

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
1.1 Das städtische Turbulenzregime	2
1.2 Turbulenzmessungen	5
1.3 Ziel der Arbeit	5
1.4 Standort	5
1.4.1 Die Region Münster	5
1.4.2 Die Messstandorte	7
2 Material und Methoden	9
2.1 Geräte	9
2.1.1 Das Young Ultraschallanemometer	9
2.1.2 Die automatische Wetterstation	9
2.2 Parameter und Messverfahren	10
2.2.2 Messungen mit dem Ultraschallanemometer	11
2.3 Auswahl geeigneter Messdaten	17
2.3.1 Rotation	17
2.3.2 Vergleich der auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie und auf dem Fernsehturm gemessenen Windrichtungen	19
2.4 Das Footprintmodell	21
3 Ergebnisse	24
3.1 Die Messungen am Fernsehturm	24
3.1.1 Die Charakteristik der Messdaten	24
3.1.2 Die Windrichtung	25
3.1.3 Die Schubspannungsgeschwindigkeit	26
3.1.4 Der Auftriebstrom	28
3.2 Die Footprint – Analyse	30
3.3 Vergleich der meteorologischen Daten vom Fernsehturm mit entsprechenden Daten aus den Rieselfeldern	33
3.3.1 Die Windrichtung und – Geschwindigkeit	33
3.3.2 Die Stabilität	37
3.3.3 Die Schubspannungsgeschwindigkeit	38
3.3.4 Der Auftriebstrom	40
3.3.5 Temperatur und Strahlung	41
4 Diskussion	43
4.1 Vergleich Fernsehturm – Rieselfelder	43
4.2 Daten vom Fernsehturm	45
4.3 Footprint - Analyse	51
5 Schlussfolgerungen	52
6 Literaturverzeichnis	54
7 Abbildungsverzeichnis	57
8 Tabellenverzeichnis	58

1 Einleitung

Landschaftsökologie untersucht die Leben – Umwelt – Relationen (Finke, 1996). Das Turbulenzregime über einer bestimmten Oberfläche hängt von den Eigenschaften der Unterlage ab, über der es sich entwickelt. Die Eigenschaften der Unterlage hängen von der geophysischen Ausgangssituation und vom Einwirken der verschiedenen Lebensformen auf die Oberfläche ab. Die Lebensformen und die abiotischen Faktoren eines bestimmten Raumes, die mit einander in Beziehung stehen, fasst man zu einem Ökosystem zusammen. Für verschiedene Ökosysteme sind verschiedene Lebensräume und Arten typisch. Diese Diplomarbeit untersucht Ergebnisse des Wirkens der Art Mensch im Ökosystem Stadt. Die Stadt an sich, die eine maximale Veränderung der natürlich gegebenen Umwelt darstellt, ist fast ausschließlich Ergebnis dieses menschlichen Einflusses. Möchte der Mensch in einer möglichst gering belasteten, für ihn lebensfreundlichen Umwelt leben, sollte er seine Handlungen in Bezug auf seine Umgebung überdenken, in soweit sie Vergangenheit sind und weitsichtig planen, in soweit sie die Zukunft betreffen. Um dies tun zu können, muss der Mensch seine Umwelt und die darin ablaufenden Prozesse genau kennen und verstehen. Dazu soll diese Arbeit beitragen. Die klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse einer Stadt bestimmen in hohem Maße die Lebensqualität der in ihr lebenden Menschen. Wie es um die Lufthygiene einer Stadt gestellt ist, hängt von der Art und der Menge der emittierten Schadstoffe und vom Austausch zwischen bodennahen und höheren Luftschichten ab. Diesen Austausch bezeichnet man als Fluss. Die Flüsse können in drei Kategorien eingeteilt werden: mittlerer Wind, Turbulenz und Wellen. Alle drei können allein oder gemeinsam auftreten. In der Stadtgrenzschicht spielen alle drei eine Rolle. Während der horizontale Transport von beispielsweise Feuchte, Impuls und Schadstoffen hauptsächlich durch den mittleren Wind erfolgt, findet der vertikale Transport hauptsächlich auf turbulentem Wege statt (Stull, 1991). Turbulenter Austausch ist somit sehr bedeutend für die Luftqualität einer Stadt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Turbulenzregime Münsters und soll der Anfang einer genaueren Analyse der Luftqualität der Stadt sein.

1.1 Das städtische Turbulenzregime

Der Teil der Atmosphäre, dessen aerodynamische Eigenschaften durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche geprägt sind, nennt sich atmosphärische Grenzschicht. Sie ist geprägt von turbulentem Austausch. Über der Grenzschicht liegt eine Temperaturinversion, welche Turbulenz unterbindet (Stull, 1991). Die Mächtigkeit der atmosphärischen Grenzschicht hängt

von der Witterung und der Beschaffenheit des Untergrundes ab. Sie unterliegt außerdem einem Tagesgang. Beträgt die Mächtigkeit am Tage 1 – 2 km über Grund, so ist sie in der Nacht mit einer Dicke von meist unter 500 m geringer. (Stull, 1991) Die Grenzschicht verändert sich im Laufe eines Tages in Mächtigkeit und Struktur. Unmittelbar nach Sonnenaufgang erwärmt sich die Unterlage. Durch turbulenten Wärmetransport aus der Unterlage löst sich die nächtliche Inversion auf und eine Schicht mit guter Durchmischung entsteht, die Mischungsschicht. Abends kurz vor Sonnenuntergang bildet sich eine geringmächtige stabile Grenzschicht am Boden, die die Nacht über bestehen bleibt. Über der stabilen Restschicht bleibt ein Teil der Mischungsschicht als so genannte Restschicht bestehen. Oberhalb wird diese durch eine freie Inversionsschicht begrenzt. (Foken 2003)

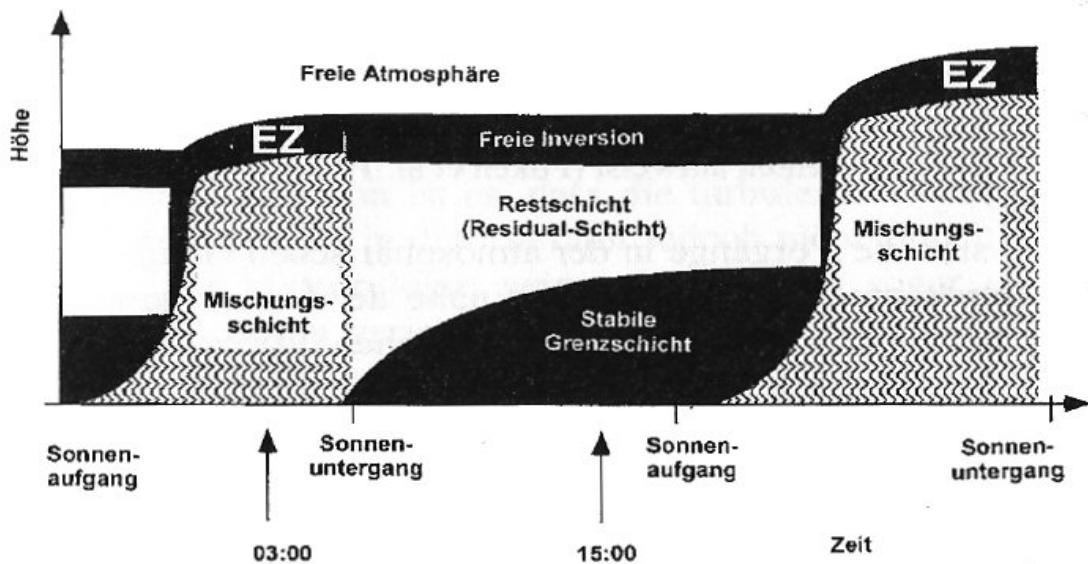


Abbildung 1.1 Tagesgang der turbulenten Schichtung (Foken, 2003)

Die Grenzschicht lässt sich grob in Oberschicht (Ekman-Schicht) und Bodenschicht (Prandtl-Schicht) unterscheiden. Die Prandtl-Schicht, welche die unteren 10% der atmosphärischen Grenzschicht ausmacht, zeichnet sich durch eine weitestgehende Höhenkonstanz der Stoff- und Energieflüsse aus. Somit eignet sie sich, um den Austausch zwischen Unterlage und Atmosphäre zu bestimmen (Foken 2003). Sie wird deswegen auch Constant-Flux-Layer genannt.

Die Mächtigkeit und Ausprägung einer Grenzschicht ist abhängig von der zu Grunde liegenden Oberfläche. Über einer Stadtoberfläche ist die Grenzschicht mächtiger als über Freiland. Durch die erhöhte Rauigkeit reicht die durch Turbulenz geprägte Grenzschicht in größere Höhen. In Helbig (1999) findet sich ein Vergleich der vertikalen Windgeschwindigkeiten während einer windarmen Strahlungswetterlage. Daraus geht hervor,

dass sich die Grenzschicht über der Stadt beispielsweise auch nachts bis in mehr als 100 m Höhe über Grund erstreckt, während sie über Freiland im Bereich von 30 m über Grund endet.

Innerhalb der Prandtl-Schicht (engl. constant flux or surface layer) finden sich von unten nach oben: die Grundsicht, die Rauigkeitsschicht und die Inertialschicht. Die Grundsicht (engl. urban canopy layer) beschreibt das Luftvolumen zwischen den Rauigkeitselementen. Sie endet etwa mit der mittleren Gebäudehöhe. Direkt darüber schließt sich die Rauigkeitsschicht (engl. urban turbulent wake layer) an. Diese Schicht befindet sich in Annäherung an die Rauigkeitselemente und beschreibt den von diesen direkt beeinflussten Raum (Oke, 1987). Die Inertialschicht beginnt ab der so genannten Blending – Height, ab welcher die Strömung unbeeinflusst von den jeweils unmittelbar darunter befindlichen Rauigkeitselementen ist. Ab hier sind die Flüsse mit der Höhe konstant und das Windprofil ist logarithmisch. Die an der Oberfläche kleinräumig gebildeten Verwirbelungen haben sich zu einer turbulenten Strömung formiert.

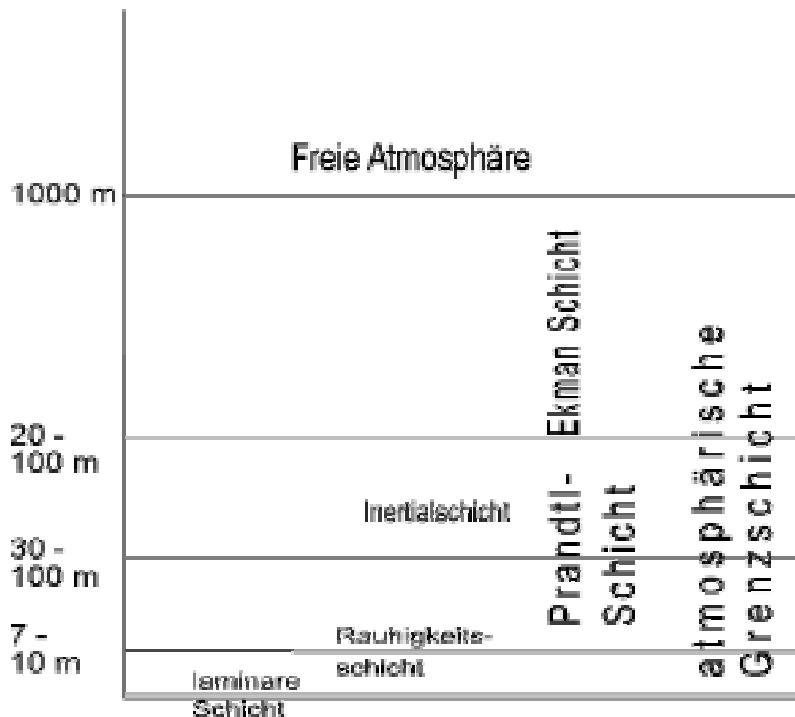


Abbildung 1.2 Aufbau der Stadtgrenzschicht, Höhenangaben gelten für Wohnviertel mit einheitlich hohen Häusern von 7 m (Fezer, 1995), Ausnahme: Höhenangabe der Inertialschicht ist verallgemeinert (Claussen und Walmsley, 1994)

1.2 Turbulenzmessungen

Um die Aspekte einer turbulenten Strömung zu bestimmen, muss man die Turbulenz messen. Allgemein ist Turbulenz Ausdruck für die in der Natur unregelmäßige Windströmung (Helbig, 1999). Sie äußert sich in der kurzzeitigen chaotischen Schwankung von Temperatur, Windgeschwindigkeit und Konzentration skalarer Beimengungen der Luft um ihr jeweiliges Mittel. Die Frequenz der Schwankungen hängt von der Größe und der Geschwindigkeit des betreffenden Turbulenzelementes ab. Die Größe atmosphärischer Turbulenzelemente liegt zwischen 1 cm und über 100 m. Dem entsprechend ergeben sich Zeiten von 1 s bis 10 min. Die Turbulenzfrequenzen liegen in Größenordnungen von etwa $10^{-4} - 10^1$ Hz. (Foken, 2003). Für die Messung solcher Fluktuationen benötigt man Technik, die in der Lage ist, die entsprechenden Parameter zeitlich hochauflösend zu bestimmen, so dass ein möglichst großer Teil des Turbulenzspektrums erfasst werden kann. Wind und Temperatur können mit einem Ultraschallanemometer beispielsweise mit 20 Hz gemessen werden. Damit können Impuls- und Wärmefluss bestimmt werden. Im Methodenteil dieser Arbeit finden sich dazu nähere Erläuterungen.

