutet darauf hin, dass sich in der Höhe eine starke Westwindsituation ausgebildet hat. Dies erklärt auch das Bild der akustischen Rückstreuintensität, die oberhalb eines Niveaus, das im Lauf der Nacht von 500 m auf 300 m sinkt, sehr gering ist.

Es ist also ein Unterschied zwischen Stadtkern und Stadtrand bemerkbar, der aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten und dem geringen Temperaturgradienten nicht auf Konvektion, sondern auf das städtische Windfeld zurückzuführen ist. Im Lauf der Nacht wirkt sich nach Auflösung der Wolken, die durch die kurzen Regenschauer am Nachmittag des 26.11. angedeutet werden, die starke Westwindströmung weiter nach unten aus, wo sie aber vor allem im Stadtkerngebiet durch die Bebauung behindert und gebremst wird, die Strömungsrichtung wird durch die Reibung im Sinne der EKMAN-Spirale geändert, so dass sich vor allem ab Mitternacht bodennah eine Süd-Nord-Strömung schwacher Windgeschwindigkeit ausbildet. Dadurch erklären sich die drei Schichthöhen über der Stadt, die Stadtatmosphäre gliedert sich hier deutlich in eine bodennahe Hindernisschicht mit geringsten Windgeschwindigkeiten bis 100 m, über der die Stadtreibungsschicht bis ca. 300 m den Übergangsbereich zur Mischungsschicht bis 800 m darstellt. An der AVA wird die URS-Höhe nicht erkannt, die Rückstreuintensitäten lassen darauf schließen, dass Partikel hier schon zu gut verteilt sind, allenfalls die bodennahen Südwinde bilden einen Gradienten zur darüber liegenden Strömung, so dass hier auch aufgrund der aus dem Stadtbereich herangetragenen Partikel eine Schichtgrenze aus dem optischen Rückstreuprofil erkannt wird.

Zieht man nun einen Vergleich zu der mit den SODAR-Daten ermittelten MLH wird deutlich, dass bis 0:00 Uhr nur das 300 m Niveau, nach Ansteigen der UCL über 100 m und somit über die Höhe, die im SODAR-Algorithmus als unterer Grenzwert

angegeben ist, aber beide Niveaus der Stadtgrenzschicht erfasst werden. Wegen der vorherrschenden Südwestrichtung setzt sich der Reibungseinfluss der Bebauung auch im Norden der Stadt fort und nimmt Einfluss auf die akustische Rückstreuintensität. Ab Mitternacht erkennt das RASS ebenfalls beide unteren Schichthöhen nachdem sich durch die nächtliche Auskühlung vom Boden her ein Temperaturgradient nach oben fortsetzt.

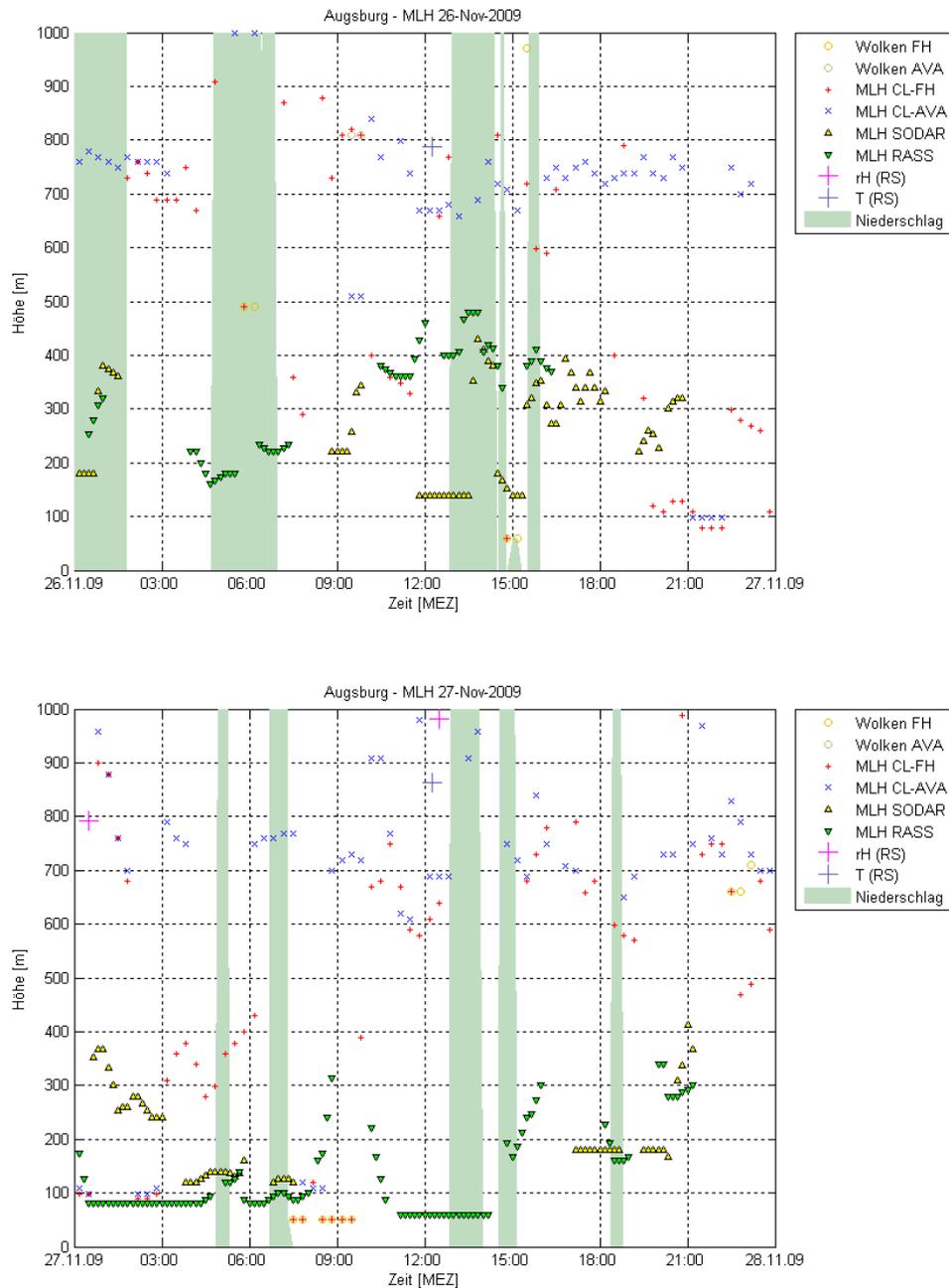


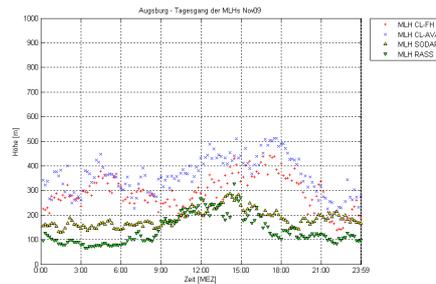
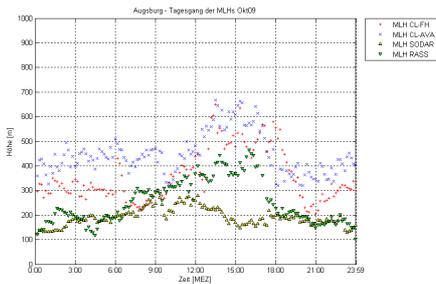
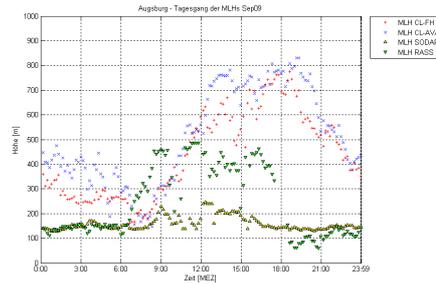
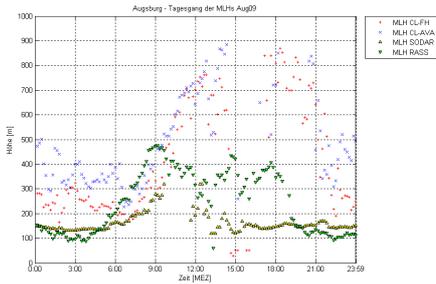
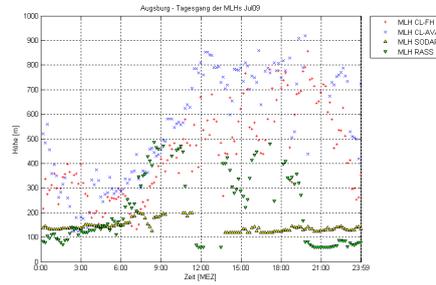
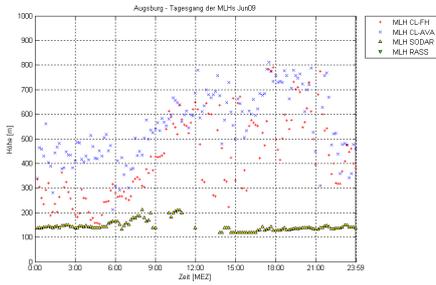
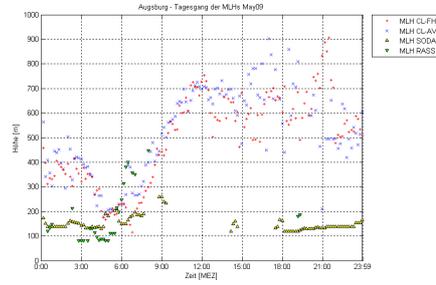
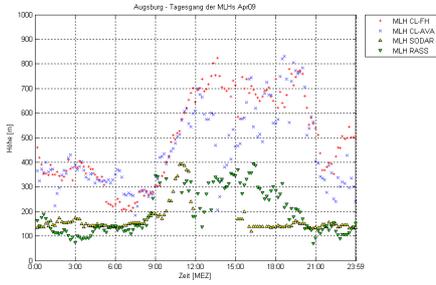
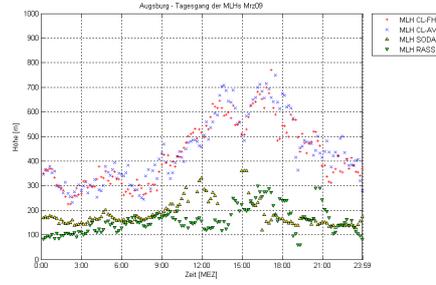
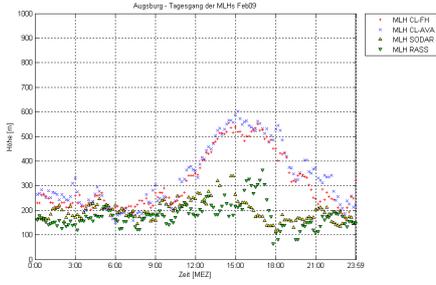
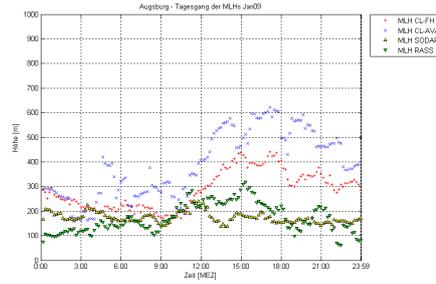
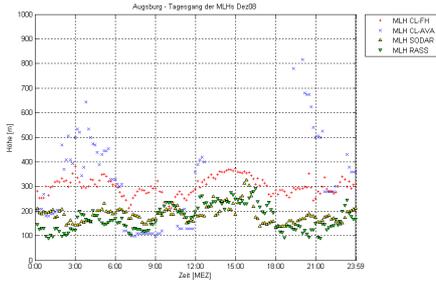
Abbildung 48: MLH-Plots des 26.11.09 (oben) und 27.11.09 (unten) (eigene Darstellung)

Da also der Stadtkörper Einfluss auf das Windfeld nimmt kommt es unter Umständen zu Unterschieden in der MLH-Bestimmung zweier an verschiedenen Standorten aufgestellter Ceilometer. Die SODAR-Algorithmen bieten hierbei weiter Aufschluss, da sie durch die Berücksichtigung der vertikalen Windkomponente besser die Struktur des Windfeldes charakterisieren können als die Ableitung aus der Partikelverteilung. Auch das RASS konnte die Luftschichtung besser wiedergeben, als das am selben Standort platzierte Ceilometer, welches in diesem Beispiel wegen der geringen optischen Rückstreuung und guten Durchmischung aufgrund relativ hoher Windgeschwindigkeiten die Höhe der Stadtreibungsschicht nicht wiedergeben konnte. Die Grafiken über den Vergleich der Ceilometer nach Jahres- und Tageszeit zeigen, dass der URS tatsächlich weniger häufig an der AVA bestimmt wird. Dabei muss beachtet werden, dass das Auftreten einer URS-Fahne über Augsburg Nord auch abhängig von der Windrichtung ist, deren Nicht-Existenz in diesem Sinne aber Nordwinde voraussetzt, die wie die Untersuchungen belegen in Augsburg sehr selten sind.

6.3 Analyse von Zeitreihen

6.3.1 Vergleich der Messmethoden am mittleren Tagesgang der MLH

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln zu sehen war, unterliegt die MLH einem ausgeprägten Tagesgang, der modellhaft im Kapitel über die allgemeine Struktur der MLH besprochen wurde (vgl. 3.2). Dieses Verhalten der Luftschichtung kann mit den vorliegenden Daten bestätigt werden, dazu sollen die mittleren Tagesgänge der MLH der einzelnen Monate des Messzeitraumes beleuchtet werden. Es wird hierbei zu jedem Zeitintervall der Mittelwert der aller entsprechenden Werte eines Monats zu jedem der vier Messverfahren ermittelt. Daraus ergeben sich für die 15 Monate (Dezember 2008 bis Februar 2009) Plots des mittleren Tagesganges der MLH im Stil der bereits gezeigten Abbildungen (siehe Abb. 49, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „Tagesgang MLH“). Zu beachten ist hierbei die Datenverfügbarkeit, die nicht immer im gleichen Maße gegeben ist.



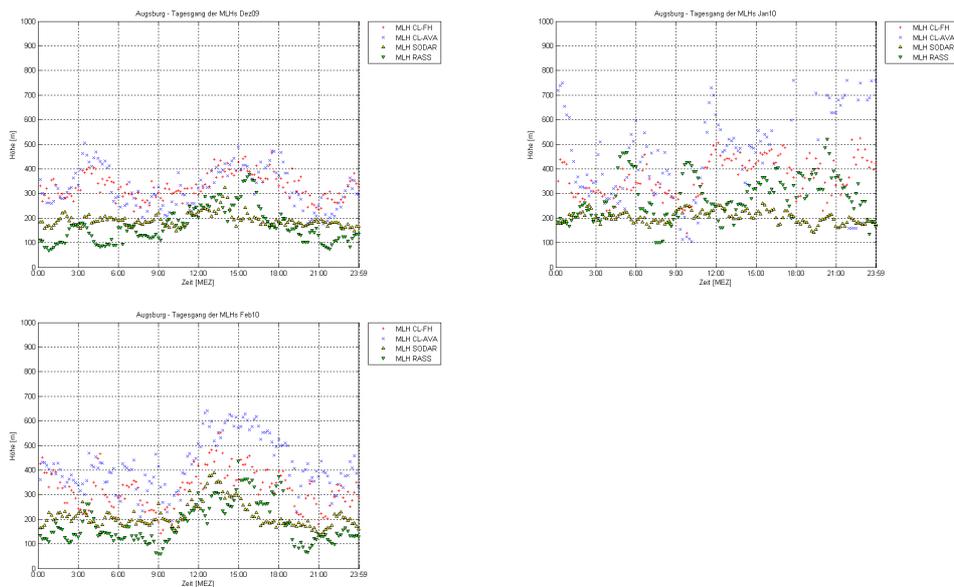


Abbildung 49: mittlerer Tagesgang der MLH pro Monat (eigene Darstellung)

Gut zu beobachten ist, wie nachts eine SBL in wenigen hundert Meter Höhe die obere Grenze der Durchmischung bildet und sich am Vormittag die CBL aufbaut, die abhängig von der Einstrahlungsintensität und –dauer unterschiedlich hoch reichend ist. Vor allem SODAR und RASS zeigen dem am Abend erneut einsetzenden Aufbau einer neuen SBL, während die Ceilometer im Mittel ein höheres Niveau wiedergeben. Auch wenn der Verlauf der MLH aus Ceilometerdaten ein Absinken vermuten lässt, sind die Ursache hierfür in der Methodik zu suchen: nach Sonnenuntergang und somit Stopp der Einstrahlung wird Thermik nur noch durch Ausstrahlung der in den Oberflächen gespeicherten Energie erzeugt, dementsprechend sinkt der vertikale Einfluss auf die Durchmischung und das Gradientminimum wird in einer geringeren Höhe erreicht, weiterhin wird hier jeweils der Mittelwert eines Monats angezeigt, dieser ergibt sich beim Ceilometer aus den Höhen der Residualschicht und der SBL, weshalb die MLH höher angegeben wird als von SODAR und RASS, da diese wegen dem begrenzten Messbereich die Höhe des RL meist nicht erfassen können.

In diesem Zusammenhang ist auch die Tatsache zu sehen, dass SODAR und RASS die MLH in vielen Fällen tiefer als die Ceilometer angeben, diesem Sachverhalt liegen aber noch weitere Eigenschaften der unterschiedlichen Methodik zur Bestimmung von Schichtgrenzen zugrunde. Zum einen wird im Programm CL-MLH-Control das Gradientminimum der optischen Rückstreuung mit einer Mittelung von 2400 Sekunden gebildet, d. h. um Sprünge zu vermeiden wird das vorherrschende Niveau in diesem Zeitintervall bei der Höhenbestimmung beachtet, der SODAR-Algorithmus geht zunächst nur auf das zu untersuchende Zeitintervall ein, eine Niveaubildung wird erst

später durchgeführt und schlägt sich in diesem Vergleich nicht nieder. Zum anderen greift die Ermittlung des Gradientenminimums bei dem Ceilometer-Algorithmus nur auf eine Maßgabe, nämlich die Unterschreitung eines Grenzwertes, zurück, während für die Bestimmung der MLH aus SODAR-Daten drei Algorithmen mit jeweils mindestens zwei Kriterien für die akustische Rückstreuung und die Varianz des Vertikalwindes verwendet werden, aus denen schließlich die unterste Höhe verwendet wird unabhängig vom vorherrschenden Niveau. Eine Verschärfung der Kriterien würde letztlich dazu führen, dass unter Umständen die Übereinstimmung mit den Ceilometer-MLH's größer ist, aber schwächer ausgeprägte Strukturen nicht mehr erkannt werden. Somit ist insgesamt der Unterschied von optischer und akustischer Rückstreuung zu beachten, die Ableitung aus Partikelverteilung oder Temperatur und Windfeld. Ähnliches gilt für die Betrachtung der Schichtgrenzenermittlung mit RASS, hier ist zudem zu beobachten, dass die MLH zum Teil noch unterhalb der des SODAR liegt, die Ursache liegt darin, dass bei letzterem die Mindesthöhe für die MLH-Bestimmung auf 120 m festgelegt wurde. In Mai, August und September 2009 ist ebenfalls gut erkennbar, dass das RASS den Aufbau der CBL früher registriert als die Ceilometer. Letztlich ist bemerkenswert, dass das Ceilometer im Innenstadtbereich zum Teil die MLH unterhalb der des Stadtrand-Ceilometers ermittelt. Zwei Ursachen können hierfür in die Diskussion eingebracht werden: einerseits unterscheidet sich die Partikelzusammensetzung in der Stadt von der des Umlandes. Durch verschiedene Emittenten wie Verkehr, Hausbrand und Industrie werden in Stadtgebieten mehr Schadstoffe freigesetzt als im Umland, die Überwärmung der Stadt begünstigt zudem chemische Prozesse der Partikelbildung (vgl. LfU 2009). Es ist daher davon auszugehen, dass in der Stadt die Konzentration schwerer Partikel, die unter Umständen einer geringeren vertikalen Bewegungskomponente unterliegen, größer ist als im Umland und daher das Ceilometer im Stadtkern früher die Unterschreitung eines Gradientenminimums ermittelt. Andererseits wirkt auf diese Partikelverteilung das städtische Windfeld ein, das aufgrund des unterschiedlichen Einflusses der Reibung durch die Bebauungsstruktur eine gewisse Gliederung erfährt. Abhängig von Windrichtung und -Geschwindigkeit setzt sich diese Struktur im Randbereich der Stadt fort.

6.3.2 Jahrgang der MLH

Ebenfalls gut zu erkennen in den Darstellungen des mittleren Tagesganges ist der Jahrgang der MLH. Während im Winter die maximale Amplitude der MLH nur bis etwa 600 m reicht, steigt die CBL in den Sommermonaten auf über 1000 m. Dies liegt

an der längeren Einstrahlungsdauer sowie an den höheren Temperaturen im Sommer, wodurch eine früher einsetzende und höher reichende Konvektion bewirkt wird, wohingegen im Winter eine stabile nächtliche Inversion früher einsetzt und über einen längeren Zeitraum bestehen bleibt, da die Einstrahlung erst später einsetzt.

6.3.3 Besonderheit Februar – März 2009

Beachtenswert ist der Vergleich von Februar und März 2009, denn es fällt auf, dass die von SODAR und RASS ermittelte MLH im März tiefer liegt als im Februar, während die der Ceilometer höher angegeben wird. Letzteres ist hinsichtlich des Jahresverlaufes der MLH zu erwarten, interessant ist der gegenläufige Trend der akustischen Verfahren. Es ist also davon auszugehen, dass die Temperaturverhältnisse in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen, weshalb zunächst die Profile der potentiellen Temperatur aus den RASS-Daten betrachtet werden sollen (siehe Abb. 50).

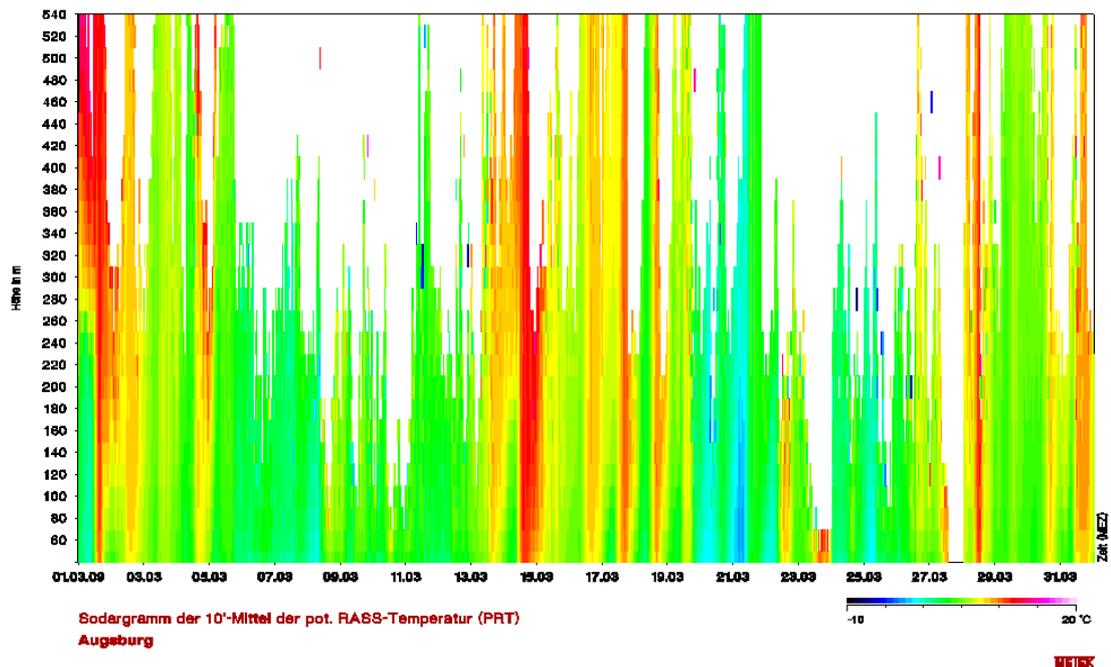
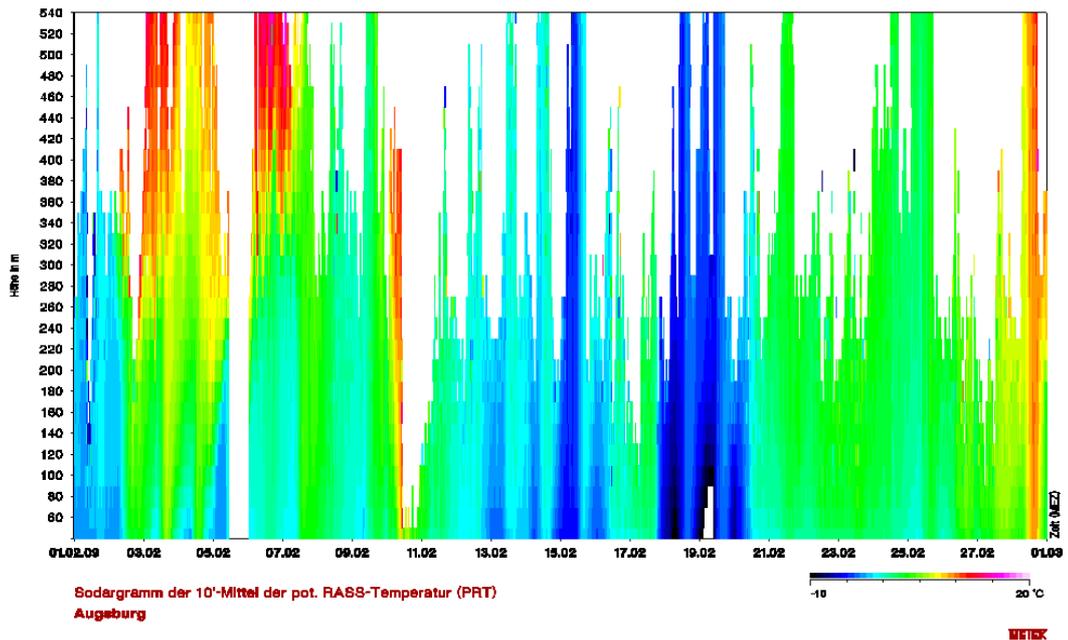


Abbildung 50: Potentielle Temperatur der Monate Februar (oben) und März (unten) 2009 (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Blaue Bereiche stellen Temperaturen unter 0°C dar, grüne bis rote Bereiche stehen für Temperaturen zwischen 0°C und 15°C. Offensichtlich ist der März wesentlich wärmer als der Februar 2009, während ein Temperaturgradient von 0,7°C in einem tieferen Niveau erreicht wird. Durch einen größeren Umsatz von kurzweiliger in langwellige Strahlung an der Geländeoberfläche wird bodennahe Luft stärker erwärmt als bei

geringerer Wärmebilanz, unter diesen Voraussetzungen wird also allgemein ohne Berücksichtigung von advektiven Prozessen die AGS vom Untergrund ab erwärmt. Daher wird unter diesen Voraussetzungen im März ein tiefer liegender Temperaturgradient erkannt als im Februar. Weiterhin kann die Schneebedeckung, über die keine Daten vorliegen, in diesem Zusammenhang eine weitere Rolle spielen indem die Oberflächenalbedo durch Schneeschmelze verringert wird.

6.4 Vergleich der beiden Winter 08/09 und 09/10

Auffällig bei der Betrachtung des mittleren monatlichen Tagesganges der MLH sind die beiden Winterperioden im Vergleich, vor allem am RASS ist gut eine unruhigere Struktur im Winter 09/10 zu erkennen als im vorhergehenden Winter, auch das Ceilometer an der FH weist im Winter 08/09 im Vergleich einen besser ausgeprägten Tagesgang auf. Da für Dezember 2008 und Januar 2009 aufgrund technischer Probleme nur wenige Daten des Ceilometers an der AVA zur Verfügung stehen, soll dieses Messsystem bei der Betrachtung außen vor gelassen werden.

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt können gewisse Phänomene anhand der Wind- und Temperaturverhältnisse genauer analysiert werden. Betrachtet man sich zunächst die potentiellen Temperaturen beider Monate, dies ist sinnvoll angesichts des Verlaufs des RASS-Gradienten, fällt auf, dass im Winter 09/10 häufiger ein Wechsel von relativ kalten zu wärmeren Temperaturverhältnissen stattfindet, während im Winter 08/09 einheitlichere Temperaturverhältnisse vorliegen (vgl. Abb. 51). Diese Annahme wird durch die prozentuale Häufigkeitsverteilung bestätigt, bei einer Intervallbreite von 2,8K (Bestimmung durch METEK-Software) zeigt die Verteilung im Winter 08/09 ein Maximum beim Intervall um 1°C, im Winter 09/10 sind zwei Scheitelpunkte bei -2°C und 4°C erkennbar (vgl. Abb. 52).

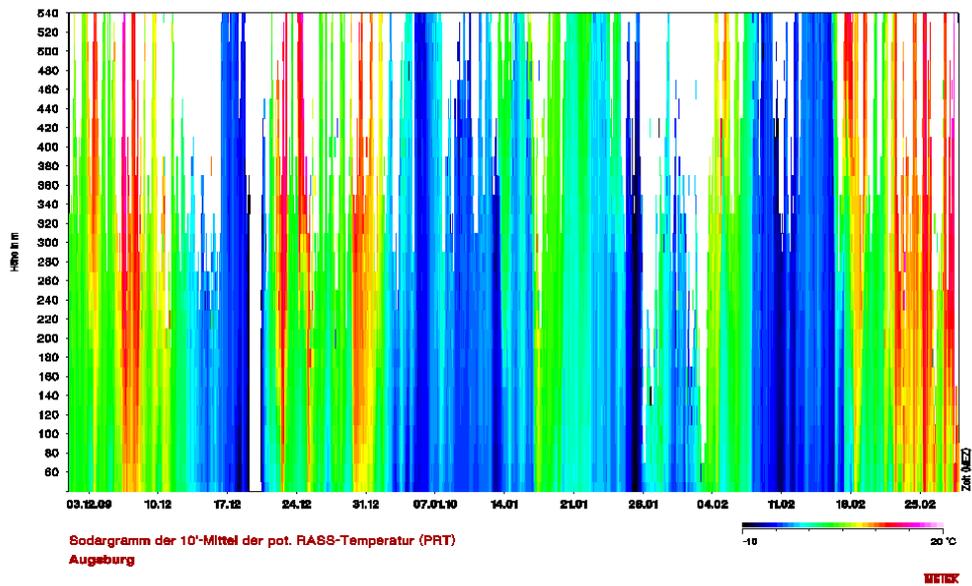
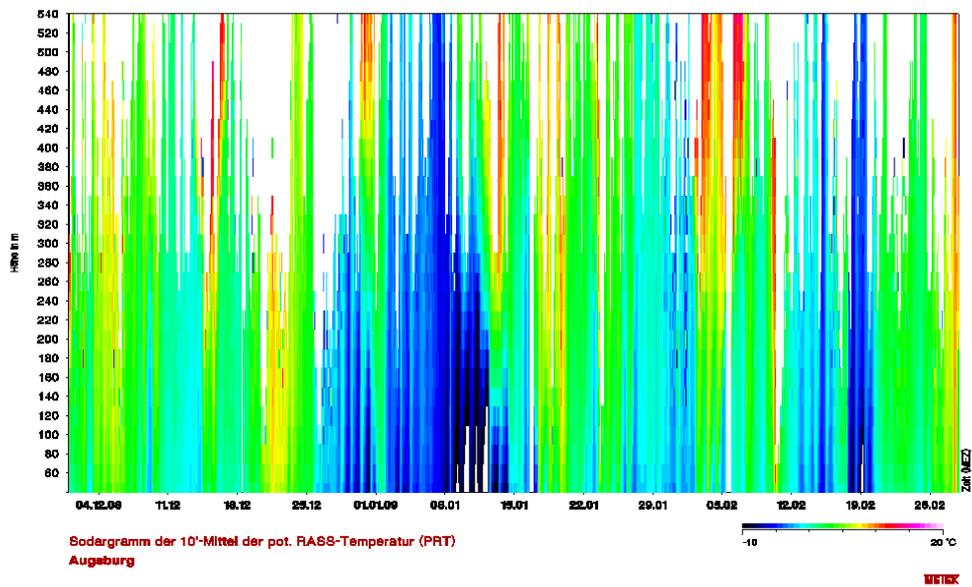


Abbildung 51: Potentielle Temperatur der Beiden Winter 08/09 (oben) und 09/10 (unten) (eigene Auswertung mit METEK-Software)

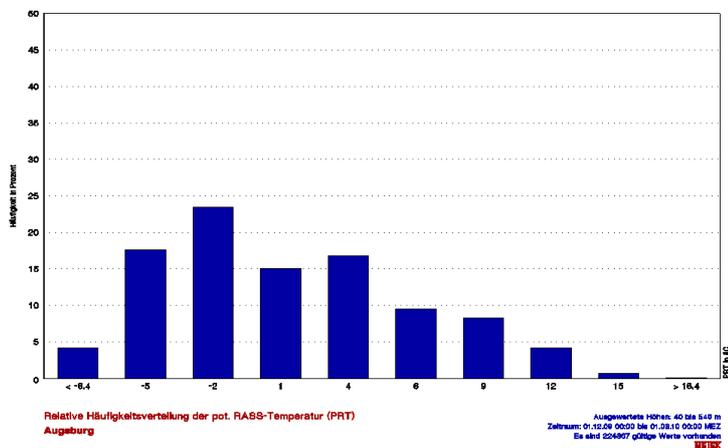
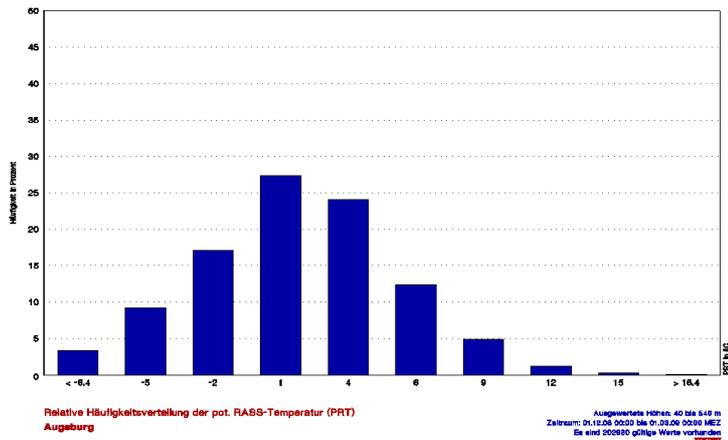


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten Winter 08/09 (oben) und 09/10 (unten). (eigene Auswertung mit METEK-Software)

Auch die Windverteilung zeigt einen deutlichen Unterschied der beiden Winter: geringere Windgeschwindigkeiten treten im Winter 08/09 häufiger auf, dieses Verhältnis dreht sich bezüglich der hoher Windgeschwindigkeit um.