1.3 Ziel der Arbeit

Wie aus dem Titel der Arbeit ersichtlich, soll die Arbeit in erster Linie den Fernsehturm als Standort zur Bestimmung des Turbulenzregimes der Stadt Münster bewerten. Dazu müssen folgende Fragen geklärt werden: Unter welchen Bedingungen können überhaupt meteorologische Messungen am Standort gemacht werden? Welches Turbulenzregime lässt sich am Fernsehturm feststellen? Ist dieses Turbulenzregime an das Bodenturbulenzregime der Stadt Münster angebunden? Wenn ja, wann und unter welchen Bedingungen? Welche Einzugsgebiete beeinflussen die am Fernsehturm durchgeführten Messungen? Mit dieser Arbeit soll ermöglicht werden, zu entscheiden, ob und wie in Zukunft vom Fernsehturm Münster Flussmessungen zum Beispiel zur Untersuchung der lufthygienischen Verhältnisse der Stadt gemacht werden können.

1.4 Standort

1.4.1 Die Region Münster

Im Wesentlichen beziehen sich die erhobenen Daten und Ergebnisse auf die Stadt Münster und ihr Umland. Die Stadt Münster hat etwa 266 000 Einwohner und das Stadtgebiet umfasst 302,8 km². Davon sind 29,8 % Siedlungs- und Verkehrsfläche. Mit einer Bevölkerungsdichte

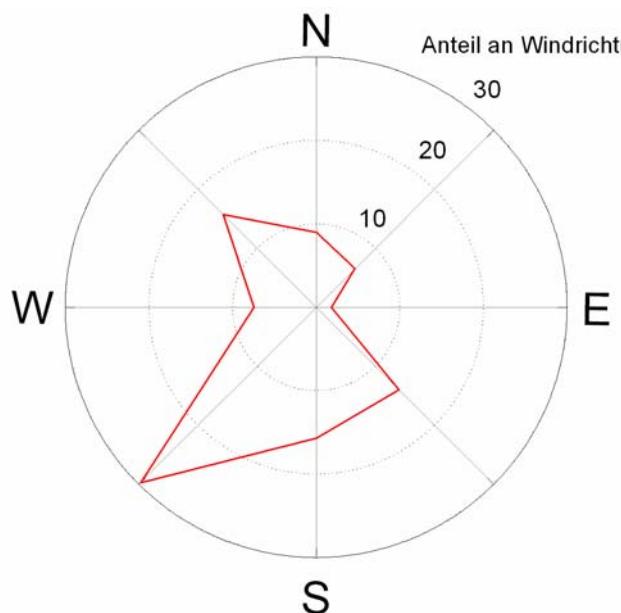
von 877,1 Einwohner/km² ist Münster für eine Stadt weniger dicht besiedelt (Aachen 1519,5 Einwohner/km²; Bielefeld 1248,5 Einwohner/km²) (allesklar.com AG , 2003). Die Stadt dehnt sich von Nord nach Süd über 24,4 km und von Ost nach West über 20,6 km aus und ist nur recht schwach reliefiert. Der höchste Punkt mit 97 m ü. NN liegt im Nordwesten bei Nienberge und der niedrigste Punkt mit 46 m ü. NN liegt im Nordosten in der Emsniederung (Kiese et al., 1992). Von der Bebauung her unterscheidet sich der Kernbereich innerhalb des Ringstraßensystems als eine Wohnzone in dichter Block- und Zeilenbebauung und außerhalb des Ringes der Außenbereich als eine Wohnzone in lockerer Reihen- und Einzelhausbebauung. Industrie gibt es nur sehr vereinzelt. Insgesamt sind im Stadtgebiet Häuser mit mehr als 4 Geschossen selten. Sie beschränken sich auf Kirchen und andere vornehmlich öffentliche Gebäude (Kiese et al., 1992). Die Stadt Münster ist in das nach ihr benannte Münsterland eingebettet. Das Münsterland ist eine durch menschliche Nutzung stark geprägte Kulturlandschaft. Es erstreckt sich über das Zentrum der westfälischen Bucht des Norddeutschen Tieflandes, die im Nordosten und Osten vom Teutoburger Wald, im Südosten und Süden vom Haarstrang, dem Sauerland und Bergischen Land und im Westen vom Rhein begrenzt wird. Die Quellgebiete für die in dieser Arbeit untersuchten Turbulenzflüsse befinden sich im Stadtgebiet Münster oder im unmittelbaren Umkreis der Stadt mit einem Radius von etwa 20 km. Landschaftlich befinden wir uns dabei im Kernmünsterland. Im Wesentlichen ist dies eine ebene Landschaft mit einer absoluten Höhenlage von etwa 50 m über N.N.. Größere Erhebungen finden sich im Westen von Münster mit den Baumbergen bis 183 m über N.N. Überblickt man die Landschaft von einem Aussichtspunkt zum Beispiel dem Fernsehturm (Abb. 1.3), wird deutlich, dass es sich um eine parkähnliche Landschaft handelt. Äcker, Wiesen und Wälder wechseln sich in rascher Folge ab (Schneider, 1966). Weitere



prägende Elemente sind Windschutzstreifen und Wallhecken.

Abbildung 1. 3 Blick vom Fernsehturm in das Münsterland

Klimatisch ist die Region durch die Westwetterlagen geprägt. Atlantische Tiefausläufer überqueren häufig das Münsterland. Durch die Nähe zum Meer und durch die geringe Reliefenergie die zwischen der Region und dem Meer vorhanden ist, erreichen Zyklonen noch voll entwickelt oft in rascher Folge mit nur kurzem Zwischenhocheinfluss Münster (Kiese et al., 1992). Daraus erklärt sich auch die verglichen mit Süddeutschland im Mittel recht hohe Windgeschwindigkeit und die recht seltenen Kalmen (Tagesmittel der Windgeschwindigkeit < 1 m/s). Treten in Süddeutschland 16 % (Augsburg) – 40 % (Passau) Kalmen im Jahr auf, so sind es in Münster nur 2,2 % ähnlich wie an der Küste (Borkum 2,0 %) und im Mittelgebirge (Fichtelberg 2,6 %) (Kiese et al., 1992). Diese Angaben beziehen sich auf das langjährige



Mittel von 1881 – 1930, wie auch die folgenden Parameter: mittlerer Jahresniederschlag 777 mm, mittlere Januartemperatur 1,3 °C, mittlere Julitemperatur 17,3 °C und mittleres Juli-Maximum 30,8 °C. Wie man auf der Jahreswindrose in Abbildung 1.1 erkennen kann, ist die Hauptwindrichtung in Münster der Südwesten.

Abbildung 1.3 Windrose Münster bestimmt im Klimamessfeld des Instituts für Landschaftsökologie in der Steinfurter- Str. Nov. 1990 - Dez. 1999

1.4.2 Die Messstandorte

Für die Arbeit wurden Messungen von drei Standorten (Abb. 1.4) in Münster herangezogen. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Messungen am Fernsehturm im Südosten der Stadt. Die Messungen finden dort in 130 Metern Höhe am Nordrand der dritten Betonplattform des Turmes statt. Der nächst wichtigere Standort befindet sich im Norden Münsters in den Rieselfeldern. Hier wird mit derselben Messtechnik wie am Fernsehturm gearbeitet. Die automatische Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie wurde als Referenzstandort für Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie zur Bestimmung der kurzweligen Sonneneinstrahlung. Zu beachten ist, dass Temperatur und Wind hier nicht mit einem Ultraschallanemometer gemessen wurden.

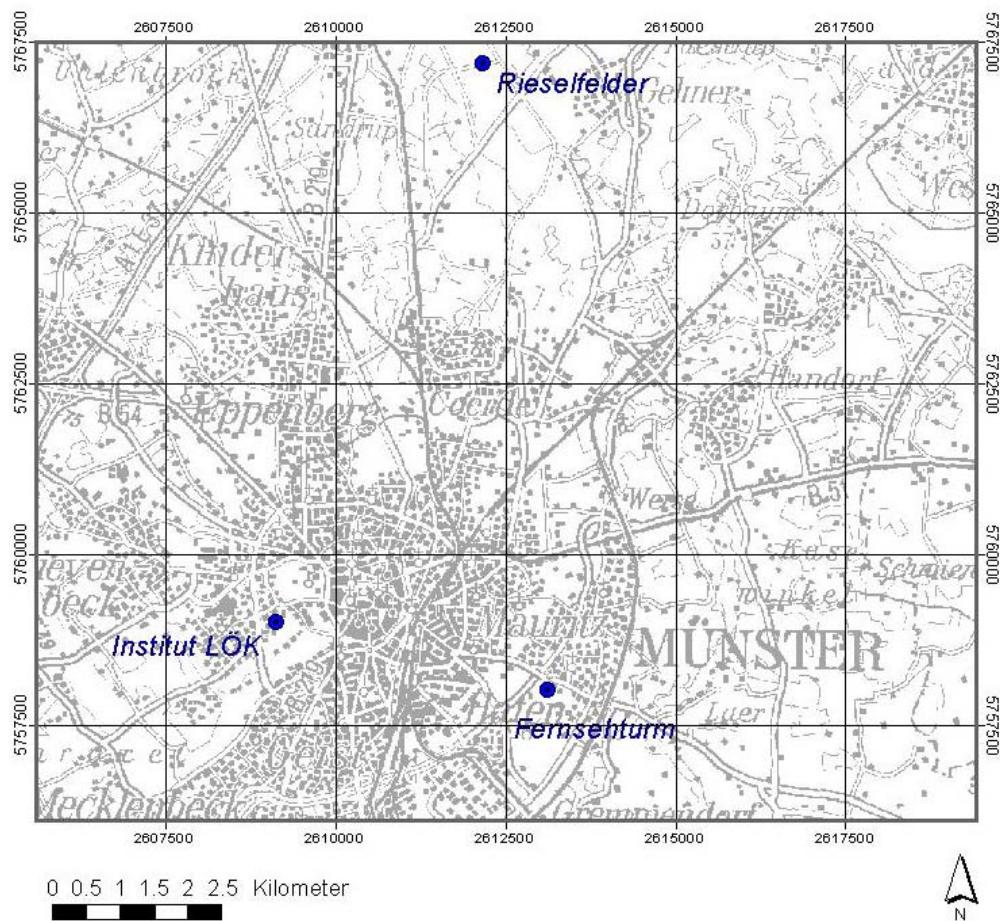


Abbildung 1.4 Messstandorte

2 Material und Methoden

2.1 Geräte

2.1.1 Das Young Ultraschallanemometer



Alle Turbulenzmessungen wurden mit einem Ultraschallanemometer der Firma Young, Model 81000 (Abb. 2.1) durchgeführt. Das Anemometer ist senkrecht auf einer Stütze unterhalb der Messstrecke befestigt. Die Messstrecke ist der Bereich zwischen den drei oberen und den drei unteren Ultraschallsensoren, die sich paarweise gegenüber stehen.

Abbildung 2.1 Young 81000 (R. M . Young Company, 2003)

Das verwendete Gerät kann mit bis zu 32 Hz Daten ausgeben. Intern misst es mit Frequenzen bis 160 Hz. Das Anemometer ist senkrecht auf einer Stütze unterhalb der Messstrecke befestigt. Das verwendete Gerät kann mit bis zu 32 Hz Daten ausgeben. Intern misst es mit Frequenzen bis 160 Hz. Weitere technische Daten sind die Messstreckenlänge von etwa 15 cm, der Messbereich für die Windgeschwindigkeit 0 - 60 m/s, die Auflösung 0,01 m/s und die Genauigkeit der Anströmrichtung 1% (Mauder, 2002). Weil das Gerät senkrecht auf einem Fuß steht, können Messungen omnidirektional von 0 – 360° Anströmrichtung gemacht werden.

2.1.2 Die automatische Wetterstation

Auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie befindet sich eine automatische Wetterstation, die permanent Temperatur-, Wind-, Strahlungs-, Niederschlags- und Feuchtedaten aufzeichnet. Für diese Arbeit werden Temperatur, Wind- und Strahlungswerte der Wetterstation verwendet. Es muss berücksichtigt werden, dass die Wetterstation auf dem Institutsdach die Werte über 10 min mittelt, während die Messungen mit dem Ultraschallanemometern über 30 min gemittelt wurden. Die Messgeräte befinden sich über der mit Gras bewachsenen Oberfläche des Institutsdachs, welches etwa 18 m hoch ist. (Abb. 2.2.)



Mit einem Kombi-Sensor (Rotronic Hydroclip), der sich zum Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung in einer Wetterhütte befindet, werden Lufttemperatur und relative Luftfeuchte gemessen. Der Sensor befindet sich 2 m über dem Institutsdach. Die Windmessung erfolgt in 4,5 m über dem Dach mit einer Windfahne (Friedrichs Typ 4123) für die Windrichtung und mit einem Schalensternanemometer (Friedrichs Typ 4035) zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit. Die kurzwellige Strahlung wird mit einem Strahlungsgeber (Kipp und Zonen CNR 5) in 3,20 m Höhe erfasst (AG Klimatologie, 2003).

Abbildung 2.2 Automatische Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie (AG Klimatologie, 2003)

2.2 Parameter und Messverfahren

2.2.1.1 Ablauf der Messungen auf dem Fernsehturm



Für die Turbulenzmessungen auf dem Fernsehturm war ein Young 81000 Ultraschallanemometer auf der Spitze eines 2,5 m hohen Gittermastes montiert (Abb.2.3). Der Mast mit dem Ultraschallanemometer stand von der Mitte des Fernsehturms gesehen exakt nach Norden ausgerichtet am äußersten Rand der dritten Plattform des Fernsehturms in 129,5 m Höhe. Das Young 81000 befand sich etwa 2,5 m über dem Plattformuntergrund. Zur darüber liegenden Plattform war die Entfernung ungefähr die gleiche.

Abbildung 2.3 Aufbau der Messanlage auf dem Fernsehturm

Die Wand des Fernsehturms, der in der Höhe einen Durchmesser von 5 m hatte, war 8 m entfernt. Aufgrund dieses Aufbaus ist eine erhebliche Störung im südlichen Anströmbereich des Anemometers zu erwarten.

Die vom Young ausgegebenen Daten wurden an einen Computer per Datenkabel weitergeleitet. Der Computer befand sich zwei Plattformen tiefer in der Betriebsebene des Fernsehturmes in einem geschlossenen Raum. Die Messkampagne lief vom 20.03.2003 bis zum 01.10.2003. Während des Messzeitraumes gab es mehrere teilweise bis zu 2 Wochen große Aufzeichnungslücken wegen technischer Probleme. Einen Überblick über die größeren Messlücken wird in Kapitel 3.1.1 gegeben.

2.2.1.2 Ablauf der Messungen in den Rieselfeldern

Im Rahmen des klimatologischen Geländepraktikums im Sommersemester 2003 fand die Messkampagne in den Rieselfeldern statt. Der genaue Messzeitraum begann am 15.05.2003 und endet am 18.06.2003. Es wurden neben weiteren meteorologischen Messungen auch Turbulenzmessungen mit einem Young 81000 Ultraschallanemometer. Das Young war auf der Spitze eines 6,50 m hohen Mastes, der auf freiem Feld stand, befestigt. Damit befand es sich in einer Höhe größer als die zweifache Bestandshöhe. Durch den zusätzlichen Aufbau eines LICOR 7500 CO₂/H₂O-Analysators östlich des Ultraschallanemometers im Rahmen anderer Untersuchungen, ist eine Störung der Turbulenzmessungen bei Ostwind zu erwarten. Die Daten wurden durch ein Datenkabel zu einem in der Wetterhütte befindlichen PC gesendet und aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte für die mit den Turmdaten zu vergleichenden Parameter auf dieselbe Art und Weise.

2.2.1.3 Ablauf der Messungen auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie

Die Messungen auf dem Dach des Instituts finden seit dem 20.01.2003 permanent statt. Alle Daten werden von einem Computer aufgezeichnet und über 10 min gemittelt. Dann werden sie geprüft und archiviert.

2.2.2 Messungen mit dem Ultraschallanemometer

Das Messverfahren des Ultraschallanemometers nutzt die von Dichte und Temperatur abhängigen Eigenschaften des Ultraschalls aus. Zwei sich gegenüberliegende Sensoren senden jeweils ein Ultraschallsignal mit 100 kHz aus, was vom gegenüberliegenden Sensor

empfangen wird. Die Laufzeit beider Signale wird verglichen und daraus wird die Windgeschwindigkeit berechnet. Aus den Laufzeitmessungen der drei Sensorenpaare lässt sich sowohl die dreidimensionale Windgeschwindigkeit in ihren drei Komponenten als auch die Schalltemperatur bestimmen. Damit man das mikrometeorologisch relevante Turbulenzspektrum 10^{-4} Hz bis 20 Hz erfassen kann, muss man mit ebenso hoher Messfrequenz arbeiten. Das Young wurde deshalb auf eine Messung mit 20 Hz programmiert. Ein spezielles Programm speichert die Daten in 30 – min – Dateien. Die zeitliche Auflösung von 20 Werten pro Sekunde bleibt dabei erhalten. Folglich stehen im Idealfall in der Datei für jeden Parameter 36000 Werte. Die entstandenen Binärdateien wurden alle 2 – 3 Wochen auf eine CD gebrannt und zur Weiterverarbeitung ins Institut gebracht.

Mit dem Ultraschallanemometer wurden am Fernsehturm und in den Rieselfeldern Zeit, Horizontalwind, Lateralwind, Vertikalwind und die akustische Temperatur gemessen. Aus den gemessenen Parametern und der Messhöhe wurden in der Folge weitere relevante Werte berechnet. Es wurden Windrichtung, Horizontalwindgeschwindigkeit, turbulenter Fluss fühlbarer Wärme, turbulenter Impulsfluss, Schubspannungsgeschwindigkeit, Stabilität, sowie als Qualitätsparameter die integrale Turbulenzcharakteristik und Stationarität der Temperatur innerhalb des Messintervalls. Alle Messungen und Berechnungen erfolgten für jeweils ein 30 min- Intervall.

Die Windrichtung und die horizontale Windgeschwindigkeit werden aus den zwei horizontalen Windkomponenten (u, v) bestimmt.

Die turbulenten Flüsse werden mit Hilfe der Eddy - Kovarianzmethode bestimmt. Die Methode beruht auf der Annahme, dass der Transport von Wärme, Feuchtigkeit, Impuls und skalarer Beimengungen zwischen bodennaher Grenzschicht und Atmosphäre durch turbulenten Austausch abläuft. Die Turbulenzelemente bilden die Basis für Wärme- und Impulsaustausch sowie skalarer Beimengungen zwischen tiefer und höher gelegenen Luftsichten. Auf Basis der Reynolds-Zerlegung ist es möglich den turbulenten Transport zu quantifizieren. Demnach kann jede Messgröße in durchschnittliche und in turbulente Teile zerlegt werden. Für die horizontale Windgeschwindigkeit hat dies folgendes Aussehen: $u = \bar{u} + u'$, wobei \bar{u} die mittlere und u' die turbulente Komponente ist. Turbulenzelemente sind durch ihre Dichte, ihre vertikale Geschwindigkeit und durch den Gehalt der skalaren Beimengung beziehungsweise Impuls oder Wärme definiert. Um den vertikalen Impulsfluss

zu messen, bedarf es der Windgeschwindigkeit, des Vertikalwindes und der Dichte. Der Vertikalwind wird ebenfalls in seine mittlere und sein turbulente Komponente zerlegt: $w = \bar{w} + w'$. Durch Anwendung der Reynolds-Zerlegung auf diese drei Merkmale, kann die Gleichung für den mittleren vertikalen Fluss des Impulses, beschrieben durch die Schubspannung τ , wie folgt geschrieben werden:

$$\tau = \overline{(\rho + \rho')(w + w')(\bar{u} + u')}$$

durch Ausmultiplizieren ergibt sich:

$$\tau = (\overline{\rho w \bar{u}} + \overline{\rho w u'} + \overline{\rho w' \bar{u}} + \overline{\rho w' u'} + \overline{\rho' w \bar{u}} + \overline{\rho' w u'} + \overline{\rho' w' \bar{u}} + \overline{\rho' w' u'})$$

Alle Terme, die nur eine fluktuierende Variable enthalten, können entfernt werden, da das Mittel über ihnen Null ist und somit der gesamte Term auch Null wird. Terme, die den fluktuierenden Anteil der Luftplichte ρ enthalten, können vernachlässigt werden, da die Luftplichte als zeitlich konstant innerhalb der unteren Atmosphäre angenommen werden kann. Werden nur homogene Gebiete ohne Stellen, die vertikale Bewegungen begünstigen untersucht, können Terme, die die mittlere vertikale Geschwindigkeit enthalten vernachlässigt werden. (Universität Freiberg, 2004)

Unter den oben genannten Bedingungen erhält man:

$$\tau = \overline{\rho \cdot u' \cdot w'} \text{ (Formel 2.1)}$$

Analog dazu wird der turbulente Fluss fühlbarer Wärme durch die Kovarianz der vertikalen Windkomponente und der Temperatur bestimmt. Weil das Ultraschallanemometer die akustische Temperatur misst und diese von der potentiellen Temperatur Θ (Temperatur bei konstantem Druck), welche man zur Berechnung des turbulenten Wärmeflusses benötigt, abweicht, wird der so genannte turbulente Auftriebsstrom gemessen (Foken, 2003).

Die akustische Temperatur wird nicht nur in die Berechnung des Auftriebstromes miteinbezogen, sondern auch direkt für die Auswertung benutzt. Dabei ist zu beachten, dass die Schalltemperatur von der realen Temperatur deutlich abweicht. Sie ähnelt stark der Temperatur bei konstantem Druck, der potentiellen Temperatur. Für die Schalltemperatur gilt: $T_s = T(1 + 0,32 e/p)$ (Formel 2.2) (Foken 2003).

Wie oben beschrieben wird aus der Kovarianz der lateralen und der vertikalen Windgeschwindigkeit der Impulsfluss berechnet.

Die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* hängt von Schubspannung τ ab. Die Schubspannung ist der turbulente Diffusionskoeffizient für den Impuls. Sie ist innerhalb der Prandtl – Schicht über das konstante Verhältnis zwischen Windgeschwindigkeit und Höhe definiert.

$$\tau = \rho \cdot k \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \text{ (Formel 2.3) (Foken, 2003)}$$

Für die Schubspannungsgeschwindigkeit gilt:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \text{ (Formel 2.4) (Foken, 2003)}$$

Also ist u^* ein Maß für den turbulenten Impulsaustausch.

Außerdem wird mit dem Auswertungsprogramm „Dana“ (Kapitel 2.2.2.1) die Obukhov - Länge bestimmt. Die Obukhov - Länge ist die Höhe einer Luftsäule, in welcher Produktion ($L < 0$) bzw. Verbrauch ($L > 0$) kinetischer Turbulenzenergie infolge der Auftriebskräfte gleich der dynamischen Produktion kinetischer Turbulenzenergie pro Volumeneinheit in einer beliebigen Höhe z innerhalb der dynamischen Unterschicht, multipliziert mit dieser Höhe z , ist (Bernhardt, 1995). Die Obukhov- Länge ist somit ein Maß für Stabilität. Bei starken Auftriebskräften ist die Schichtung labil, bei schwachen bzw. negativen Auftriebskräften ist sie entsprechend neutral oder stabil.

$$\text{Obukhov- Länge: } L = -\frac{u^{*3}}{k \frac{g}{T} \frac{Q_H}{\rho \cdot c_p}} \text{ (Formel 2.5) (Bernhardt, 1995)}$$

$$\text{Stabilitäts- Parameter: } \zeta = \frac{z}{L} \text{ (Formel 2.6) (Bernhardt, 1995)}$$

Der Parameter als Stabilitätsmaß ist für die weiteren Berechnungen von Bedeutung. Unter anderem fließt er in die Berechnung der Quellgebiete der Turbulenzen mit der Footprintmethode mit ein.

Zum Vergleich und zur Erkennung von Zusammenhängen zwischen den Parametern und den Daten vom Fernsehturm und aus den Rieselfeldern, wird das Verfahren der linearen Regressionsanalyse benutzt. Dabei werden eine Regressionsgerade und der Korrelationskoeffizient berechnet. Der Korrelationskoeffizient r ist der auf das Wertebereich $[-1,1]$ standardisierte Maß für den Zusammenhang zweier Variablen X und Y . Er wird aus der Kovarianz C und der Varianz V der Variablen berechnet, $r(X, Y) = C[X, Y] / (V[X] \cdot V[Y])^{1/2}$

(Streit, 2004). Die Varianz ist das Mittel der Abweichungen der Einzelwerte der Grundgesamtheit von ihrem Mittelwert. In der Regressionsgerade $Y = B \cdot X + A$ werden die Steigung B und der Ordinatenabstand A entsprechend dem Gauss'schen Optimierungsprinzip der kleinsten Fehlerquadrat – Summe berechnet (Streit, 2004). Das bedeutet, die Summe der Quadrate der Abweichungen der Messwerte von der Regressionsgeraden wird minimiert. Je näher der Korrelationskoeffizient an 1 oder – 1 ist, je größer ist der statistische Zusammenhang der Variablen.

2.2.2.1 Datenverarbeitung

Die am Fernsehturm und in den Rieselfeldern bestimmten Daten wurden im Institut für Landschaftsökologie weiterverarbeitet. Dort erfolgten zunächst folgende Schritte: eine Umwandlung der Binärdateien, Plausibilitätsprüfung, Mittelung direkt gemessener Parameter über 30 min, Berechnung der Flüsse und eine Rotation der Daten in eine waagerechte Ebene.