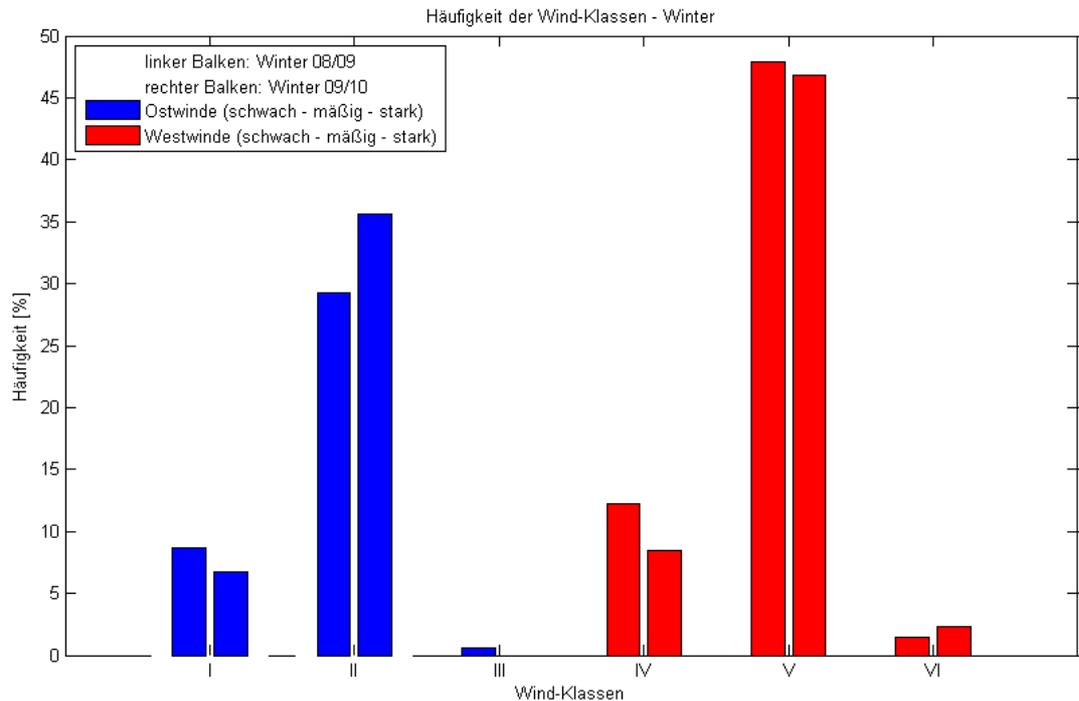


Abbildung 53: Häufigkeit der Windklassen beider Winterperioden (eigene Darstellung)

Schließlich kann festgehalten werden, dass der Winter 08/09 sich durch mehr Stabilität ausgezeichnet hat als der Winter 09/10, dies ist angezeigt durch höhere Windgeschwindigkeiten und häufigere Wechsel der Temperaturverhältnisse in dem zweiten Betrachtungszeitraum, was auf ein größeres Vorkommen advektiver Prozesse hindeutet, während im ersten Betrachtungszeitraum vor allem nachts in Januar 2009 und Februar 2009 im mittleren Tagesverlauf eine SBL stärker ausgeprägt ist.

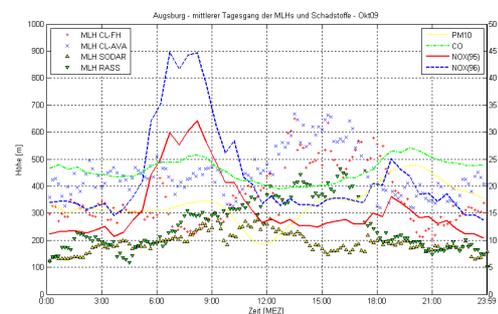
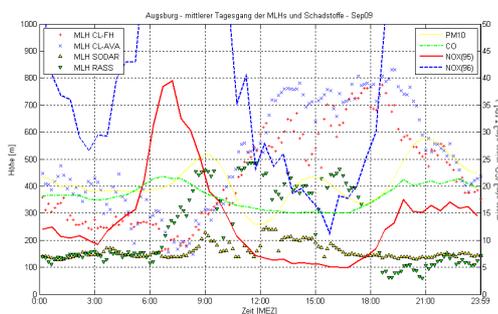
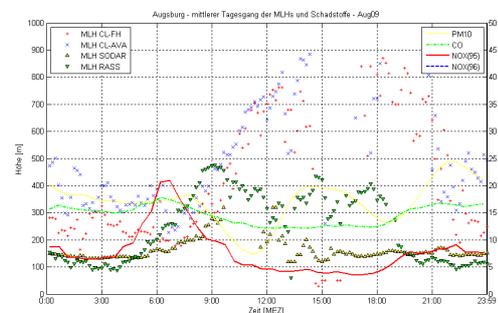
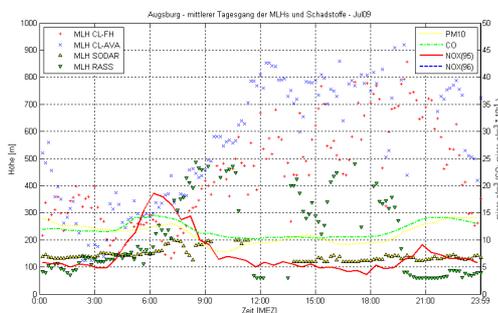
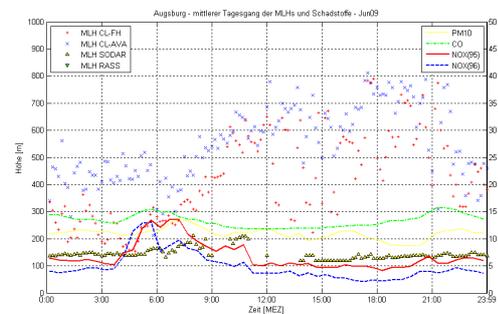
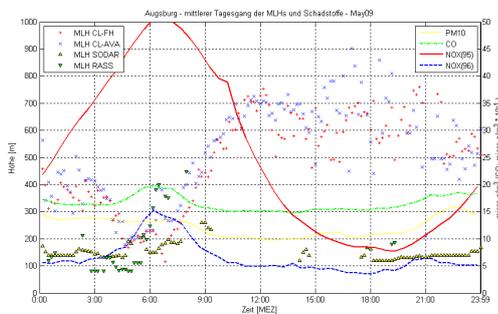
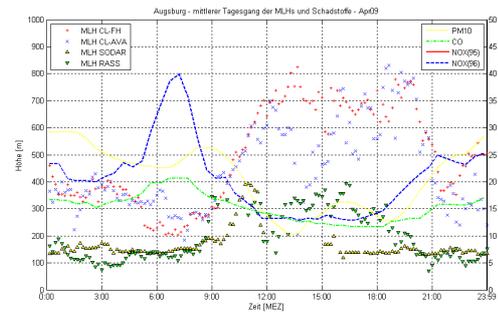
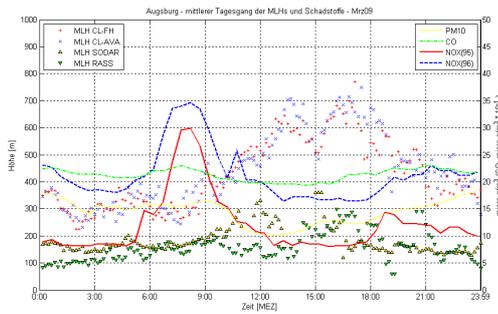
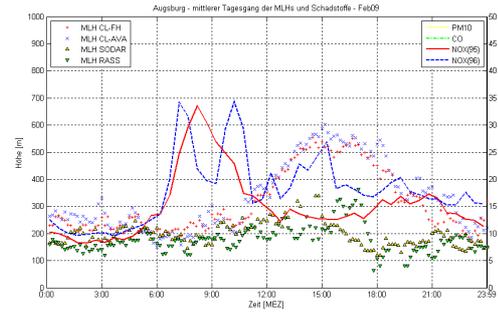
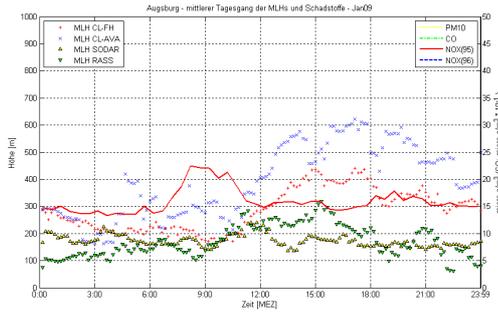
6.5 Vergleich des mittleren Tagesganges der MLH mit Luftschadstoffen

Im Kapitel 6.3 wurde gezeigt, dass im gesamten Messzeitraum von den verschiedenen Messmethoden gut ein mittlerer Tagesgang der MLH beschrieben wird, dessen Ausprägung unter anderem, dies ist aus dem Vergleich der beiden Winterperioden ersichtlich, von der Schichtungsstabilität abhängig ist. Diese ist außerdem zu beachten bei der Ausbreitung von Luftschadstoffen, da bei stabiler Schichtung und niedriger MLH die vertikale Verteilung von Schadstoffen behindert wird, während ein gut durchmischter CBL niedrige Konzentrationen von Luftverunreinigungen bewirkt. Aufgrund dieser Tatsachen soll die MLH zu Schadstoffkonzentrationen in Bezug gesetzt werden um zu prüfen, inwiefern diese Abhängigkeit auf den Messzeitraum und

den Untersuchungsraum Augsburg zutrifft. Nochmals sei an dieser Stelle betont, dass es sich bei den Schadstoffdaten um unkorrigierte Rohdaten handelt, die nur zur Veranschaulichung von Größeverhältnissen dienen können, für eine weitere Diskussion sei auf die Diplomarbeit von Markus Höß verwiesen, die etwa zeitgleich zu dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit dem IMK-IFU erstellt wird und unter anderem den Vergleich von Schadstoffkonzentrationen und der MLH anhand verschiedener winterlicher Intensivmessphasen zum Inhalt hat.

Dargestellt werden die MLH's der verschiedenen Messmethoden in üblicher Form sowie die Konzentrationen der Schadstoffe CO, NOX und PM10 jeweils anhand des mittleren Tagesganges der einzelnen Monate des Messzeitraumes (siehe Abb. 54, vergrößerte Abbildungen im Anhang B (CD-ROM), Ordner „Tagesgang Schadstoffe“). Dabei ist zu beachten, dass aufgrund von Systemausfällen nicht immer Daten jedes Schadstoffes über den ganzen Betrachtungsmonat zur Verfügung stehen, vom Dezember 2008 liegen zum Zeitpunkt der Bearbeitung keine Daten vor.

Dennoch wird auch hier ein gewisser Tagesgang erkennbar: zum einen finden sich zwei Spitzen der Konzentrationen morgens um ca. 7:00 Uhr und abends ab ca. 17:30 Uhr, gut zu erkennen in Oktober und November 2009. Diese markieren erhöhte anthropogene Aktivität (Beginn der Tagesaktivität, Heizung, erhöhtes Verkehrsaufkommen) und daraus resultierend Emission. Zum anderen fällt auf, dass bei hoch reichender Konvektion (August, September 2009) tagsüber die Konzentrationen auf einem geringeren Niveau sind als nachts, wohingegen sich bei im Vergleich dazu niedriger mittäglicher MLH die Emissionen aus der morgendlichen Rush Hour weniger stark verteilt werden und im selben (März 2009) oder sogar einem höheren Niveau liegen als nachts (November 2009). Ein Vergleich der jeweiligen Konzentrationen zueinander ist aus den genannten Gründen hier nicht sinnvoll.



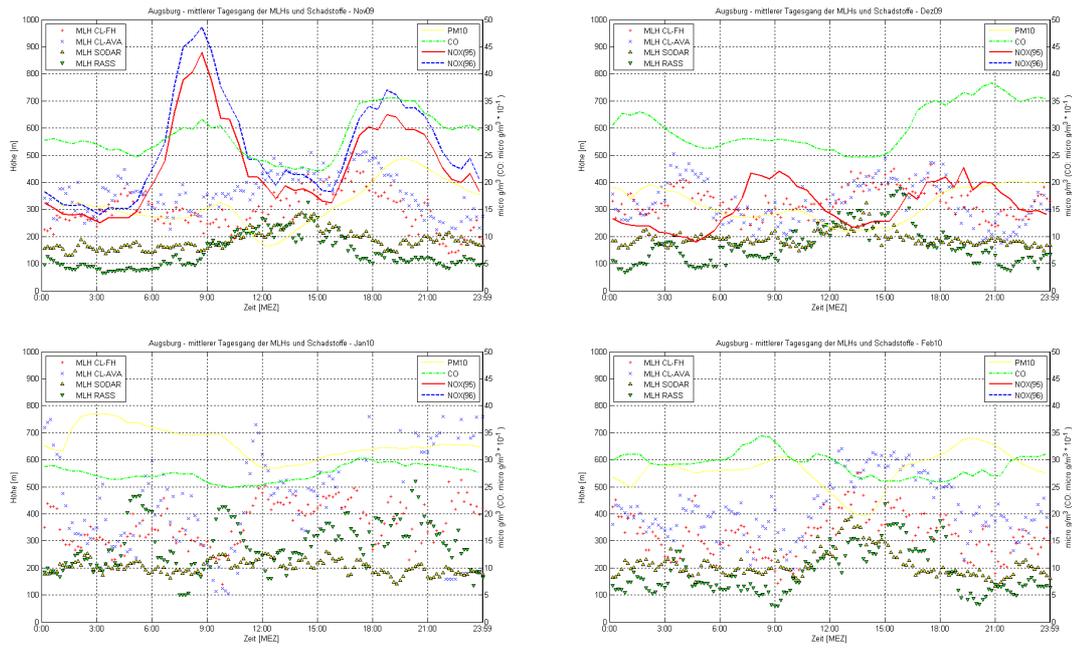


Abbildung 54: Mittlerer monatlicher Tagesgang von MLH und Luftschadstoffen (eigene Darstellung)

Nachdem nun ein Tagesgang der Schadstoffkonzentrationen aufgezeigt wurde, soll deren Abhängigkeit von der MLH noch näher betrachtet werden. Aufgrund der Tatsache, dass der ausgeprägte Tagesgang jedoch erkennbare Korrelationen zur MLH weitgehend überdeckt, werden Tagesmittel der Konzentrationen und MLH gebildet, die miteinander verglichen werden. Die Werte der MLH aus den Ceilometerdaten des AVA-Standortes bilden die Grundlage, da zum einen dieser Standort nahe dem der Schadstoffmessung ist, somit also eine gewisse Vergleichbarkeit besser besteht als mit dem Innenstadt-Ceilometer, zum anderen bieten diese Daten den Vorteil gegenüber SODAR und RASS, dass die vertikale Reichweite größer ist. Die verfügbaren Tagesmittel werden der Größe nach geordnet und die dazugehörigen Schadstoffmittelwerte angefügt (vgl. Abb. 55).

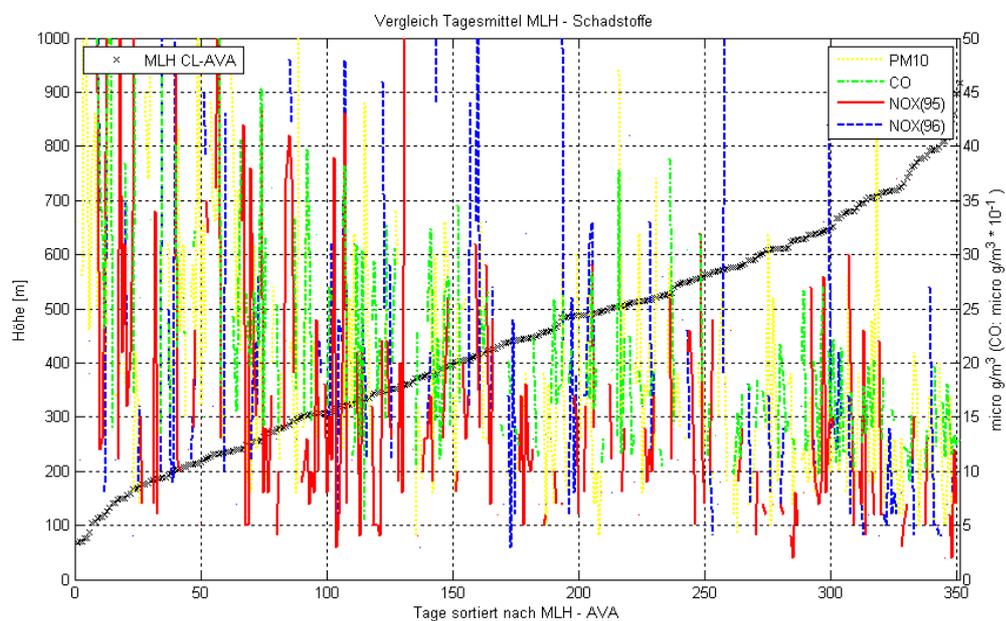


Abbildung 55: Tagesmittel der MLH des AVA-Ceilometers und von Luftschadstoffen (eigene Darstellung)

Es ist augenscheinlich eine Korrelation zu erkennen, bei niedriger MLH werden im Mittel höhere Konzentrationen erreicht als bei hoher MLH. Daraus ist zu folgern, dass eine niedrige MLH die vertikale Diffusion der hier aufgeführten Schadstoffe behindert und die Luftqualität davon beeinflusst wird. Daher ist es sinnvoll, in diesem Themengebiet die Höhe der Mischungsschicht zu beachten, die hier aufgeführten Methoden bilden geeignete Verfahren für deren Ermittlung. Letztlich bleibt zu klären, in welcher Weise der bestmögliche Nutzen aus diesen Verfahren gewonnen werden kann.

7. best practice

Gute Übereinstimmungen und Abweichungen der MLH's aus den beiden Ceilometern können weitgehend aus der Analyse längerer wolkenloser Messperioden (hier sechs Stunden) erklärt werden. Dabei sind vor allem die Profilmessungen aus SODAR und RASS von großer Bedeutung, da sie Auskunft über die meteorologischen Verhältnisse geben. In die Diskussionen gehen hierbei auch die verschiedenen Höhenniveaus bestimmter Strukturen wie die Höhe des SBL oder des RL ein, weshalb es sinnvoll ist, darauf den Blick zu richten. Eine Niveaubildung wurde hier anhand der vorangegangenen sechzig Minuten durchgeführt, beim Vergleich der Ceilometer-MLH's stellte sich heraus, dass es im Windfeld der Stadt Augsburg zur Bildung relativ fester Niveaus (ca. 300 m und 700 m bis 900 m) kommt, was ebenfalls bei der Auswertung der Ceilometerdaten als Kriterium für eine Niveaubildung dienen kann. Der Vorteil der erstgenannten Methode ist, dass sich über die Zeit bewegende Strukturen wie z. B. der Aufbau der CBL erkannt werden, während beim zweitgenannten Vorgehen eine klarere Zuweisung zu lokalen Merkmalen erfolgt.

Zweck der Niveaubildung ist, Sprünge in der MLH zu erklären und in der langzeitlichen Betrachtung zu vermeiden, für diese stellt es sich als sinnvoll heraus, gewisse Mittelungen vorzunehmen. Für den Vergleich der einzelnen Messmethoden wurden hier Halbstundenmittel, für die Diskussion des tages- und jahreszeitlichen Verlaufs wurden Monatsmittel gebildet, was auch im Vergleich mit Schadstoffkonzentrationen zu guten Ergebnissen führte.

Ferner bietet das SODAR Auskunft über die Windverhältnisse, diese Informationen helfen die Datenmenge zu strukturieren und bestimmte Zuweisungen vorzunehmen, wie dies bei der Analyse der Ceilometer-MLH's gemacht wurde (vgl. 6.2.1).

Letztlich kann festgehalten werden, dass für die Bestimmung der MLH diese drei Messmethoden ein gutes Ergebnis liefern.

8. Zusammenfassung der Ergebnisse

In der Vorliegenden Arbeit wurden verschiedene bodengebundene Fernmessverfahren zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe über Augsburg einander gegenübergestellt, um daraus eine Vorgehensweise zu entwickeln, die Mischungsschichthöhe weitgehend automatisiert zu ermitteln. Dazu wurden zunächst nach einem Blick auf den Untersuchungsraum Augsburg, einer Großstadt im Süden von Deutschland (Bayern) mit einer Fläche von etwa 14.500 ha und einer Einwohnerzahl von 260.000 EW, die Besonderheiten der atmosphärischen Grenzschicht über einer Stadt herausgestellt (städtisches Windfeld, Wärmeinseleffekt), schließlich wurden die Standorte der Messsysteme im Zentrum und im Norden der Stadt Augsburg dargestellt.

Ein wesentlicher Punkt der Bearbeitung der Daten der verschiedenen Messsysteme, bei denen es sich um akustische Fernmessverfahren (SODAR, RASS) und optische Fernmessverfahren (Ceilometer) handelt, ist der Umgang mit der verschiedenen verwendeten Software. Die Rohdaten des SODAR/RASS werden mit einer Software des Geräteherstellers METEK zunächst verwertet, wobei verschiedene Plausibilitätsabfragen und Mittelungen vorgenommen wurden, wodurch fehlerhafte Daten ausgeschlossen wurden. Mit der Software des Geräteherstellers der Ceilometer VAISALA wurden ebenfalls zur Datenverarbeitung verschiedene Kriterien der Mittelung und Grenzwerte festgelegt. Die aus diesen ersten Auswertungen entstandenen Daten wurden schließlich für die weitere Bearbeitung in die wissenschaftliche Rechensoftware MATLAB importiert, die die eigentliche Grundlage der Datenanalyse bildet.

Da für die Datenverarbeitung im Allgemeinen verschiedene Software verwendet wird, wurde hier ein besonderes Augenmerk auf die Bearbeitung in MATLAB gerichtet, um eine Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Die Algorithmen, die in früheren ähnlichen Untersuchungen des IMK-IFU erstellt wurden, wurden hier einer erneuten Prüfung unterzogen und auf die lokalen Gegebenheiten angepasst. Im Detail wurden etwa die Kriterien zur Ermittlung der MLH aus SODAR und RASS geändert mit dem Ergebnis, dass augenscheinlich aus den Rückstreuprofilen herausgelesene vorhandene Strukturen gut durch die Algorithmen erkannt werden. Die Kriterien der Ceilometer-Datenauswertung wurden kaum verändert, um eine Vergleichbarkeit zu vorhergehenden Untersuchungen zu gewährleisten. Es wurde mit einer zeitlichen Mittelung von 2400 Sekunden und der Ermittlung von maximal vier Gradientenminima gearbeitet. Schließlich wird die MLH aus den SODAR-Daten anhand der akustischen

Rückstreuintensität und der Varianz des Vertikalwindes gebildet, aus den RASS-Daten anhand eines Temperaturgradienten im Höhenprofil (hier 0,7 K) sowie aus den Ceilometerdaten anhand der optischen Rückstreuintensität.

In der Ermittlung der MLH aus der Datenverarbeitung mit MATLAB wurde die MLH zunächst aus den jeweils untersten erkannten Datenpunkten erstellt, in einer weiteren Analyse wurden unter Einbeziehung darüber liegender Strukturen bis zu zwei Niveaustufen gebildet.

Die SODAR- und RASS-Daten bieten zudem Informationen über die Wind- und Temperaturverhältnisse, erstere wurden als Grundlage für den Vergleich der Messsysteme aus dem 60-Meter-Niveau entnommen und für die Ermittlung von Windklassen verwendet. Dadurch konnten sechs Klassen abhängig von Windrichtung und -geschwindigkeit gebildet werden.

Auf dieser Basis wurden die MLH's der Ceilometer zudem noch unterschieden durch Tag- und Nacht-Perioden einander gegenüber gestellt, dabei wurden schließlich Situationen ohne Wolkeneinfluss unter 1000 m und über einen Zeitraum von mindestens sechs Stunden analysiert, da in diesen Fällen alle Messsysteme aufgrund geringer äußerlicher Beeinträchtigungen gute Ergebnisse liefern und somit eine Vergleichbarkeit gegeben ist.

Hierbei kamen markante Strukturen wie die Höhenniveaus von SBL und RL zum Vorschein, die in der beispielhaften Beschreibung einzelner Messperioden anhand des Vergleichs der verfügbaren Daten genauer analysiert wurden.

Der Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden zur Ermittlung der MLH aus bodengebundener Fernerkundung in Augsburg hat gezeigt, dass an verschiedenen Standorten im Windfeld einer Stadt platzierte Ceilometer zum Teil gute Übereinstimmungen haben, zum Teil aber auch Strukturen der Luftschichtung unterschiedlich interpretieren.

Die Erweiterung mit SODAR und RASS bietet neben dem Informationsgewinn durch die Daten aus der Profilmessung zum einen einen Vergleichspunkt zu den Ceilometermessungen, der unabhängig von der optischen Rückstreuung ist. Dadurch können Strukturen verifiziert werden und ein Zusatzgewinn an Informationen über Schichtungen, die mit optischen Verfahren nicht mehr erkennbar sind, erlangt werden.

Nachdem somit einzelne Situationen bearbeitet worden sind, in denen sich die verschiedenen Messmethoden gut ergänzen, wodurch ein genaues Bild der Luftschichtung wiedergegeben werden kann, wurde der Blick auf dem mittleren Tagesgang einzelner Monate gelenkt. Hierbei zeigten sich ebenfalls gute Übereinstimmungen der Messsysteme, zudem konnte ein Jahresgang festgestellt werden.

In einem weiteren Schritt wurden die beiden Winterperioden 08/09 und 09/10 miteinander verglichen, wobei gezeigt werden konnte, dass unterschiedliches von meteorologischen Einflüssen bedingtes Verhalten der MLH auch mit einer Mittelung über einen Monat gut aus den Daten abzulesen ist und erklärt werden kann.

Dies zeigt auch ein Vergleich mit Schadstoffdaten, die ebenfalls vom IMK-IFU gemessen werden, bei einer monatlichen Mittelung ist ebenfalls ein Tagesgang vorhanden, der erkennbar von der MLH beeinflusst wird, generell wurde anhand von Tagesmitteln aufgezeigt, dass augenscheinlich eine Korrelation zwischen MLH und Schadstoffkonzentrationen besteht.

Schließlich wurde in einem Ausblick mit Bezug auf die erlangten Ergebnisse eine Empfehlung zu einer best practice gegeben, da festgestellt wurde, dass sowohl eine gute Vergleichbarkeit der verschiedenen optischen und akustischen Fernmessverfahren besteht, wie sich beide Verfahren auch in bestimmten Fällen ergänzen.

ANHANG A:

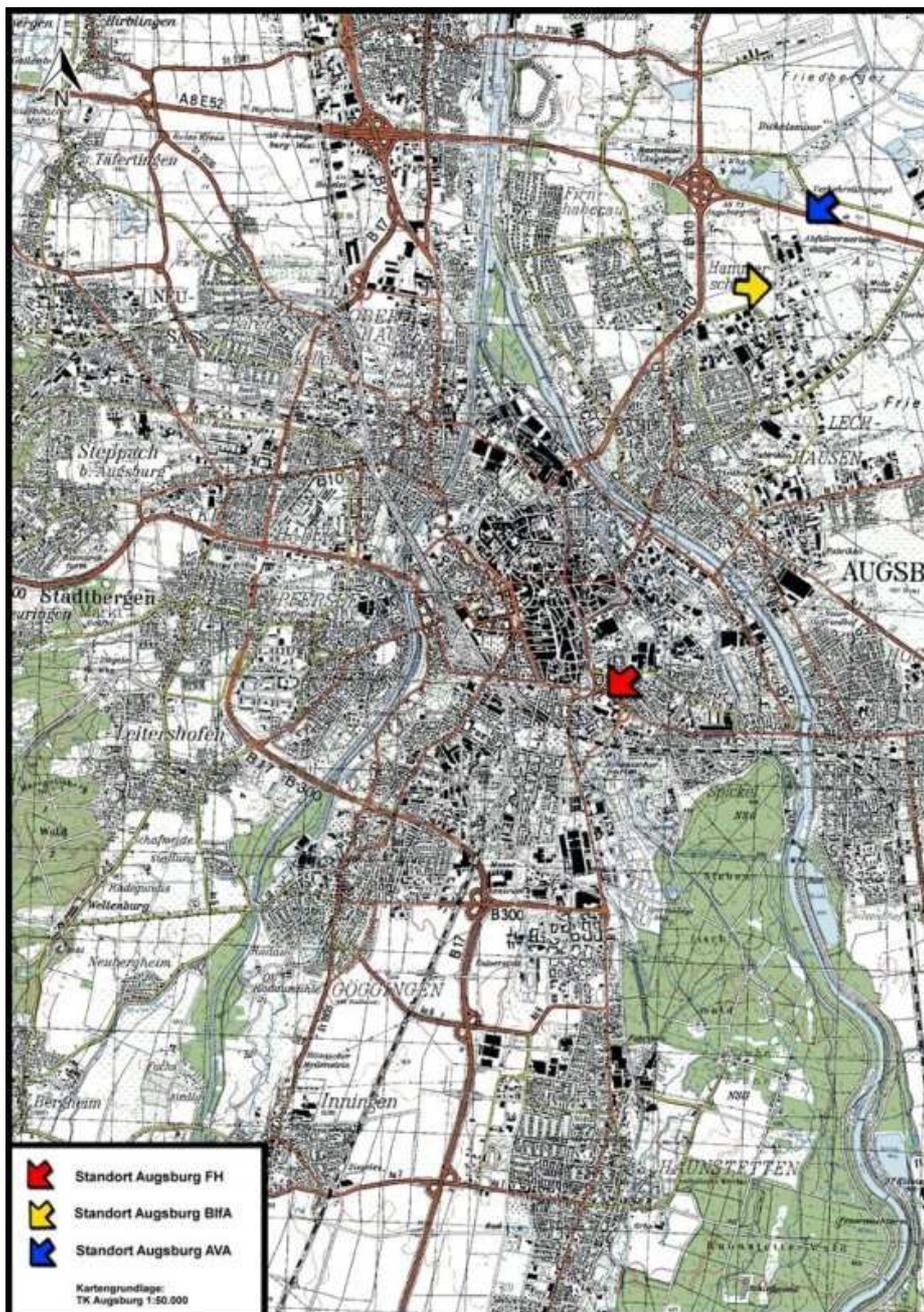


Abbildung 56: Messtandorte im Stadtgebiet Augsburg. (eigene Darstellung)

Tabelle 4: zeitliche Datenverfügbarkeit der Messsysteme (vier Teiltabellen)