Die Qualitätsprüfung und die Berechnung der Flüsse erfolgt mit der, in der AG Klimatologie entwickelten Software „Dana“. Dieses Programm prüft zunächst die Plausibilität der Daten. Das bedeutet man gibt manuell ein, welche Kriterien die Daten zu erfüllen haben. Die verwendeten Plausibilitätskriterien sind in Tabelle 2.1. aufgeführt.

Parameter	Minimum	Maximum
Horizontalwind u in m/s	-20	20
Lateralwind v in m/s	-20	20
Vertikalwind w in m/s	-7	7
akustische Temperatur	-15	35

Tabelle. 2.1 Plausibilitätskriterien der Messung mit dem Young 81000

Erfüllt ein Wert die oben aufgeführten Kriterien nicht, wird er durch den vorangegangenen ersetzt. In einem 30 min- Intervall finden 36000 Messungen statt. Wenn mehr als 1000 davon nicht den Kriterien entsprechen, wird das entsprechende Intervall nicht für die Auswertung verwendet.

Hat Dana die Plausibilität der Werte überprüft und die fehlerhaften Datensätze entfernt, werden die Flüsse und Qualitätskriterien berechnet. Außerdem wird ein eventuell vorhandener Trend in den Temperaturwerten mittels „linear Detrending“ entfernt. Beim „linear Detrending“ werden die 30 min- Intervalle zunächst in drei 10 min- Intervalle aufgeteilt.

Dann wird durch die gemessenen Werte eine Regressionsgerade gelegt. Mittels der Funktion für die Gerade wird der Trend aus den gemessenen Werten entfernt.

Die Qualität der Daten wird mit den Parametern Stationarität, Schubspannungsgeschwindigkeit und integraler Turbulenzcharakteristik bewertet. Stationarität, also das Fehlen eines Trends, in den Daten ist erforderlich, damit die Flüsse mit der Eddykovarianzmethode berechnet werden können. Weichen die Werte innerhalb eines 30 min- Intervalls trendmäßig mehr als 30 % ab, kann Stationarität nicht mehr als gegeben betrachtet werden. Die integrale Turbulenzcharakteristik (ITC) gibt ebenfalls an, wie stark die Turbulenz entwickelt ist. Sie hängt in erster Linie von der Stabilität ab und stellt einen Erwartungswert für die Art und den Umfang des turbulenten Austausches dar. Diesem Erwartungswert werden die berechneten Flüsse gegenübergestellt. Weichen sie mehr als 75 % vom Erwartungswert ab, ist die Messung fehlerhaft. Aus der Ergebnistabelle ist ersichtlich, welche Daten nicht den Qualitätskriterien entsprechen. Diese Daten können dann nach genauerer Betrachtung verworfen werden.

Zu den genannten Qualitätsparametern werden folgende Parameter, die für die Ziele dieser Arbeit relevant sind, von Dana für 30 min- Intervalle ausgegeben: Schlusszeitpunkt der 30 min, Windrichtung, Geschwindigkeit u der horizontalen Windkomponente, Geschwindigkeit v der lateralen Windkomponente, Geschwindigkeit w der vertikalen Windkomponente, horizontale Windgeschwindigkeit (horizontale + laterale Komponente), die Schalltemperatur, Kovarianz von Vertikalwind und Horizontalwind, die Kovarianz von Vertikalwind und Schalltemperatur, die Schubspannungsgeschwindigkeit und der Stabilitätsparameter z/L. Außerdem lässt sich aus den von Dana ausgegebenen Dateien nach der Plausibilitätsprüfung die Standardabweichung der lateralen Windkomponente σ_v ermitteln, welche für die Berechnung der später zu erläuternden Footprints nötig ist.

In allen Berechnungen in welche die Höhe über Grund mit einfließt, wird die so genannte Verschiebungshöhe verwendet. Die Turbulenzgleichungen wurden für unbewachsene und unbebaute Boden entwickelt. Durch Rauigkeitselemente verlagert sich das Nullniveau nach oben. Wenn in die Höhe z gemessen wurde ist die Verschiebungshöhe d abzuziehen. Sie entspricht etwa 2/3 der durchschnittlichen Bestandshöhe (Foken, 2003). Für die Berechnungen am Fernsehturm wurde eine Verschiebungshöhe von 15 m angenommen.

2.3 Auswahl geeigneter Messdaten

Schon beim Aufbau der Messapparatur wurde deutlich, dass das Windfeld bei Anströmung aus bestimmten Richtungen durch Hindernisse gestört wird. Besonders offensichtlich ist die Störung am Fernsehturm durch den Turm selbst, der sich als massives Hindernis etwa 8 m südlich des Messturmes aufbaut. Weitere Störfaktoren sind die Plattformen oberhalb und unterhalb des Gerätes. Des Weiteren ist es schwierig, das Anemometer genau senkrecht aufzustellen. Diese Störungen müssen in den Messdaten erkannt und herausgefiltert werden.

2.3.1 Rotation

Da das Ultraschallanemometer nicht genau senkrecht aufgebaut ist, ergibt sich ein systematischer Fehler beim Vertikalwind. Je nach dem in welche Richtung es geneigt ist, wird für den Wind aus dieser Richtung ein stetig abwärts gerichteter Wind gemessen. Theoretisch sollte der Vertikalwind im Mittel null sein. Stellt man den Vertikalwind abhängig von der Windrichtung dar, so ergibt sich eine Sinuskurve, falls das Ultraschallanemometer nicht senkrecht zur Oberfläche aufgebaut ist. In Abbildung 2.4 ist diese Abhängigkeit dargestellt.

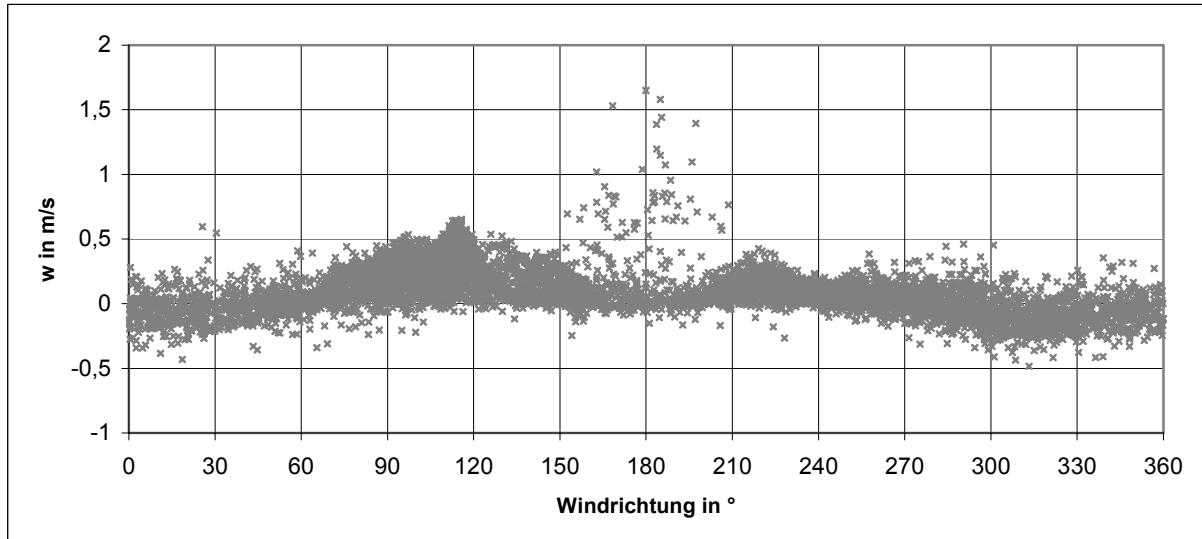


Abbildung 2.4 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung auf Basis des unrotierten Datensatzes

Um diesen Fehler herauszufiltern wurde eine Rotation nach der Planar- Fit- Methode nach (Wilczak et al., 2001) angewendet. Der mittlere Wind und der Spannungstensor für jedes, in diesem Fall 30- Minuten- Intervall, werden bestimmt und zwar in dem Koordinatensystem, in dem das Anemometer gemessen hat. Dann wird eine lineare Regression für den mittleren Wind angefertigt, um die Faktoren für die Rotationsmatrix zu errechnen. Mit der

Rotationsmatrix wird das Anemometerkoordinatensystem in die waagerechten Stromlinien des Horizontalwindes gedreht. Dabei wird jedes Intervall mit der zuvor errechneten Faktormatrix multipliziert. Die Faktormatrix ist so berechnet, dass der mittlere Vertikalwind aller Intervalle im Mittel null ist. Für die einzelnen Intervalle kann der mittlere Vertikalwind von null abweichen. Diese Methode darf nur verwendet werden, wenn sich die Position des Ultraschallanemometers während der Messperiode nicht verändert hat, weil der gesamte Datensatz der Messreihe zur Bestimmung des Neigungswinkels verwendet wird.

Die Planar- Fit- Methode handelt es sich um eine Koordinatenrotation, die auf Basis des gesamten Datensatzes eine lineare Regression durchführt. Sind die Winddaten nicht durch eine Anemometerneigung systematisch gestört, sondern zusätzlich durch eine andere Quelle verliert die lineare Regression an Qualität, was sich negativ auf die Rotation auswirken würde.

Im Folgenden wird die Rotation der Daten vom Fernsehturm beschrieben. In Abbildung 2.4 ist die Ausgangssituation vor der Rotation dargestellt. Der höchste und der tiefste Punkt der Sinuskurve liegen etwa bei Ost Südost bzw. West Nordwest. Das bedeutet, dass das Ultraschallanemometer mit einer leichten Neigung nach West Nordwest aufgebaut war. Außerdem ist eine ungewöhnliche Streuung im südlichen Anströmbereich zu erkennen. Dies deutet eindeutig auf eine Störung hin. Diese Störung beeinflusst die Rotation der Daten. Um einzuschätzen, wie ausgedehnt der gestörte Anströmbereich ist, wurde zunächst der Bereich $150^\circ - 210^\circ$ ausgeschlossen, und vor der zweiten Rotation der Bereich von $120^\circ - 240^\circ$.

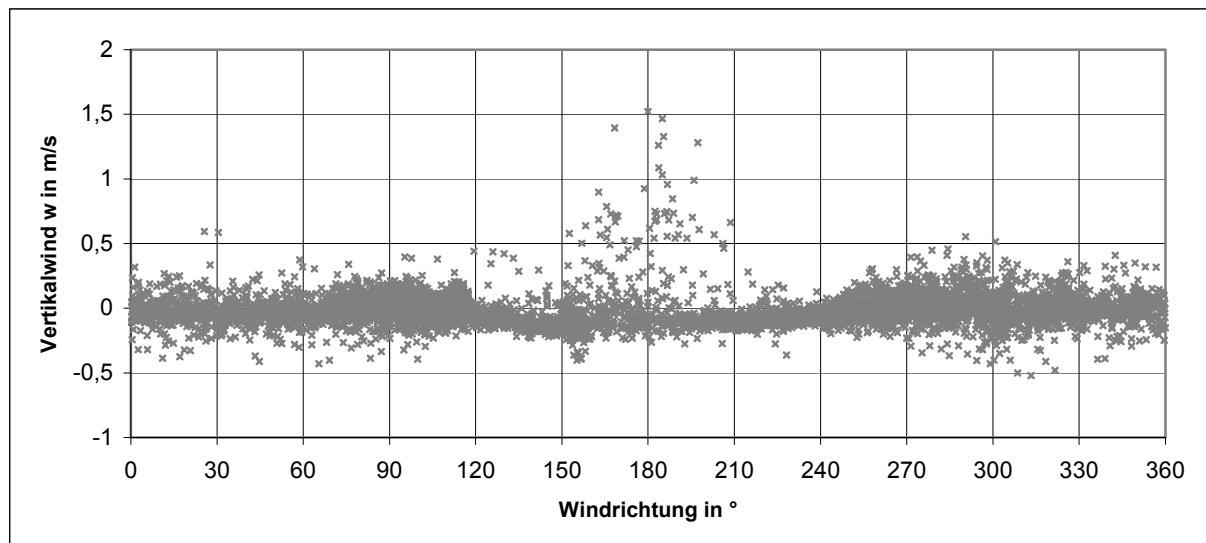


Abbildung 2.5 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung nach der Rotation unter Ausschluss der Daten aus der Anströmrichtung $150^\circ - 210^\circ$