¼	Dezember 2008	Januar 2009	Februar 2009	März 2009
Ceilometer Fachhochschule:	Kontinuierliche Messung	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung
Ceilometer AVA:	Keine Messung ab 05.12.2008 wegen defektem PC;	Bis 24.01.: keine Messung wegen defektem PC; 24.01.: Wiederaufnahme der Messung	kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung
SODAR/RASS AVA:	Kontinuierliche Messung;	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung

2/4	April 2009	Mai 2009	Juni 2009	Juli 2009
Ceilometer Fachhochschule:	31.04. bis 12.05.: keine Messung wegen Speicherproblemen	12.05.: Wiederaufnahme der Messung;	kontinuierliche Messung	03.07.: Stopp der Messung; Umsetzung des Messcontainers um wenige Meter aufgrund von Baumaßnahmen 07.07.: Start der Messung;
Ceilometer AVA:	18.04.: Stopp der Messung wegen Stromausfall; 27.04.: Wiederaufnahme der Messung;	06.05. bis 08.05.: keine Messung wegen Stromausfall;	29.06. bis 03.07.: Unterbrechungen in der Messung aufgrund von Arbeiten an der AVA;	ab 03.07.: Wiederaufnahme der Messungen; 14.07.: kurze Unterbrechung der Aufzeichnung für Arbeiten am Messsystem; 24.07. bis 27.07.: Unterbrechung der Messung wegen Stromausfall;
SODAR/RASS AVA:	18.04.: Stopp der Messung wegen Stromausfall; 27.04.: Wiederaufnahme der Messung;	06.05. bis 19.05.: keine Messung wegen Stromausfall; 27.05.: Kurze Unterbrechung der Messung wegen Mäharbeiten unter den Antennen;	29.06. bis 08.07.: Unterbrechungen in der Messung aufgrund von Arbeiten an der AVA;	14.07.: kurze Unterbrechung der Aufzeichnung für Arbeiten am Messsystem; 24.07. bis 29.07.: Unterbrechung der Messung wegen

				Stromausfall
--	--	--	--	--------------

¾	August 2009	September 2009	Oktober 2009	November 2009
Ceilometer Fachhochschule:	kontinuierliche Messung	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	30.11.: Unterbrechung der Messung wegen Installation weiterer Messgeräte im Messcontainer
Ceilometer AVA	24.08. bis 31.08.: Unterbrechung der Messung wegen Stromausfall an der AVA;	24.09. bis 28.09.: Unterbrechung der Messung wegen Systemausfall;	16.10. bis 20.10.: Unterbrechung der Messung wegen Systemausfall;	09.11.: kurze Unterbrechung der Messung wegen Softwarefehler;
SODAR/RASS AVA:	kontinuierliche Messung	04.09.: kurze Unterbrechung der Messung wegen Mäharbeiten unter den Antennen;	kontinuierliche Messung	05.11.: kurze Unterbrechung wegen Wartung der Messsysteme;

4/4	Dezember 2009	Januar 2010	Februar 2010	März 2010
Ceilometer Fachhochschule:	kontinuierliche Messung	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung
Ceilometer AVA:	25.12. bis 31.12.: Unterbrechung der Messung wegen Systemausfall;	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	05.03.: Kurze Unterbrechung der Messung wegen Systemausfall;
SODAR/RASS AVA:	kontinuierliche Messung	Kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung	kontinuierliche Messung

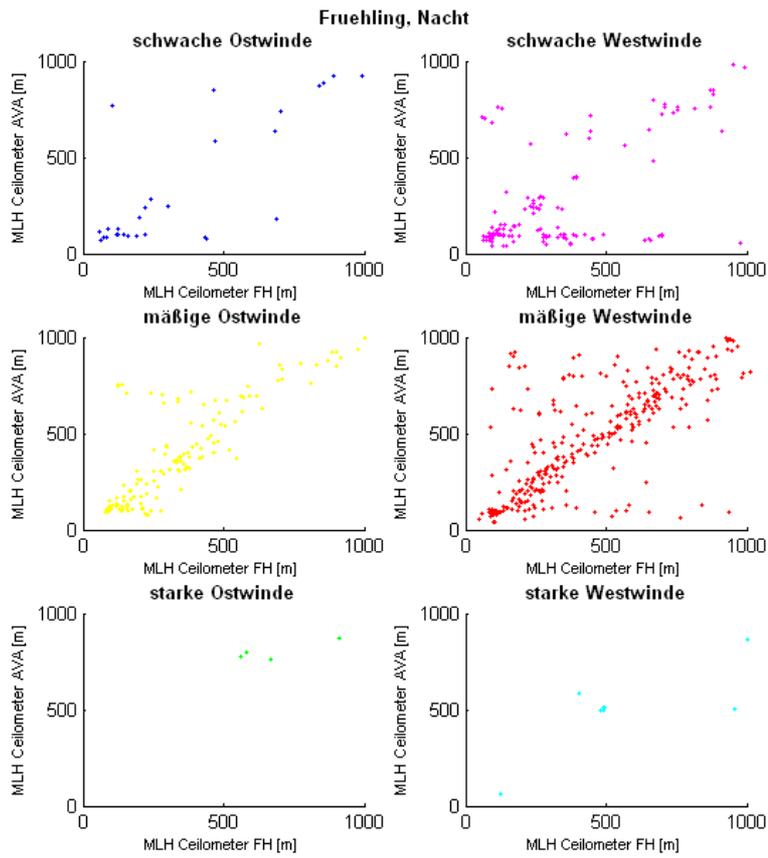


Abbildung 57: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Fruehling Nacht (eigene Darstellung)

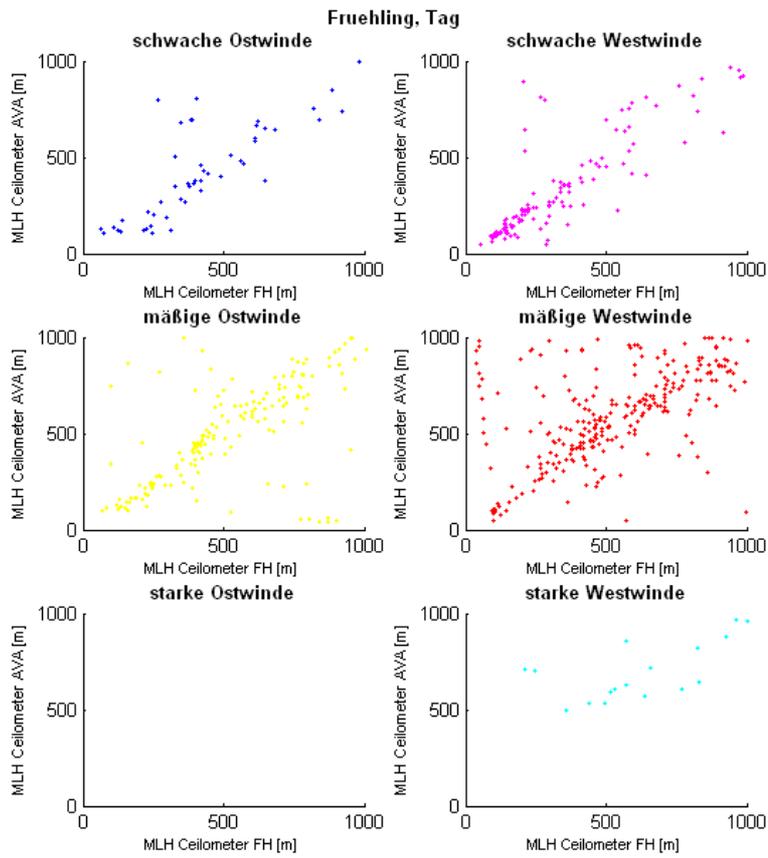


Abbildung 58: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Frühling Tag (eigene Darstellung)

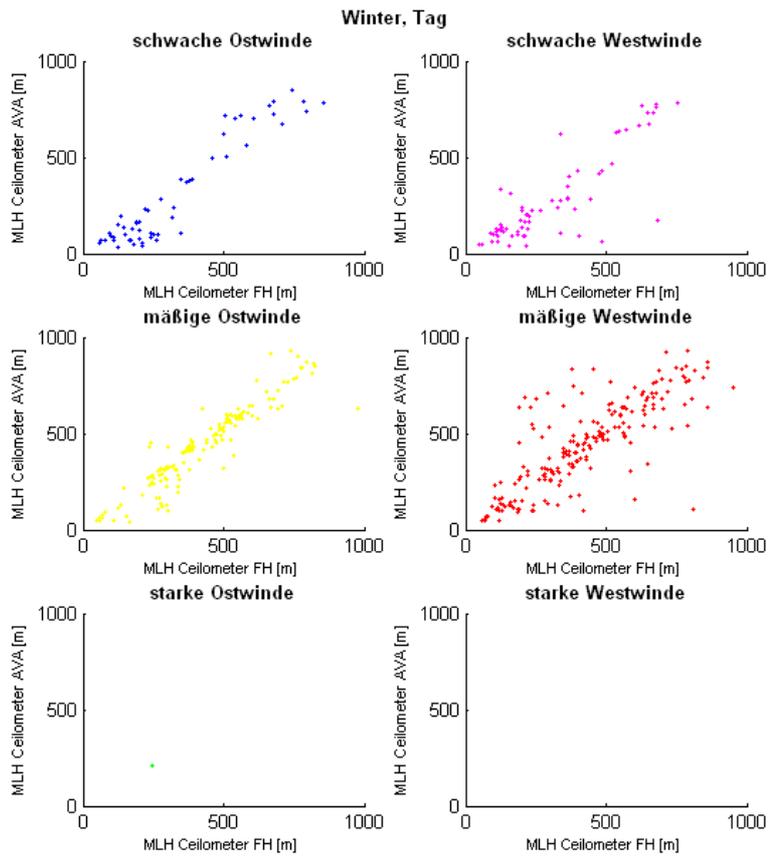


Abbildung 59: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Winter Tag (eigene Darstellung)

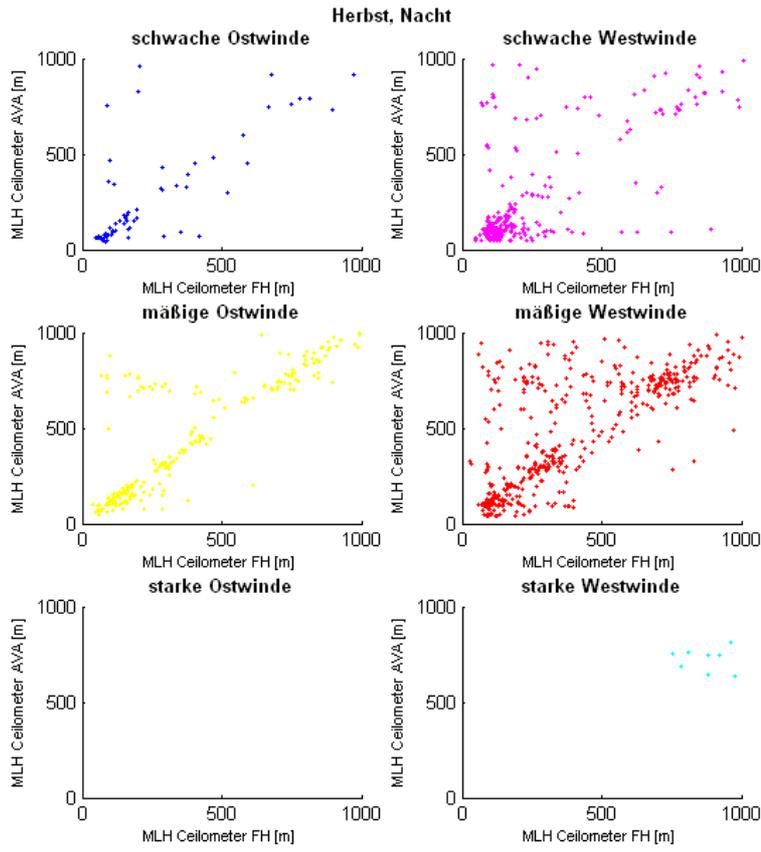


Abbildung 60: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Herbst Nacht (eigene Darstellung)

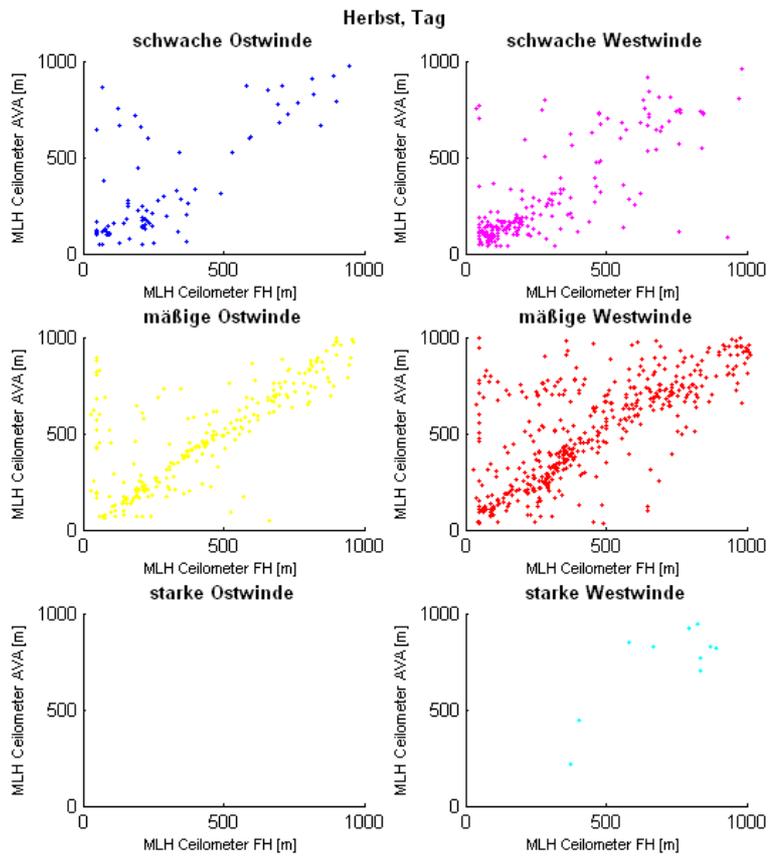


Abbildung 61: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Herbst Tag (eigene Darstellung)

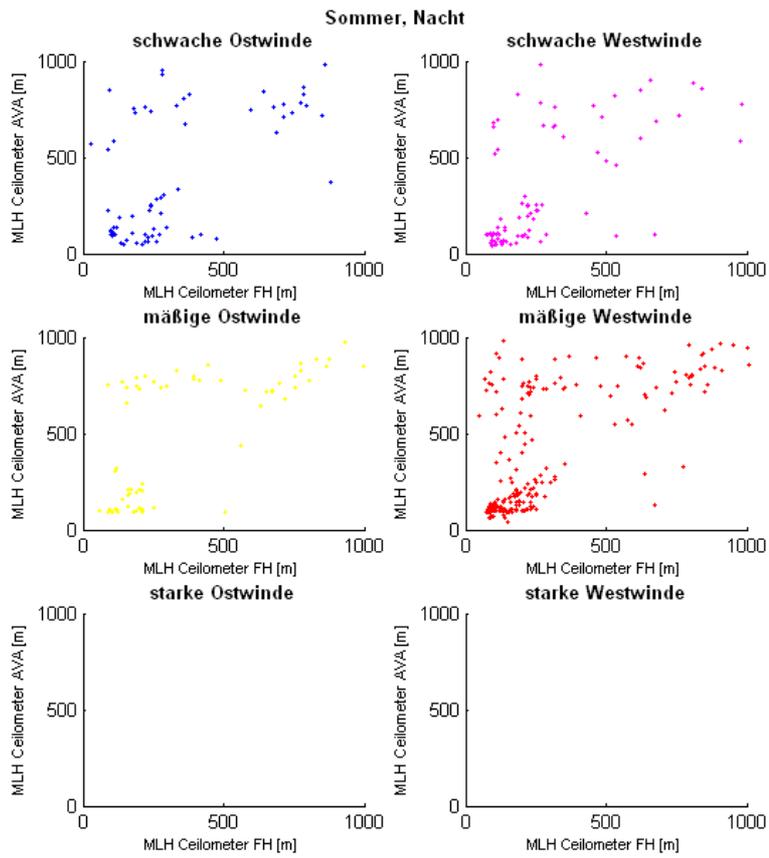


Abbildung 62: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Sommer Nacht (eigene Darstellung)

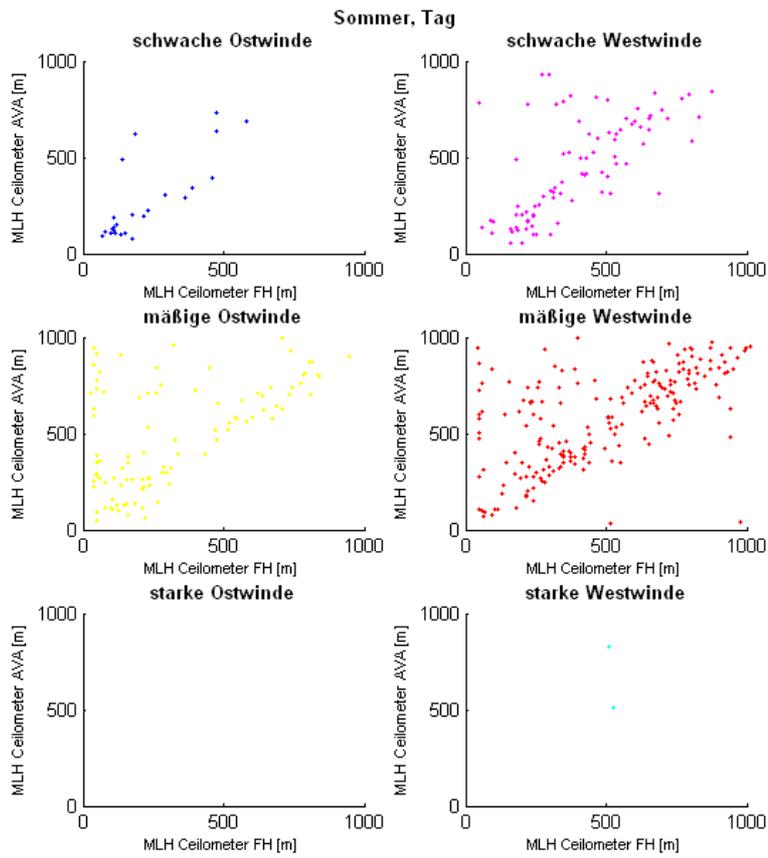


Abbildung 63: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Sommer Tag (eigene Darstellung)

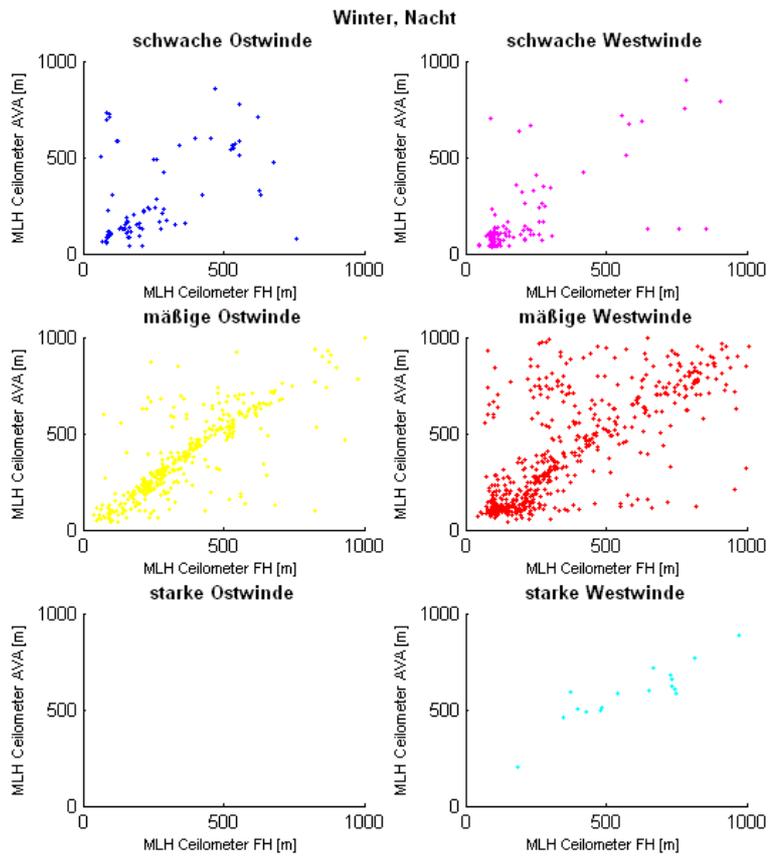


Abbildung 64: Vergleich Ceilometer bei Windklassen Winter Nacht (eigene Darstellung)

**Winter, Nacht,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

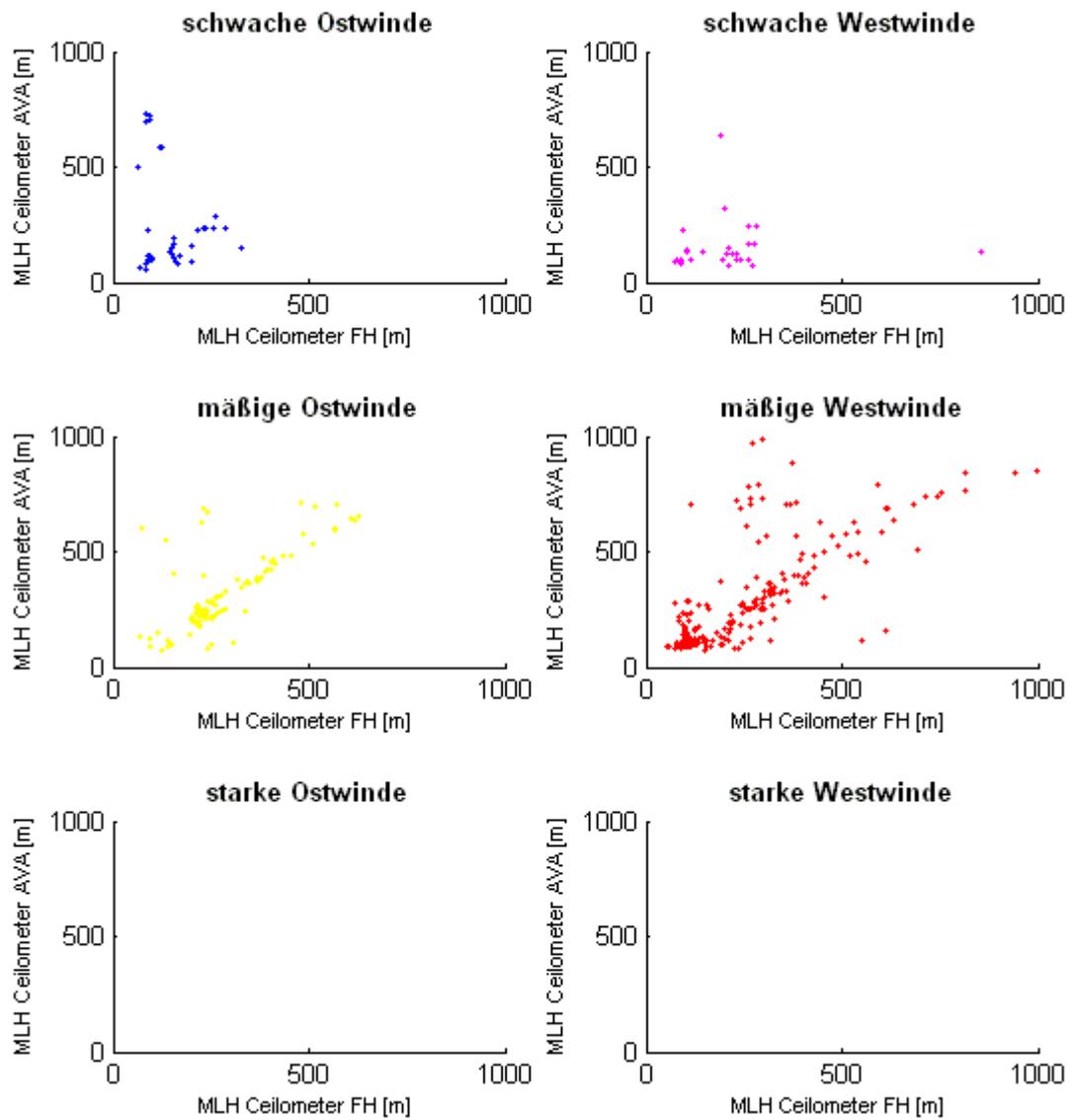


Abbildung 65: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Winter Nacht (eigene Darstellung)

Winter, Tag
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h

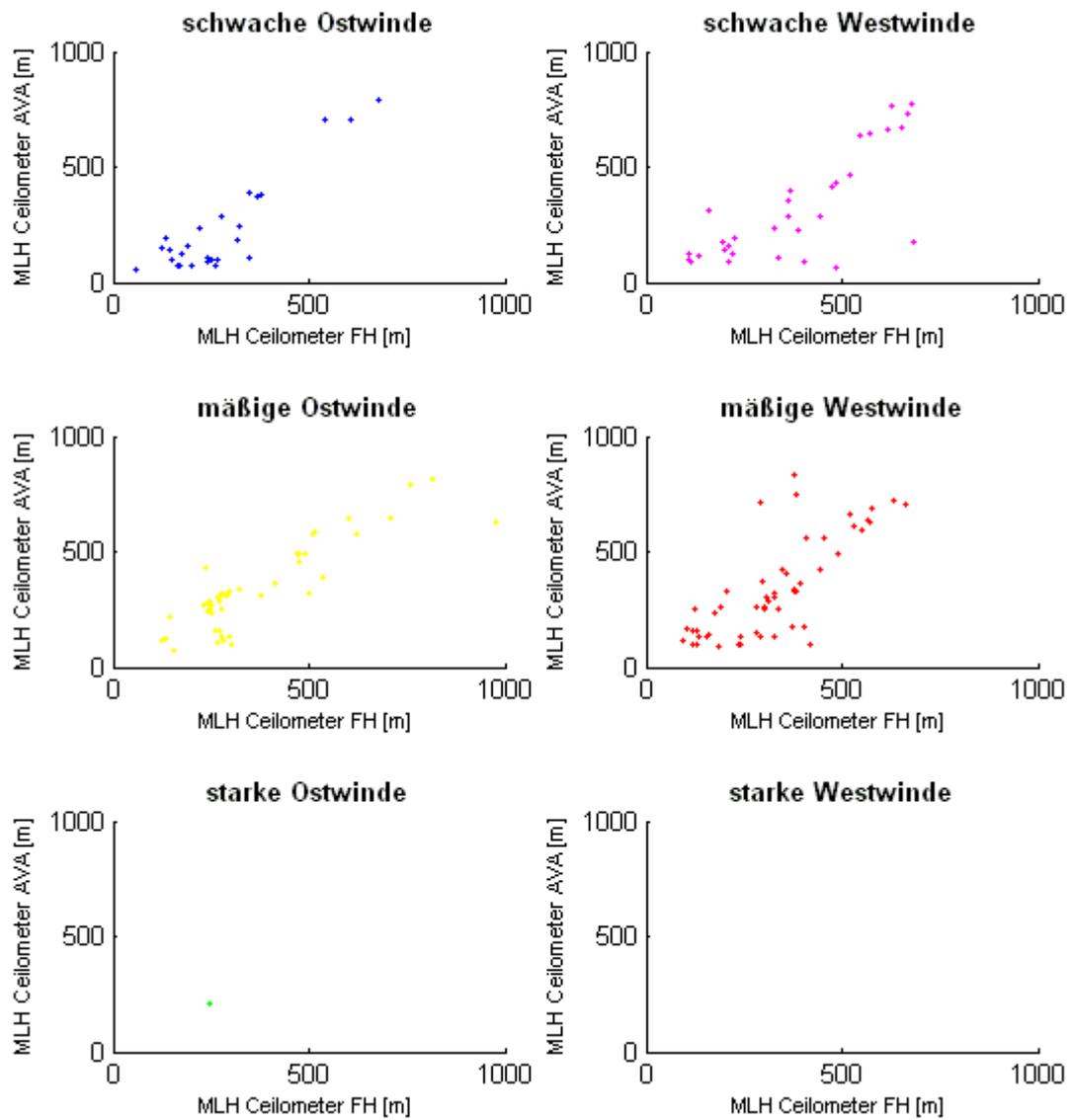


Abbildung 66: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Winter Tag (eigene Darstellung)

**Fruehling, Nacht
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

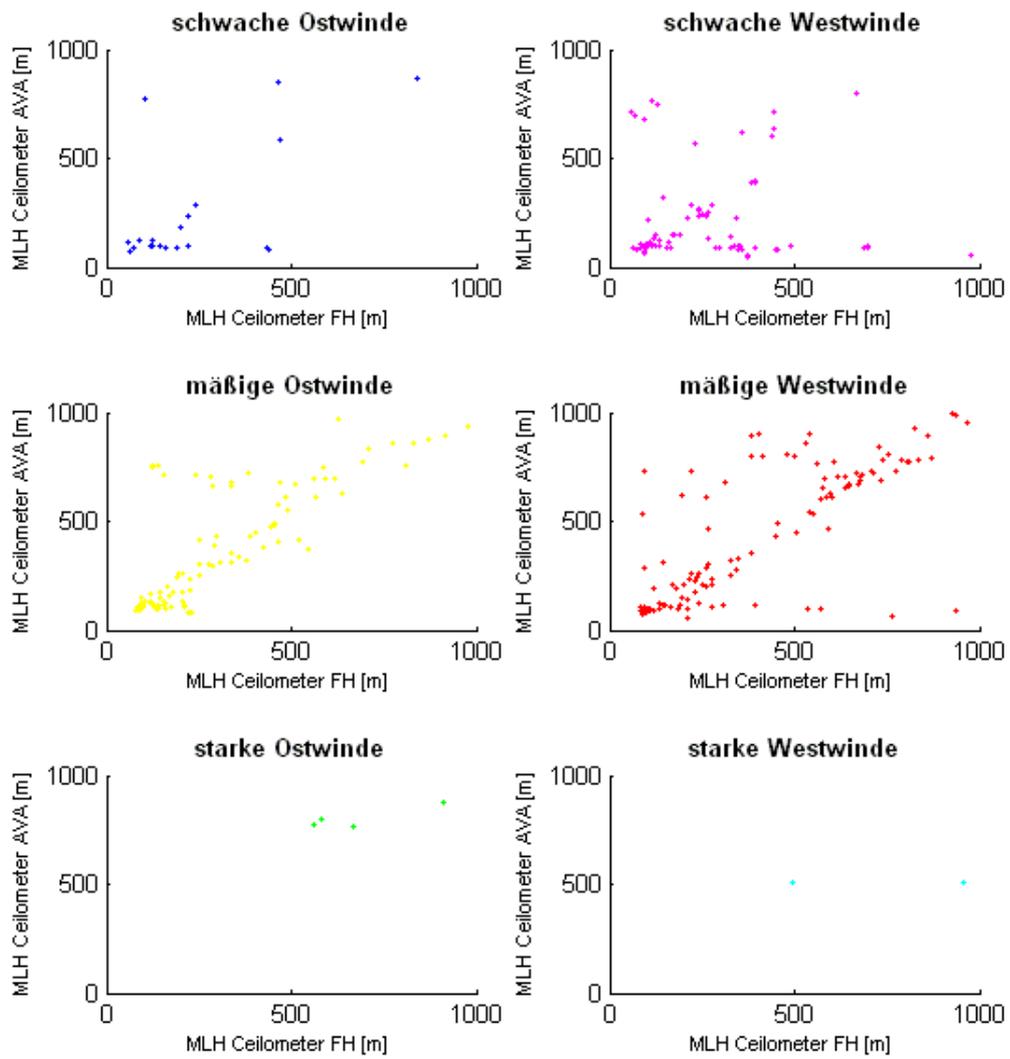


Abbildung 67: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Frühling Nacht (eigene Darstellung)