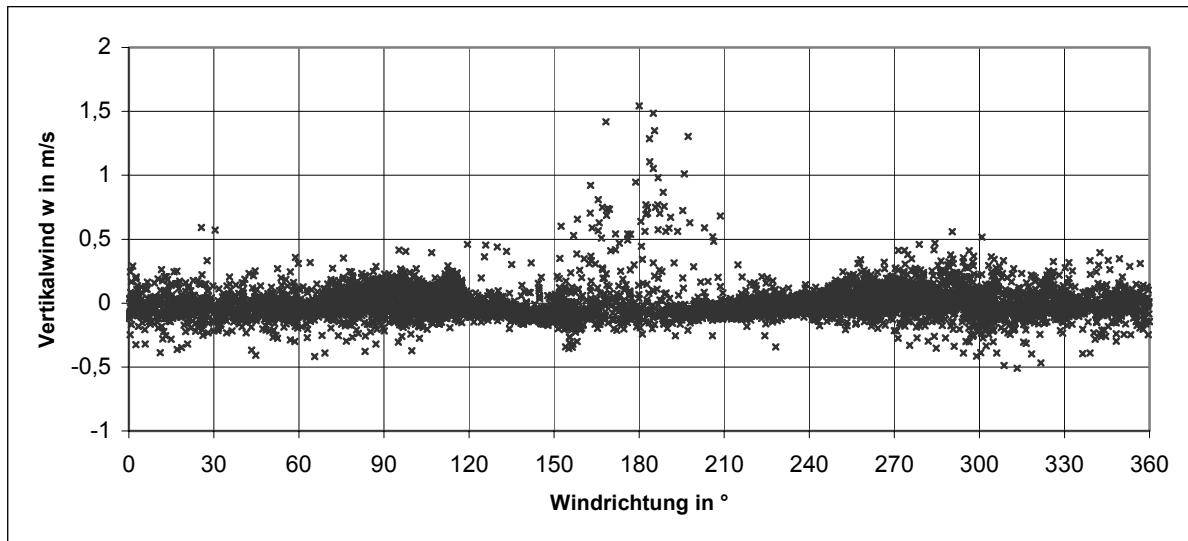


Abbildung 2.6 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung nach der Rotation unter Ausschluss der Daten aus der Anströmrichtung 120° - 240°

Bei der Anwendung der Rotation auf die Daten vom Fernsehturm wurde klar, dass die Rotation beim größeren Ausschlussbereich von 120° - 240° besser funktioniert (Abb. 2.6). Die Sinuskurven sind zwar in beiden Abbildungen kaum noch zu erkennen, die Rotation unter Ausschluss des größeren Bereichs ergibt jedoch verglichen mit der Rotation unter Ausschluss des Bereichs 150° - 210° eine deutlichere Glättung und eine Streuung des mittleren Vertikalwindes um null. Deswegen wurde der Bereich 120° - 240° Anströmrichtung für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

2.3.2 Vergleich der auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie und auf dem Fernsehturm gemessenen Windrichtungen

Um diese Entscheidung zu überprüfen, erfolgte zusätzlich ein Vergleich der auf dem Fernsehturm gemessenen Windrichtungen mit den im gleichen Zeitraum auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie gemessenen Windrichtungen. Für den Vergleich wurden die Datensätze synchronisiert. Im Diagramm in Abbildung 2.7 hebt sich die Störung im südlichen Anströmbereich wie schon bei Betrachtung des Vertikalwindes deutlich hervor. Der Bereich von 120° - 220° weist hier eine deutliche Störung auf. Die scheinbare Abweichung im Bereich Nord bis Nordost am Fernsehturm hat ihre Ursache in der Art der Darstellung. Die Richtungen 0° und 360° sind identisch. Der Quadrant am oberen linken Ende ist die Fortführung des Quadranten am unteren linken Ende.

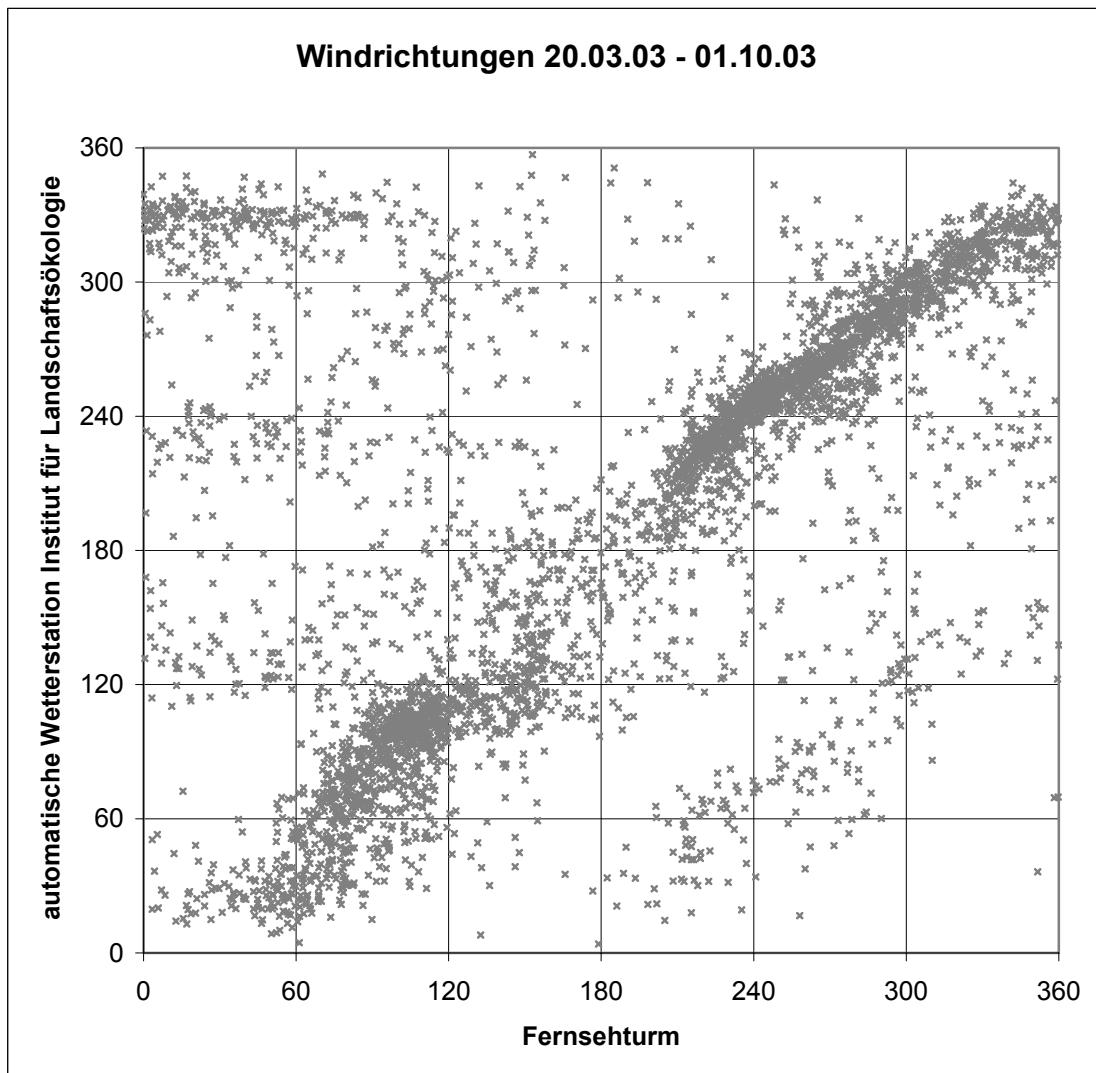


Abbildung 2.7 Die gemessenen Windrichtungen auf dem Fernsehturm im Verhältnis zu den Windrichtungen gemessen auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie

Aus der Grafik geht hervor, dass die Windrichtungsmessung in einem ähnlichen Bereich gestört ist, wie die Vertikalwindmessung. Dies rechtfertigt den Ausschluss der Daten aus dem Bereich 120° - 240° , der sich aus der Betrachtung des Vertikalwindes ergeben hat.

2.4 Das Footprintmodell

Mit der Footprintmethode werden die Quellflächen der gemessenen Flüsse bestimmt. Das hier verwendete Modell wurde von (Schmid und Oke, 1990) entworfen und von (Schmid, 1997) weiterentwickelt. Das Modell basiert auf der Annahme, dass sich gemäß der Taylor-Hypothese (Abb. 2.8) die Turbulenzelemente gerichtet bewegen und dabei ihre Eigenschaften nicht verändern (Stull, 1991). Messungen an einem bestimmten Ort bilden nicht die Verhältnisse unterhalb des Messgerätes ab, sondern die eines bestimmten Einzugsgebiet an der Luvseite. Diese Einflussfläche wird als Footprint bezeichnet. Die Funktion der Fläche kann als Quellgewichtsfunktion (engl. source weight function) bezeichnet werden (Schmid, 1994).

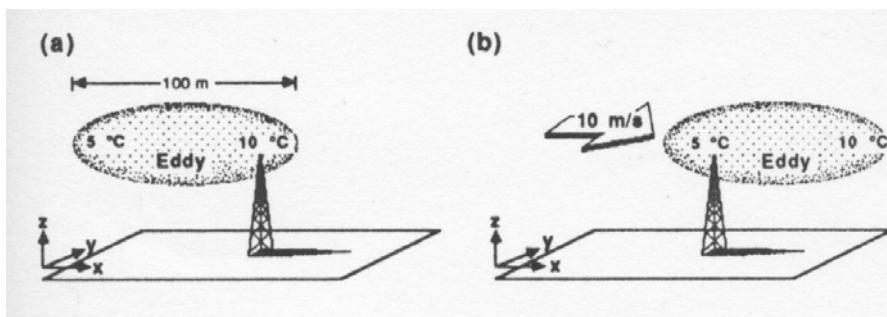


Abbildung 2.8 Taylor – Hypothese, ein Turbulenzelement mit Anfangstemperatur 10 °C und Endtemperatur von 5 °C passiert das Messgerät

Messungen an einem bestimmten Ort bilden nicht die Verhältnisse unterhalb des Messgerätes ab, sondern die eines bestimmten Einzugsgebiet an der Luvseite. Diese Einflussfläche wird als Footprint bezeichnet. Die Funktion der Fläche kann als Quellgewichtsfunktion (engl. source weight function) bezeichnet werden (Schmid, 1994). Die Footprintfunktion gibt an welchen Quellbereich eine Messgröße hinsichtlich ihrer räumlichen Wichtung und

Intensitätsverteilung hat. Mit der von (Schmid, 1997) entwickelten Software „FSAM“ (flux source area model) werden die Footprints berechnet.

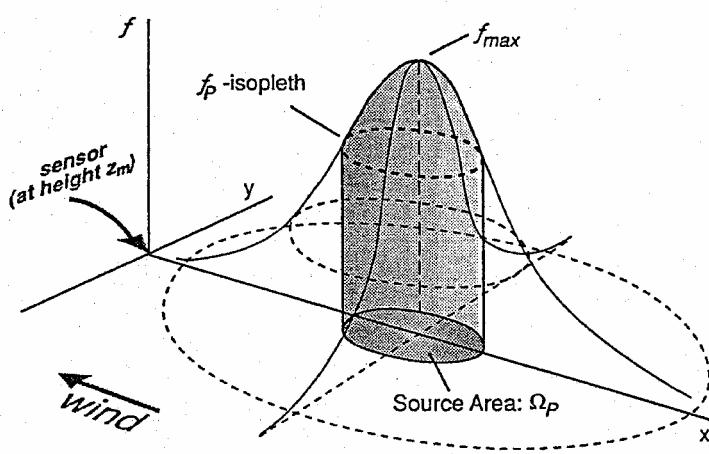
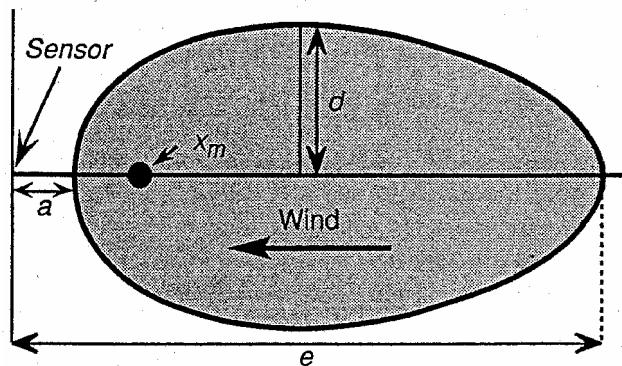


Abbildung 2.9 Quelldichtefunktion (Schmid, 1994)

Das Modell benötigt folgende Eingangsgrößen: die aerodynamische Messhöhe z_m , die Obuhkov - Länge L , die Rauhigkeitslänge z_0 , die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* , und die Standartabweichung der lateralen Windkomponente σv . Die Größen gehen dimensionslos als Ratios (z_m/z_0 , z_m/L , $\sigma v / u^*$) in das Modell ein. Aus den Parametern werden Quelldichte- und Quellgebietsfunktion berechnet. Aus der Quelldichtefunktion leiten sich die Quellgebietsfunktionen ab. Die Quellgebietsfunktion beschreibt die Fläche aus der ein bestimmter Anteil der Flüsse, die am Messpunkt bestimmt wurden, stammt. Die Abbildungen 2.8 und 2.9 machen die Zusammenhänge deutlich.

Ein bestimmtes Quellgebiet ist ein Querschnitt aus der Quelldichtefunktion. Die Grenzen für



die Eingangsgrößen sind in Tabelle 2.2 dargestellt (Schmid, 1994). Jede Messgröße hat ihren Einfluss auf das Ergebnis der Footprintberechnung.

Abbildung 2.10 Quellgebiet (Schmid, 1994)

In der Realität kommt es auf Grund der sich laufend ändernden turbulenten Strömung auf das Zusammenwirken der einzelnen Größen an (Mangold, 1999). Den größten Einfluss hat die aerodynamische Messhöhe. Je größer sie ist, je größer ist das Quellgebiet (Schmid, 1997).