**Fruehling, Tag,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

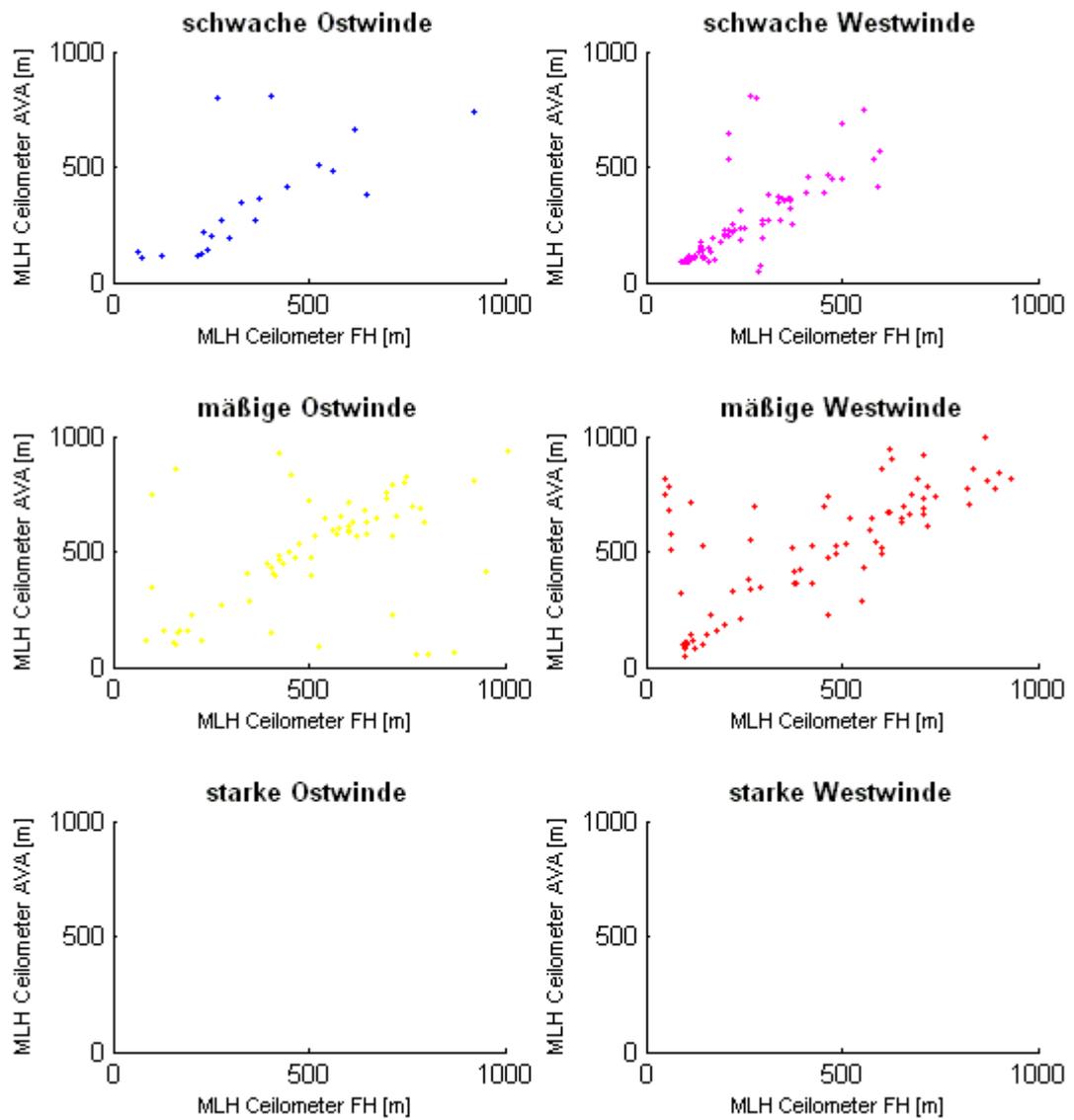


Abbildung 68: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Frühling Tag (eigene Darstellung)

**Sommer, Nacht,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

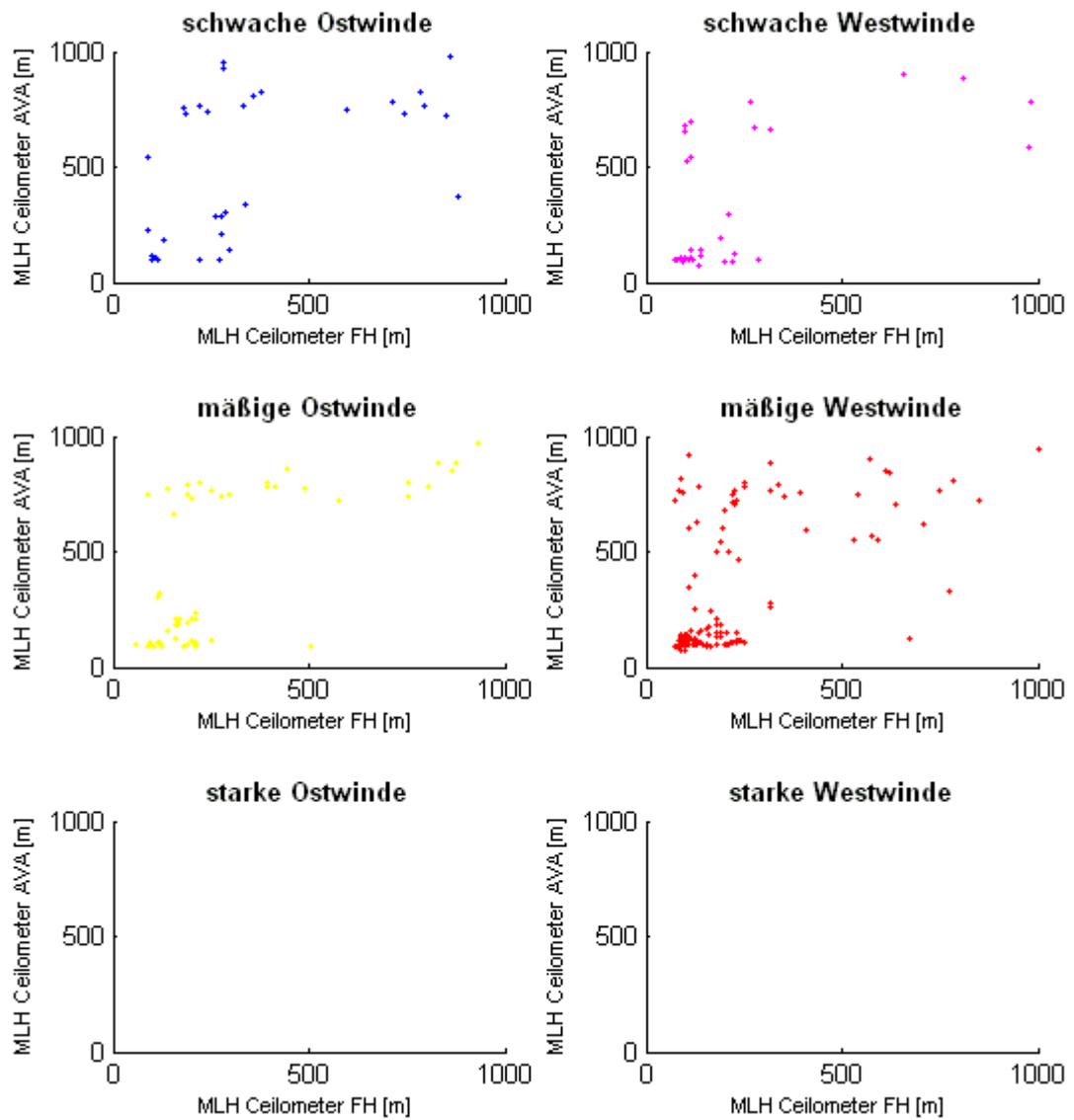


Abbildung 69: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Sommer Nacht (eigene Darstellung)

**Sommer, Tag,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

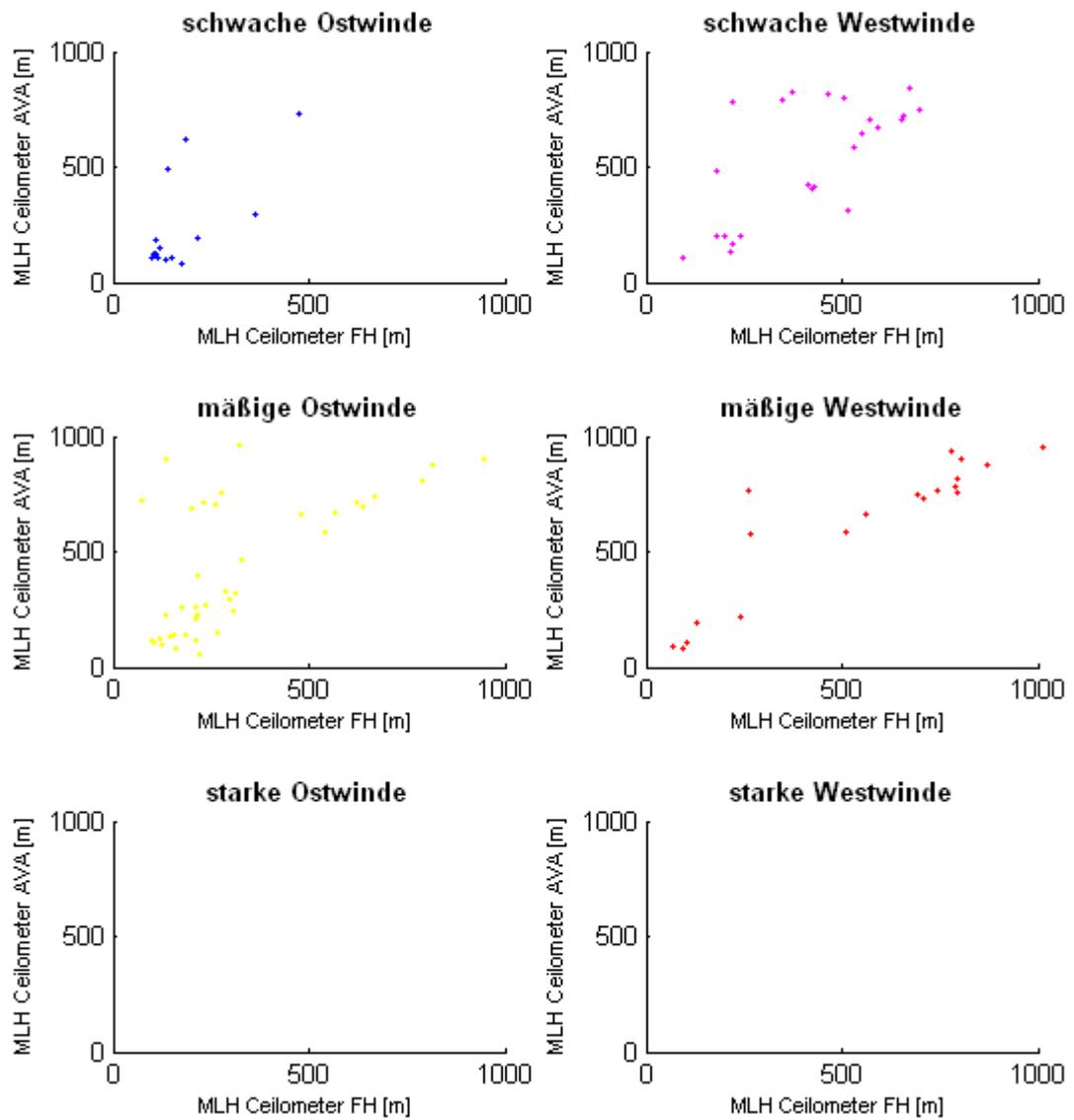


Abbildung 70: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Sommer Tag (eigene Darstellung)

**Herbst, Nacht,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

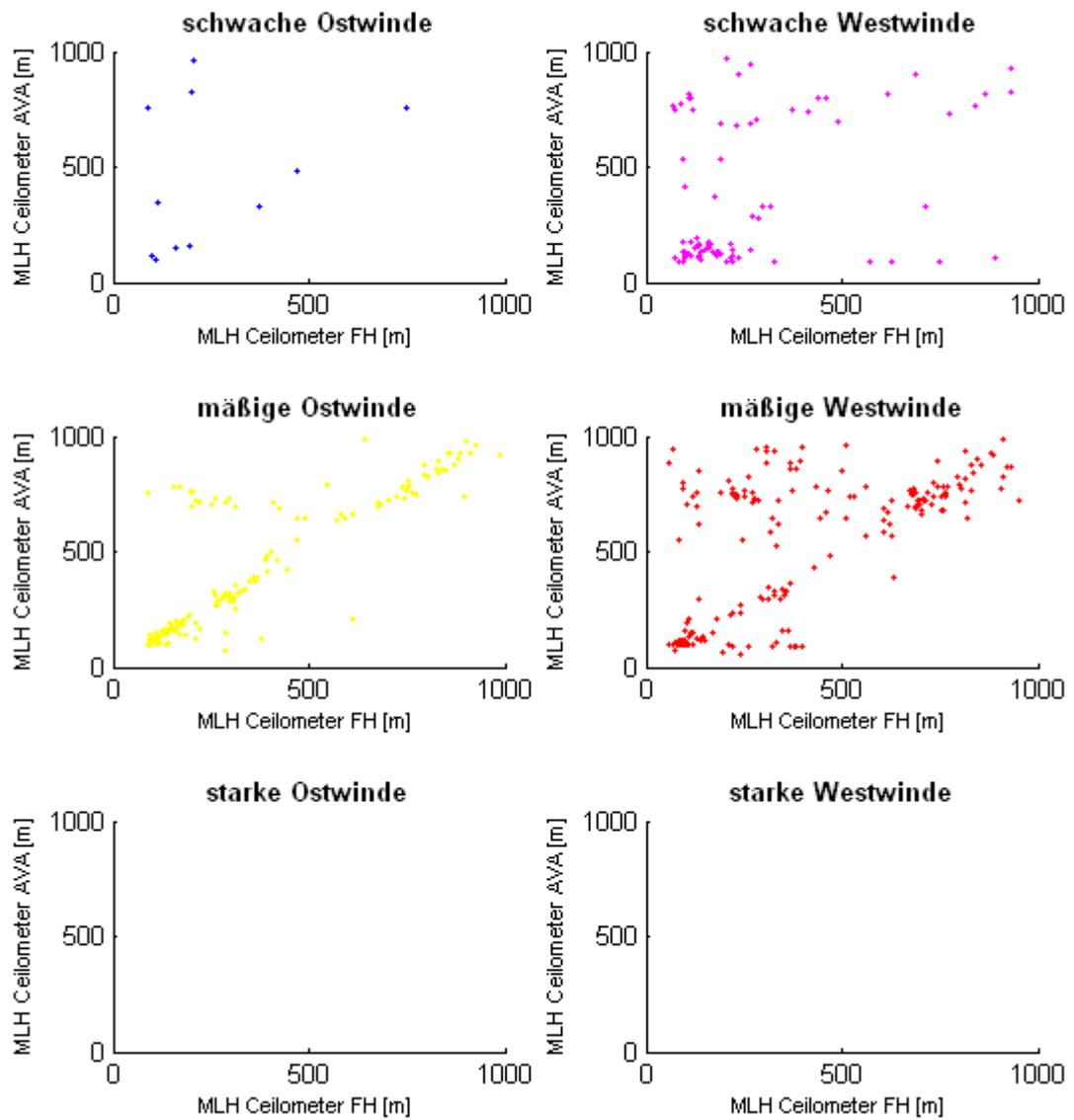


Abbildung 71: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Herbst Nacht (eigene Darstellung)

**Herbst, Tag,
ohne tiefe Wolken, Messperiode mind. 6h**

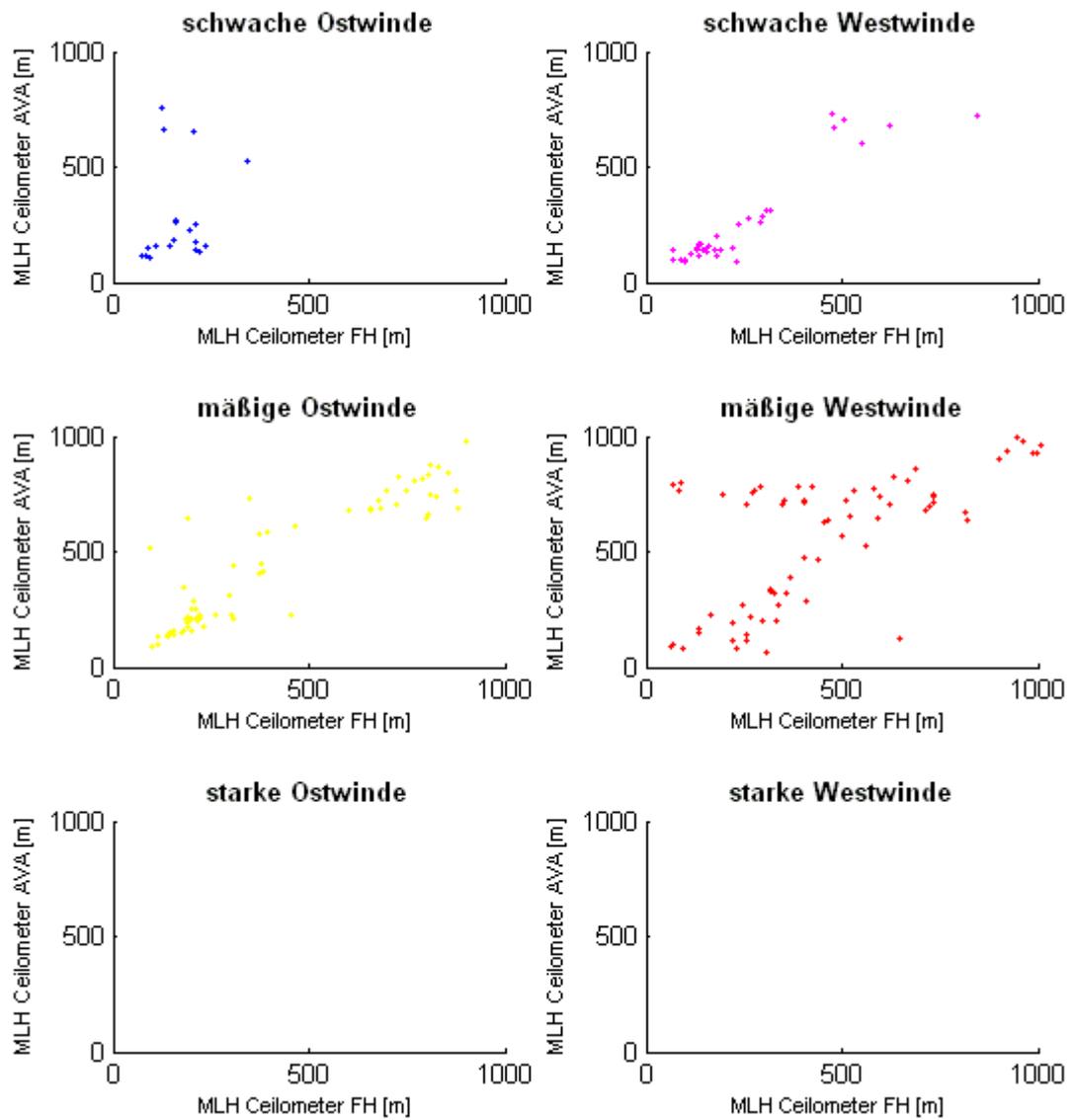
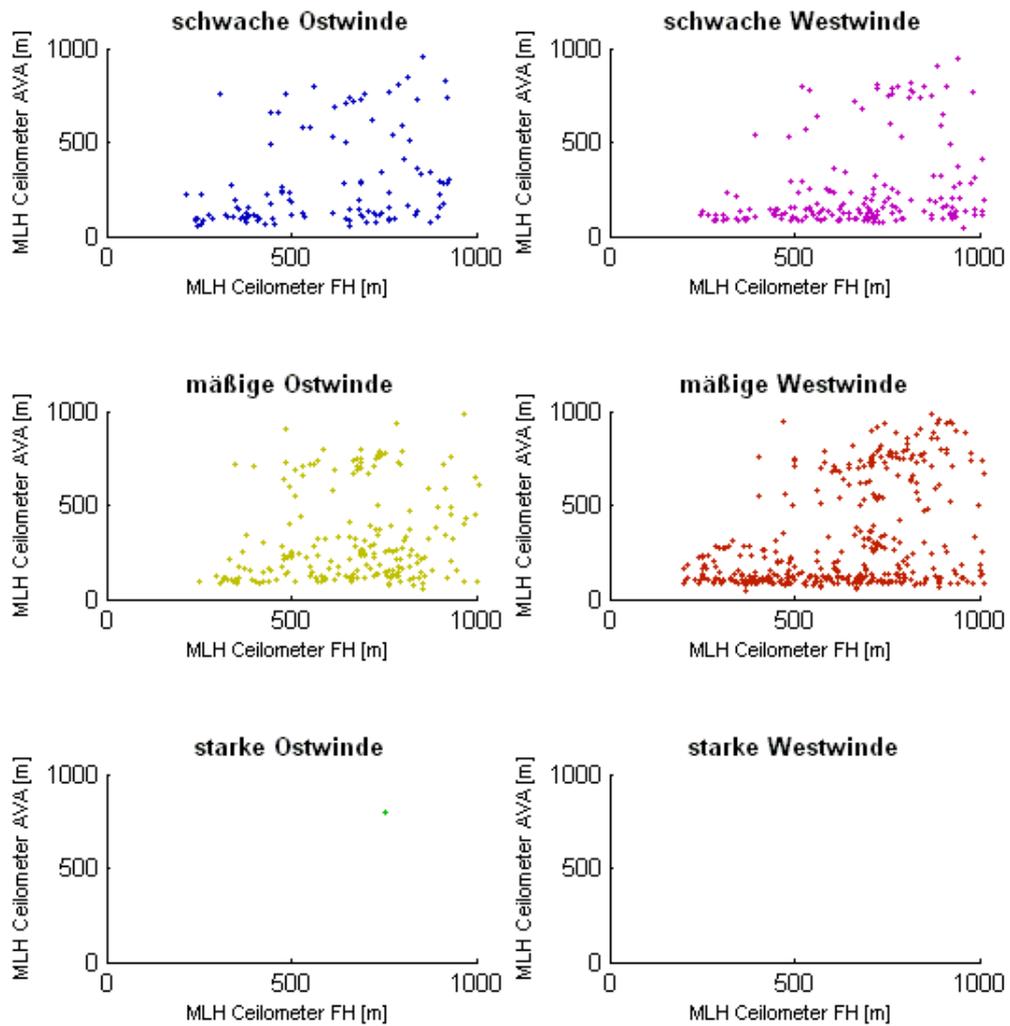


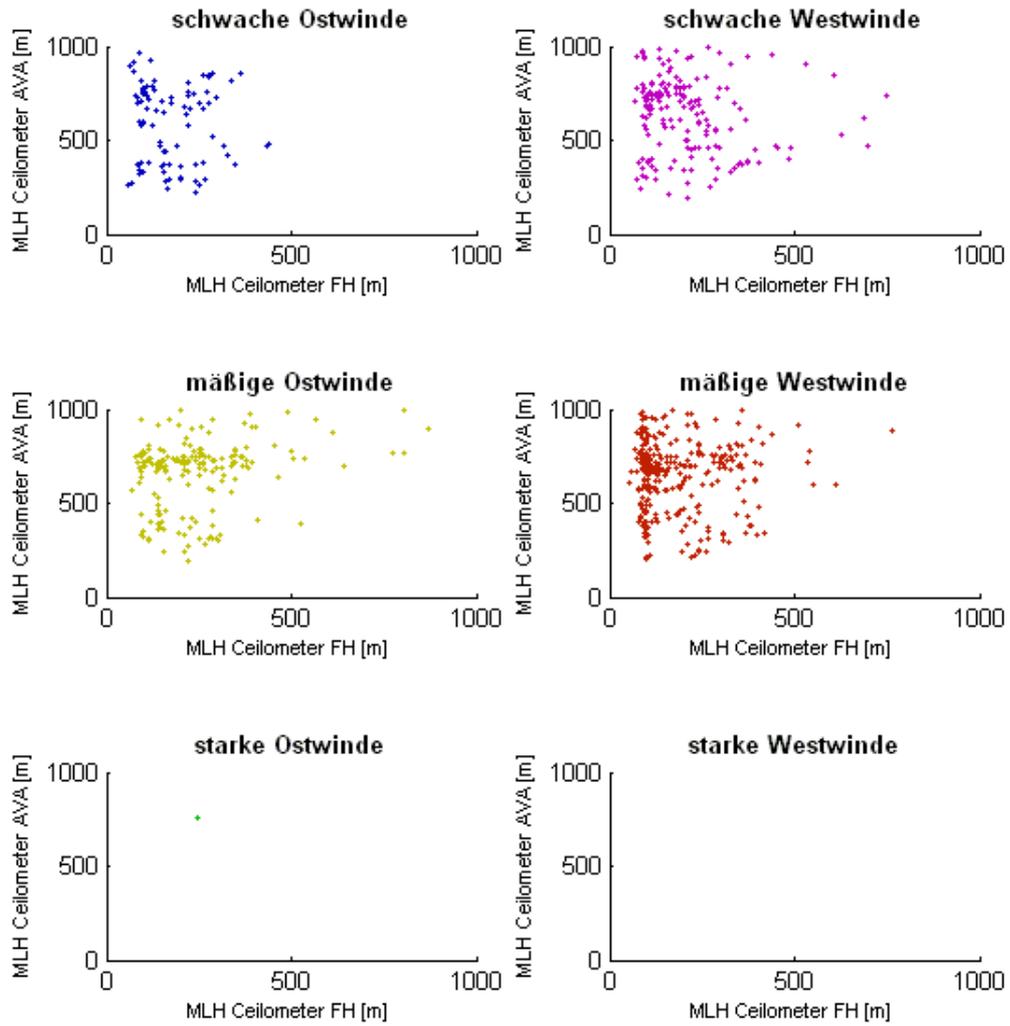
Abbildung 72: Vergleich der Ceilometer bei Windklassen ohne Wolken Herbst Tag (eigene Darstellung)

**Vergleich der Ceilometer-MLH-Niveaus,
ohne tiefe Wolken, Messperiode von mind. 6h
oberes FH-Niveau, unteres AVA-Niveau**



**Abbildung 73: Vergleich der Niveaus der Ceilometer-MLHs bei Windklassen ohne Wolkeneinfluss
- oberes FH-Niveau, unteres AVA-Niveau**

**Vergleich der Ceilometer-MLH-Niveaus,
ohne tiefe Wolken, Messperiode von mind. 6h
unteres FH-Niveau, oberes AVA-Niveau**



**Abbildung 74: Vergleich der Niveaus der Ceilometer-MLHs bei Windklassen ohne Wolkeneinfluss
- unteres FH-Niveau, oberes AVA-Niveau (eigene Darstellung)**

Literaturverzeichnis:

- AHRENS, D. (1981): Untersuchungen über die Wärmeinsel und die Mischungsschicht einer Großstadt. In: Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, Ser. B, 29-36
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2009): Einfluss von Emissionen aus der Gebäudeheizung auf Feinstaubimmissionen im Raum Augsburg, Augsburg, 198 S.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (Hrsg.)(1997): Teilraumgutachten „Stärkung und Entwicklung des Raumes Augsburg“. In: Teilraumgutachten der Landesplanung in Bayern. 513 S.
- BENDIX, J. (2004): Geländeklimatologie. In: Studienbücher der Geographie, Berlin, 282 S.
- BEYRICH, F. (1995): Mixing height estimation in the convective boundary layer using SODAR data. In: Boundary-Layer meteorology (74), 1-18
- BEYRICH, F., WEILL, A. (1992): some aspects of determining the stable boundary layer depth from SODAR data. In: Boundary-Layer meteorology (63), 97-116
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.)(2002): Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 239 S.
- EMEIS, S., JAHN, C., MÜNKEL, C., MÜNSTERER, C., SCHÄFER, K. (2007): Multiple atmospheric layering and mixing layer height in the Inn valley observed by remote sensing. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 16 (4), 425-425
- EMEIS, S., RAUCH, A., MÜNKEL, C., VOGT, S., MÜLLER, W., SCHÄFER, K. (2004): atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS and Ceilometer measurements. In: Atmospheric environment (38), 273-286
- EMEIS, S., SCHÄFER, K. (2006): remote sensing methods to investigate boundary-layer structures to air pollution in cities. In: Boundary-Layer-Meteorology, 377-386
- EMEIS, S., SCHÄFER, K., MÜNKEL, C. (2009): observation of the structure of the boundary layer with different ceilometers and validation by RASS data. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol 18 (2), 149-155
- EMEIS, S., TÜRK, M. (2004): frequency distributions of the mixing height over an urban area from SODAR data. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol 13 (5), 361-368

- EMEIS, S., SCHÄFER, K., MÜNDEL, C. (2008): Surface based remote sensing of the mixing height – a review. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17 (5), 621-631
- ENGELBART, D., STEINHAGEN, H., GÖRSDORF, U., NEISSER, J., KIRTZEL, H.-J., PETERS, G. (1998): first results of measurements with a newly-designed Phased-Array Sodar with RASS. In: Meteorology and Atmospheric Physics (71), 61-68
- ETLING, D. (2008): Theoretische Meteorologie, 3., erw. und aktualisierte Auflage, Berlin, 376 S.
- FOKEN, T. (2003): Angewandte Meteorologie – mikrometeorologische Methoden, Berlin, 289 S.
- HELBIG, A (1987): Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre; in: Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik, Nr. 137; Berlin, 80 S.
- HENNEMUTH, B., KIRTZEL, H.-J. (2008): Sodar detection of mixing height in flat mountainous terrain. In: IOP Conf. Series: Earth and environmental science 1, 1-8
- HUPFER, P., KUTTLER, W. (2006): Witterung und Klima – eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie, 12., überarb. Auflage, Wiesbaden, 554 S.
- JACOBET, J. (1986): Stadtklimatologie von Augsburg unter besonderer Berücksichtigung der lufthygienischen Situation sowie des Lärms – Forschungsprojekt im Auftrag und mit Förderung der Stadt Augsburg; in: Augsburger geographische Hefte, Bd. 6. Augsburg, 162 S.
- JACOBET, J. (1990): Neuere Daten und Fakten zum Stadtklima von Augsburg. In: FISCHER, K. (1990): Beiträge zur physischen Geographie des Raumes Augsburg. In: Augsburger geographische Hefte, Bd. 8, Augsburg, S. 1-28
- KRAUS, H. (2008): Grundlagen der Grenzschichtmeteorologie, Würzburg, 212 S.
- KUTTLER, W. (2008): Zum Klima im urbanen Raum. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2009): Klimastatusbericht 2008, Offenbach/Main, S. 6-12.
- LANGE, H.-J. (2002): Die Physik des Wetters und des Klimas – ein Grundkurs zur Theorie des Systems Atmosphäre, Berlin, 625 S.
- MANIER, G. (1971): Untersuchungen über meteorologische Einflüsse auf die Ausbreitung von Schadgasen. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 124, Bd. 16, Offenbach/Main, 63 S.
- MÜNDEL, C., ERESMA, N., RÄSÖNEN, J., KARPINNEN, A. (2007): Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. In: Boundary-Layer Meteorology (124). 117-128

- PFEFFER, K.-H. (2006): Arbeitsmethoden der Physischen Geographie. In: Geowissenschaften kompakt. Darmstadt, 135 S.
- QUARTERONI, A., SALERI, F. (2006): Wissenschaftliches Rechnen mit MATLAB, Heidelberg, 272 S.
- REGIERUNG VON SCHWABEN (Hrsg.)(2004): Luftreinhalteplan für die Stadt Augsburg, Augsburg, 102 S.
- SCHÄFER, K., EMEIS, S., HOFFMANN, H. JAHN, C. (2006): influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol 15 (6), 647-659
- SEIBERT, P., BEYRICH, F., GRYNING, S.-E., JOFFRE, S., RASMUSSEN, A., TERCIER, P. (1999): Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. In: Atmospheric environment, 34, 1001-1027
- STADT AUGSBURG (Hrsg.)(2009): Statistisches Jahrbuch der Stadt Augsburg 2009, Augsburg, 170 S.
- STULL, R.: An introduction to Boundary layer Meteorology. 9. Auflage. Dordrecht, 670 S.
- TÜRK, M., EMEIS, S. (2003): Bestimmung der Mischungsschichthöhe aus über einen Zeitraum von 16 Monaten durchgeführten SODAR-Messungen mittels automatischer Auswertung. In: Forschungszentrum Karlsruhe – wissenschaftliche Berichte, FZKA 6927, 35 S.
- ÜBERHUBER, C., KATZENBEISSER, S., PRAETORIUS, D. (2005): MATLAB 7 – Eine Einführung. Wien, 318 S.
- VAISALA OYJ (Hrsg.)(2006): User's Guide – Vaisala Ceilometer CL31. Helsinki, 133 S.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.)(2004): Umweltmeteorologie – Bodengebundene Fernmessung des Sichtweite, Sichtweiten-Lidar. In: VDI-Richtlinien, VDI 3786, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b, 32 S.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.)(2004): Umweltmeteorologie – Bestimmung des vertikalen Windprofils mit Doppler-SODAR-Messgeräten. In: VDI-Richtlinien, VDI 3786, Blatt 11, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1, 22 S.
- WIEGNER, M., EMEIS, S., FREUDENTHALER, V., HEESE, B., JUNKERMANN, W., MÜNKEL, C., SCHÄFER, K., SEEFELDNER, M. VOGT, S. (2005): Mixing layer height over Munich, Germany: Variability and comparisons of different methodologies. In: Journal of geophysical research, Vol 111, 1-17

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Augsburg, 24.06.2009

Roman Friedl