Größe	Minimum	Maximum
z_m/z_0	20 (stabil)	500 (stabil)
	40 (labil)	1000 (labil)
z_m/L	-0,61	0,09
$\sigma v / u^*$	1,0	6,0

Tabelle 2.2 Grenzwerte der Eingangsgrößen des Footprintmodells

Größere Quellgebiete bedeuten einen geringeren Einfluss durch interne Grenzschichten. Interne Grenzschichten bilden sich auf Grund von Unterschieden in der Oberflächenbeschaffenheit. Deswegen sind die Flüsse im Bereich interner Grenzschichten heterogen. Mit ausreichender Distanz zum heterogenen Untergrund schieben sich die internen

Grenzschichten zusammen. Oberhalb davon wird ein einheitlicher flächengemittelter Fluss angenommen (Foken, 2003). Diese Höhe heißt „Blending-height“, weil die Eigenschaften der Oberfläche ab dieser Höhe ausgeblendet sind. Die Höhe liegt je nach Heterogenität der Oberfläche zwischen 30 und 100 m (Claussen und Walmsley, 1994). Bei der Auswertung der in 6,50 m Höhe bestimmten Turbulenzdaten aus den Rieselfeldern muss dies berücksichtigt werden.

Bis auf die Rauhigkeitslänge werden alle Parameter bei der Datenauswertung mit Dana ausgegeben. Die Rauhigkeitslänge wurde auf Basis der Annahme, dass die Schubspannung höhenkonstant ist und das Windgeschwindigkeitsprofil logarithmisch ist, bestimmt.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (\text{Formel 2.7}) \quad (\text{Foken, 2003})$$

Dabei ist u die Windgeschwindigkeit in der Höhe z , d die Verschiebungshöhe, u^* die Schubspannungsgeschwindigkeit, k die Karmankonstante und z_0 die Rauhigkeitslänge.

$$\text{Nach } z_0 \text{ umgestellt lautet die Formel: } z_0 = (z-d) \frac{k u^*}{u} \quad (\text{Formel 2.8})$$

3 Ergebnisse

3.1 Die Messungen am Fernsehturm

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Messkampagne auf der 130 m über Grund gelegenen Plattform des Fernsehturms Münster im Südwesten der Stadt dargestellt und erläutert. Es geht dabei darum, die am Fernsehturm herrschenden Bedingungen richtig zu interpretieren, um diese im Kapitel 3.2 mit den Daten aus den Rieselfeldern vergleichen zu können. Besonderes Augenmerk liegt auf den turbulenten Flüssen. Um mögliche Zusammenhänge zwischen Strahlung und Auftriebsstrom erkennen zu können, sind in einigen Diagrammen Strahlungsdaten der automatischen Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie mit eingearbeitet.

3.1.1 Die Charakteristik der Messdaten

Für die Bewertung des Fernsehturms als Standort zur Bestimmung des Turbulenzregimes wurden Messdaten vom 20.01.2003 bis zum 01.10.2003 herangezogen. In dieser Datenreihe gibt es aufgrund technischer Probleme mehrere große Datenlücken. Die Zeiträume, in denen die Messungen mindestens 1 Tag unterbrochen oder fehlerhaft waren, sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Anfang	Ende
10.04.2003 00:00	11.04.2003 00:00
03.05.2003 19:00	15.05.2003 13:30
11.06.2003 13:30	24.06.2003 10:30
20.07.2003 19:00	29.07.2003 15:00
10.09.2003 16:00	12.09.2003 17:30

Tabelle 3.1.: Zeiträume fehlender Messreihen

Die Ursachen für das Fehlen sind Systemabstürze durch Stromausfälle, die vermutlich Gewitter als Hauptursache hatten. Teilweise ist das System nach einem Absturz nicht mehr hochgefahren, teilweise wurde die Datenerfassung nach einem Absturz nicht richtig initialisiert, so dass keine Daten aufgezeichnet wurden. Die am Fernsehturm bestimmten Extremwerte für den gesamten Messzeitraum stehen in Tabelle 3.2. Besonders bemerkenswert sind der starke Wind am 01.04.03 und die extreme Hitze am 12.08.03. Der Wert 30,35 °C wirkt zwar niedrig, wenn man ihn zum Beispiel mit den 35,35 °C vom Dach des Instituts für Landschaftsökologie vergleicht, dies ist aber daraus zu erklären, dass der Messstandort am Fernsehturm höher liegt und daraus, dass dort die akustische Temperatur bestimmt wurde.

Parameter	Wert	Messintervall
u horizontal _{max} [m/s]	14,78	01.04.2003 18:00 - 18:30
T _{max} [°C]	30,35	12.08.2003 15:00 - 15:30
T _{min} [°C]	-5,05	07.04.2003 06:00 - 06:30
Impulsfluss _{max} [m ² /s ²]	0,44	01.04.2003 00:30 - 01:00
Auftriebsstrom _{max} [K·m/s]	0,38	31.08.2003 14:30 - 15:00
u* _{max} [m/s]	0,89	30.08.2003 14:00 - 14:30

Tabelle 3.2.: Extremwerte der 30 min – Mittel am Fernsehturm

3.1.2 Die Windrichtung

Die Häufigkeit der Windrichtungen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Aus dem vom Baukörper des Fernsehturms gestörten Anströmbereich kommen knapp über 30 % des Windes. Den größten Anteil an ungestörten Strömungen haben die Ost - und die Westsektoren. Das Stadtgebiet Münster liegt vor allen Dingen im Westen und Nordwesten des Turms. Messwerte aus diesen Richtungen sind für eine Beurteilung des Turbulenzregimes der Stadt besonders

bedeutend. Sie machen knapp 30 % der erhobenen Daten aus. Mit 2058 bestimmten Halbstundenintervallen ist die Stichprobe für die weiteren Betrachtungen ausreichend groß. Aus den anderen ungestörten Richtungen stehen insgesamt 2844 Halbstundenintervalle zu Verfügung.

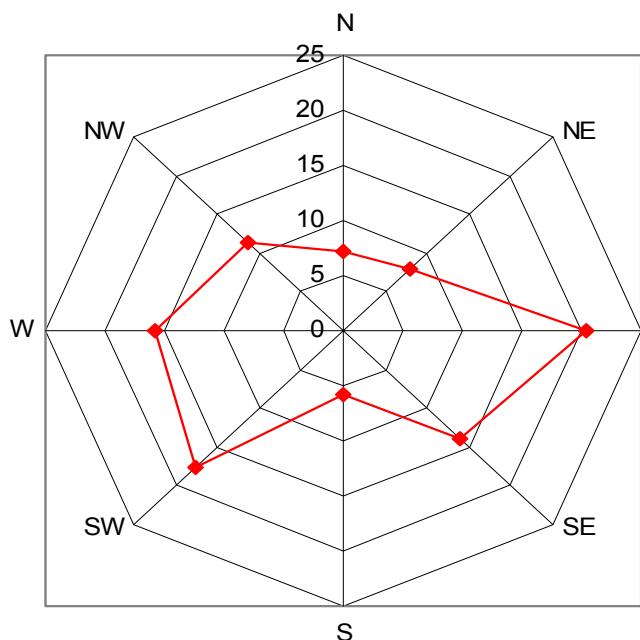


Abbildung 3.1 Häufigkeit der Windrichtungen am Fernsehturm

3.1.3 Die Schubspannungsgeschwindigkeit

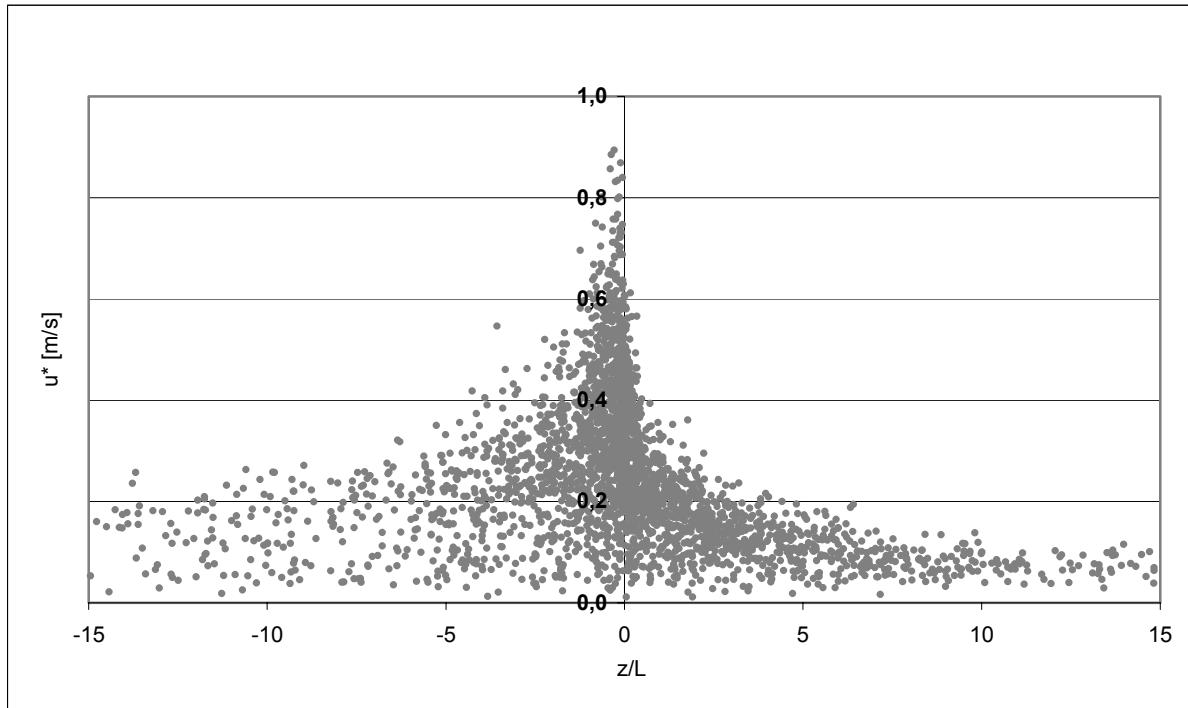


Abbildung 3.2 Die Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zum Stabilitätsparameter

Abbildung 3.2 zeigt, dass mit zunehmender Neutralität (Annäherung an $z/L = 0$) der Schichtung die Schubspannungsgeschwindigkeit wächst. Labile Schichtung ($z/L < 0$) begünstigt höhere Schubspannungen gegenüber stabiler Schichtung ($z/L > 0$).

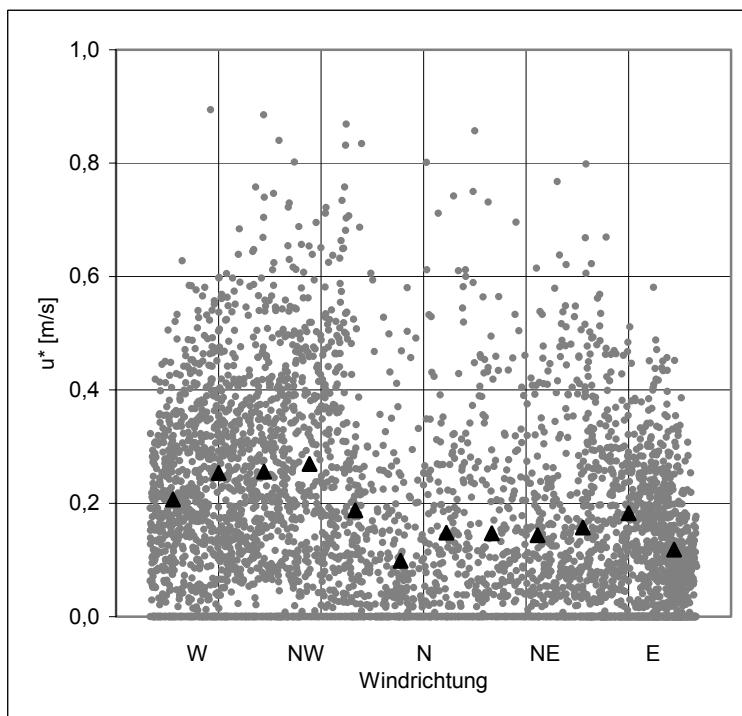


Abbildung 3.3 Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zur Windrichtung

In der Abbildung 3.3 wird die Schubspannungsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Windrichtung dargestellt. Die Dreiecke zeigen den Verlauf des Median der Schubspannungsgeschwindigkeit bezogen auf die dazu in Klassen eingeteilte Windrichtung. Eine Klasse umfasst 20° ($0-20^\circ$, $20^\circ-40^\circ$, etc.). In Relation zur Windrichtung weist die Schubspannung in West - und Nordwestrichtung ein Maximum auf und bei Winden aus nördlichen bis nordöstlichen Richtungen ist sie niedriger, wobei es bei Nordnordost wieder ein leichtes Maximum gibt. Eine mögliche Ursache für diesen Verlauf kann sein, dass der größte Teil der Stadt mit einer Oberfläche größerer Rauhigkeit im Westen und Nordwesten des Fernsehturms liegt.

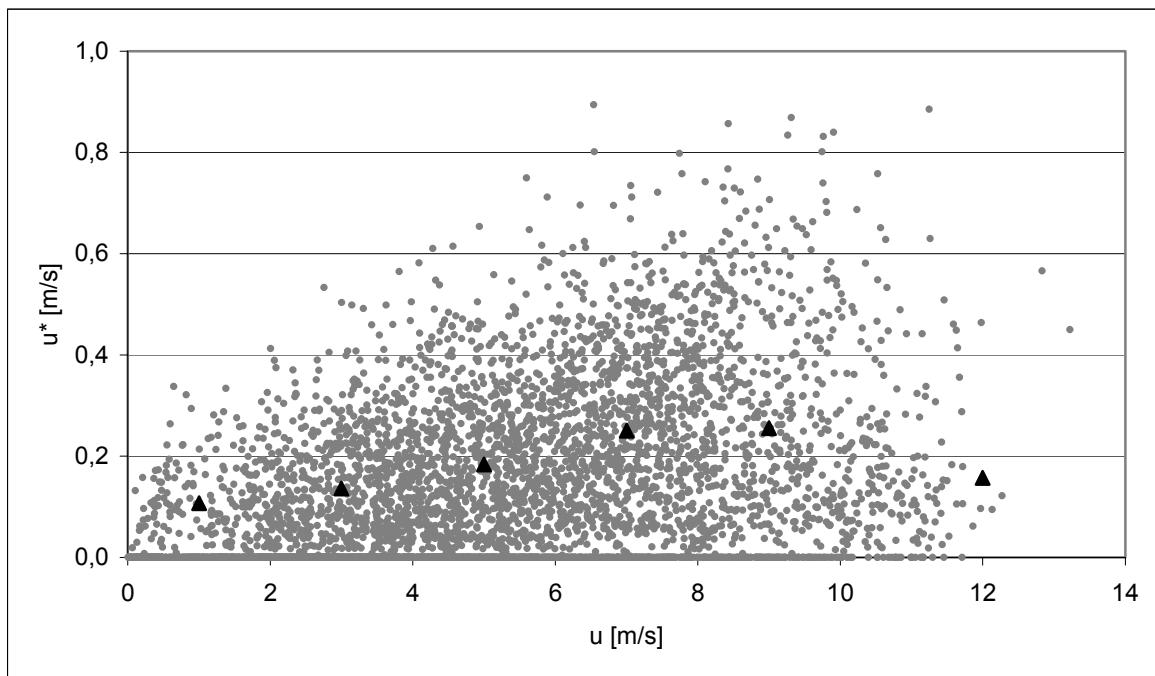


Abbildung 3.4 Die Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zur Windgeschwindigkeit

Die Schubspannungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Dreiecke zeigen den Median für die jeweilige Windgeschwindigkeitsklasse an. Es gibt folgende Klassen: $0 - 2 \text{ m/s}$, $2 - 4 \text{ m/s}$, $4 - 6 \text{ m/s}$, $6 - 8 \text{ m/s}$, $8 - 10 \text{ m/s}$, $>10 \text{ m/s}$. Der Verlauf der Medianwerte der Schubspannungsgeschwindigkeit bei zunehmender Geschwindigkeit des Horizontalwindes ist bis 10 m/s fast linear ansteigend. Im Bereich zwischen 6 und 10 m/s weist die Schubspannungsgeschwindigkeit die höchsten Werte auf. Bei Werten oberhalb 10 m/s werden die Werte geringer. Halbstundenmittel größer als 10 m/s sind generell seltener gemessen worden, deswegen ist die statistische Auswertung weniger repräsentativ.

3.1.4 Der Auftriebsstrom

Die Relation zwischen Auftriebsstrom und Strahlung ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Parallel zu den Turbulenzmessungen auf dem Fernsehturm wurde die kurzwellige Einstrahlung auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie gemessen. Für die statistische Auswertung wurde die kurzwellige Strahlung in Klassen mit einer Intervallbreite von 100 (<100, 100-200, ..., >800) eingeteilt. So bezieht sich der Median auf die jeweilige Klasse. Die Dreiecke zeigen seinen Verlauf. Mit zunehmender Strahlung steigt die Intensität des Auftriebstroms. Wie sich kurzwellige Einstrahlung und Auftriebsstrom im Verlauf mehrerer Tage verhalten, zeigen die Abbildungen 3.6 – 3.8.

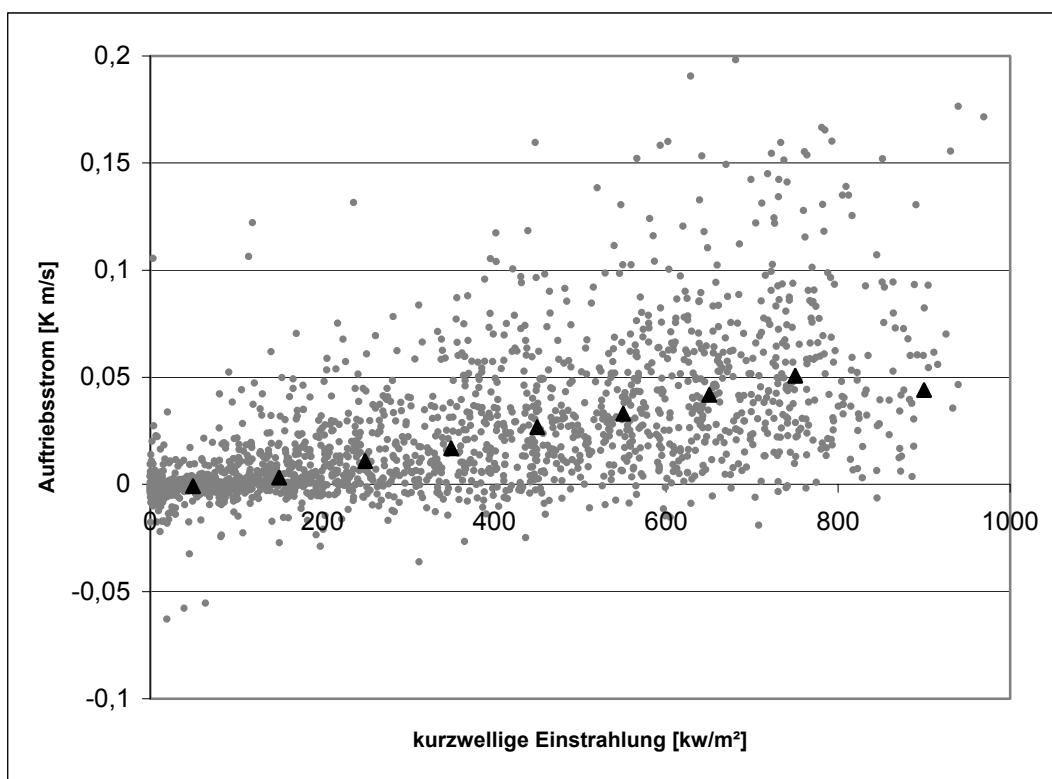


Abbildung 3.5 Der Auftriebsstrom im Verhältnis zur kurzweligen Einstrahlung

In der Zeit vom 03.04.03 bis zum 05.04.03 (Abb. 3.6) zeigen Strahlung und Auftriebsstrom einen parallelen Verlauf. Am Morgen beginnt mit der einsetzenden Sonneneinstrahlung ein turbulenter Auftriebsstrom. Am Abend bei Sonnenuntergang wird der Auftriebsstrom negativ. Es herrschten leicht labile bis neutrale Bedingungen vor. In Abbildung 3.7 ist ein ähnlicher Verlauf vom 04.08.03 bis zum 07.08.03 erkennbar. Die kurzfristigen Schwankungen des Auftriebsstroms sind jedoch größer und die kurzwellige Strahlung ist jahreszeitlich bedingt höher. Entsprechend höher ist auch der Auftriebsstrom. Vom 27.09.03 bis zum 29.09.03 war die Schichtung meistens stabil, nennenswerter Auftriebsstrom wurde kaum gemessen und am 27.09. und 29.09. war die Einstrahlung etwa so stark wie Anfang April (Abb. 3.8.)

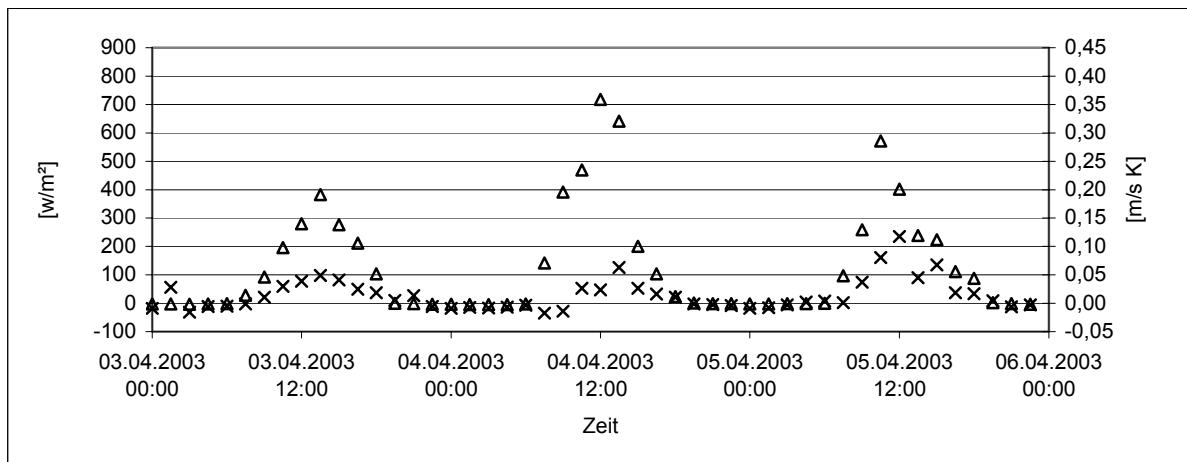


Abbildung 3.6 Turbulenter Auftriebsstrom (x) und kurzwellige Einstrahlung (Δ) 03.04. – 06.04.

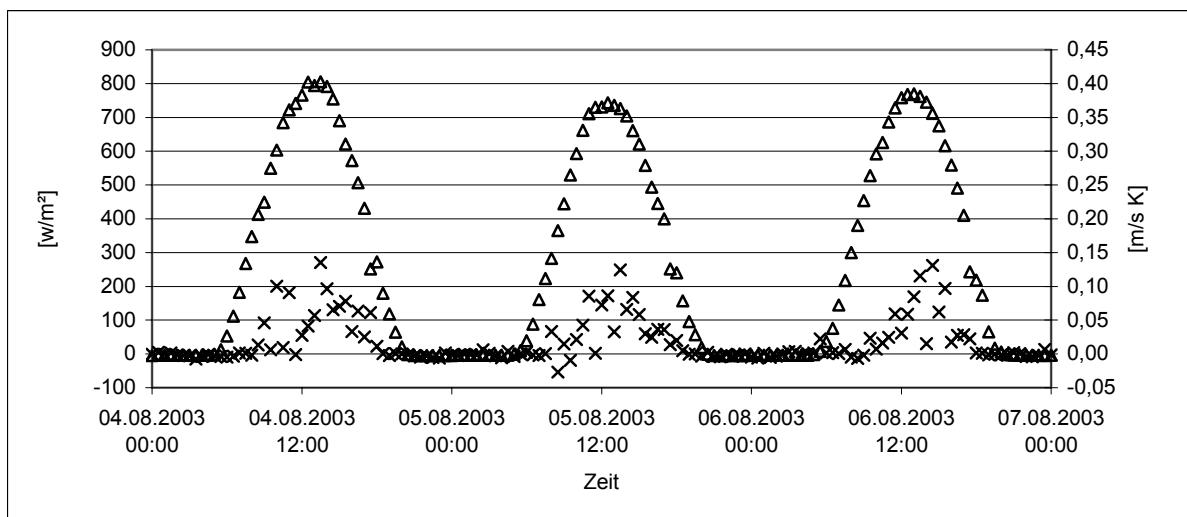


Abbildung 3.7 Turbulenter Auftriebsstrom (x) und kurzwellige Einstrahlung (Δ) 04.08. – 07.08.

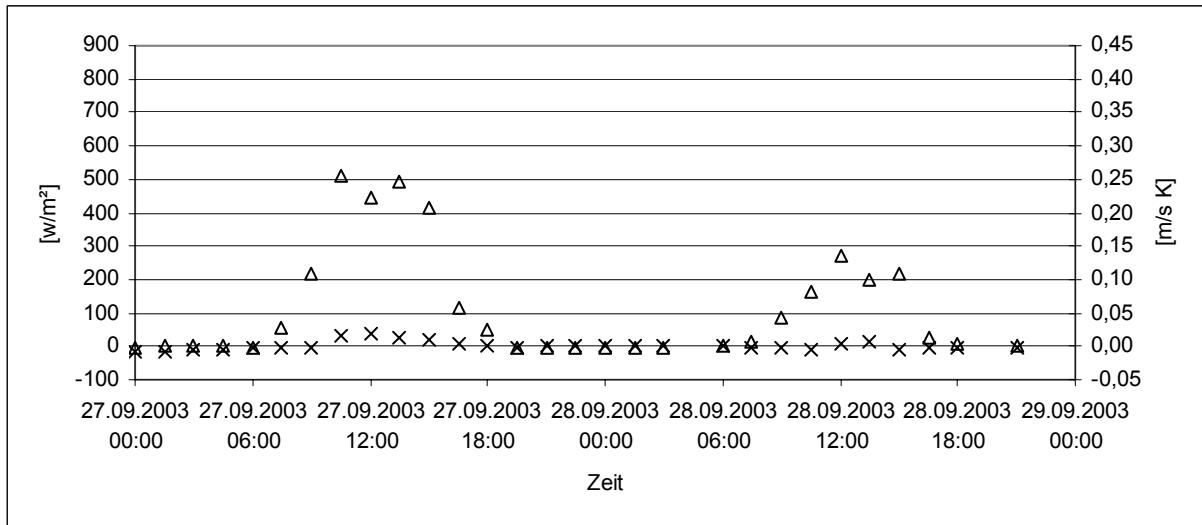


Abbildung 3.8 Turbulenter Auftriebsstrom und kurzwellige Einstrahlung 27.09. – 29.09.

3.2 Die Footprint – Analyse

Insgesamt gab es im Messzeitraum vom 20. März bis zum 1. Oktober 67 Datensätze, welche die Bedingungen für eine Footprint – Analyse erfüllten. Die meisten Datensätze mussten wegen ihrer Windrichtung oder auf Grund der nicht erfüllten Kriterien bezüglich z/L aussortiert werden. Außerdem ist eine Berechnung bei zu kleinen z_0 nicht mehr möglich. Die mittels FSAM berechneten Quellgebiete der Flüsse wurden hinsichtlich Lage, Ausdehnung und Fläche ausgewertet. Die Flächen aus denen 90 % der Flüsse kommen, haben eine Länge von etwa 3 – 7 km, bei einer maximalen Breite von ungefähr 1 – 3 km und einer Fläche von zirka 3 – 11 km². Ihr Anfang liegt zwischen 500 m und 1200 m vom Fuß des Fernsehturms entfernt. Die Quellgebiete aus denen 50 % der Flüsse kommen, haben ihren Anfang mit 650 m bis 1550 m Entfernung vom Turm weiter entfernt. Außerdem sind sie kleiner. Ihre Maße sind 1,3 – 3,4 km Länge, 0,5 – 1,4 km Breite und 0,6 – 2 km² Fläche. Die Formen der Ellipsen aller Quellflächen schwanken zwischen lang gestreckt und fast rund. Ersichtlich wird das aus dem Verhältnis zwischen Länge und Breite. Die Ellipsen sind etwa 1,5- bis 4,5-mal so lang wie breit. Bezuglich Größe und Form ist keine spezifische Verteilung auf die Windrichtungen zu erkennen. Alle Formen und Größen tauchen in jeder Windrichtung auf. Auffällig ist, dass es häufiger Westwinde mit Bedingungen, die eine Footprint – Analyse ermöglichen, viel häufiger gab als Ostwinde. Abbildung 3.9 stellt das und die Verteilung der Größe der 50 % - Quellgebiete auf die Windrichtungen dar. Die Kreise geben den Median an. Zu dessen Darstellung wurde die Windrichtung in Klassen zu 20 ° eingeteilt und der Medianwert für jede Klasse errechnet.

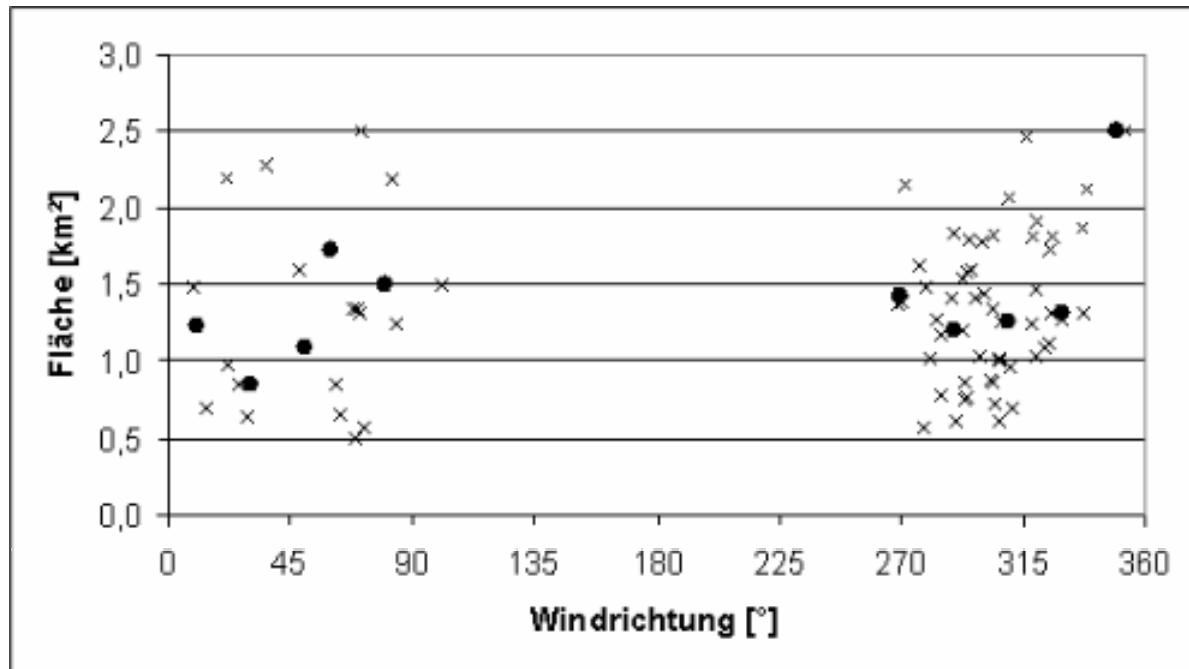


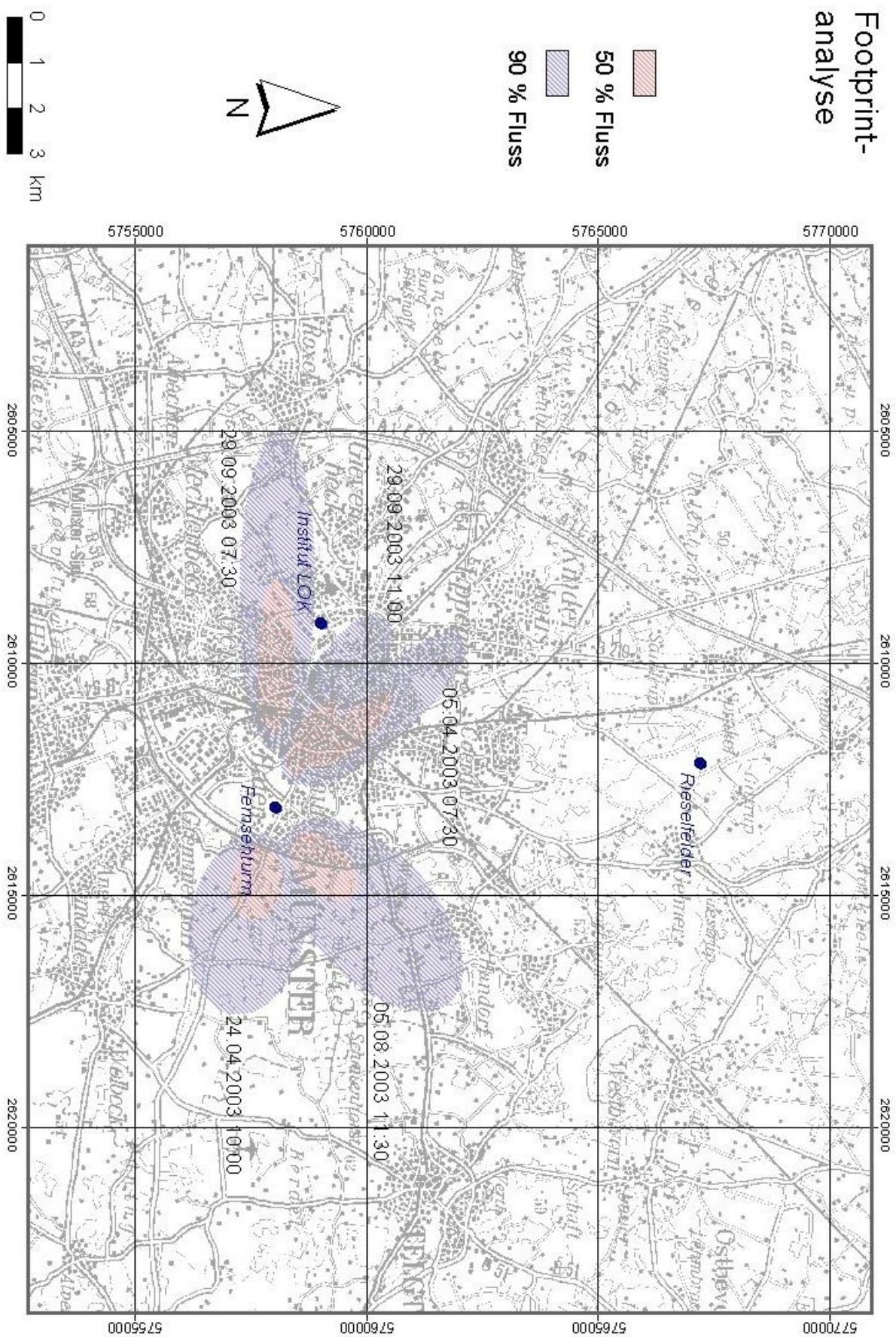
Abbildung 3.9 Der Flächeninhalt der Footprints aus denen 50 % der Flüsse stammen

Die Karte auf Seite 32 zeigt einen Teil der berechneten Footprints. Aus den abgebildeten Footprints geht hervor, dass die Quellflächen zum größten Teil im Stadtgebiet von Münster liegen. Es soll dargestellt werden, welchen Bereich man mit Footprint – Analysen vom Fernsehturm aus erfassen kann. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messungen vom Tag stammen, weil wahrscheinlich die Bodenschicht in der Nacht nicht so mächtig ist, dass sie bis in 130 m Höhe reicht. Die Bedingungen für eine Footprint – Analyse wurden abends und morgens erfüllt. Unter den dargestellten Footprints sind die, die westlich des Fernsehturms liegen länglich, während die östlich des Turmes runder sind. Die Entfernung zum Fernsehturm ist am 5.4. 7:30 Uhr und am 29.9. 7:30 Uhr mit etwa 1 km größer als für die übrigen Footprints, die ungefähr 0,6 km entfernt sind. Um bewerten zu können ob die dargestellten Footprints Bodenflüsse wiedergeben, sind in Tabelle 3.3 die Flussdaten, sowie Strahlung und Stabilität aufgeführt.

Datum, Uhrzeit	z/L	Strahlung w/m²	Schubspannungsgeschw. m/s	Auftriebsstrom K m/s
05.04. 07:30 Uhr	-0,012	96,67	0,510	0,001
24.04. 10:00 Uhr	-0,045	542	0,193	0,0230
05.08. 11:30 Uhr	-0,027	730	0,410	0,072
29.09. 07:30 Uhr	0,087	2,47	0,311	-0,002
29.09. 11:00 Uhr	-0,030	89,2	0,558	0,005

Tabelle 3.3 Flussrelevante Daten der Footprints

Footprint
analyse



3.3 Vergleich der meteorologischen Daten vom Fernsehturm mit entsprechenden Daten aus den Rieselfeldern

Um herauszufinden wie sich das Turbulenzregime am Fernsehturm in 130 m über Grund gegenüber dem Bodenregime verhält, werden Vergleichsmessungen aus 6,50 m über Grund aus den Rieselfeldern für die Auswertung herangezogen. Es soll herausgefunden werden welche Zusammenhänge zwischen den an den jeweiligen Standorten gemessenen Flüssen von Wärme und Impuls bestehen. Ferner soll sich herausstellen, unter welchen Bedingungen betreffend Schichtung, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und kurzwelliger Sonneneinstrahlung sich der Messstandort auf dem Fernsehturm im unteren Teil der Mischungsschicht dem „constant flux layer“ (Oke, 1987) der atmosphärischen Grenzschicht befindet.

Die Messkampagne in den Rieselfeldern fand vom 15.05.03 bis zum 18.06.03 statt. In deren Verlauf gab es, wie auf dem Fernsehturm, Unterbrechungen der Messungen. Technisch bedingt und weil die beiden Messreihen aus verschiedenen Anlässen angefertigt wurden, sind die Ausfälle nicht synchron. Für den Vergleich addieren sich dadurch einige Datenlücken. Abgesehen von vereinzelten nicht auswertbaren Datensätzen der Fernsehturmmessungen gibt es zwei größere Datenlücken. In der Zeit vom 25.05.03 bis zum 29.05.03, da in dem Zeitraum die Messungen in den Rieselfeldern ausgefallen waren und vom 10.06.03 bis zum 18.06.03, weil die Messungen am Fernsehturm unterbrochen waren.

3.3.1 Die Windrichtung und – Geschwindigkeit

Die Basis für einen möglichen Zusammenhang zwischen Bodenturbulenzregime und Turbulenzregime am Fernsehturm bilden ähnliche Windverhältnisse. In Abbildung 3.10 sind die bestimmten Windrichtungen für die 30 min- Intervalle am Fernsehturm denen aus den Messungen in den Rieselfeldern gegenübergestellt.

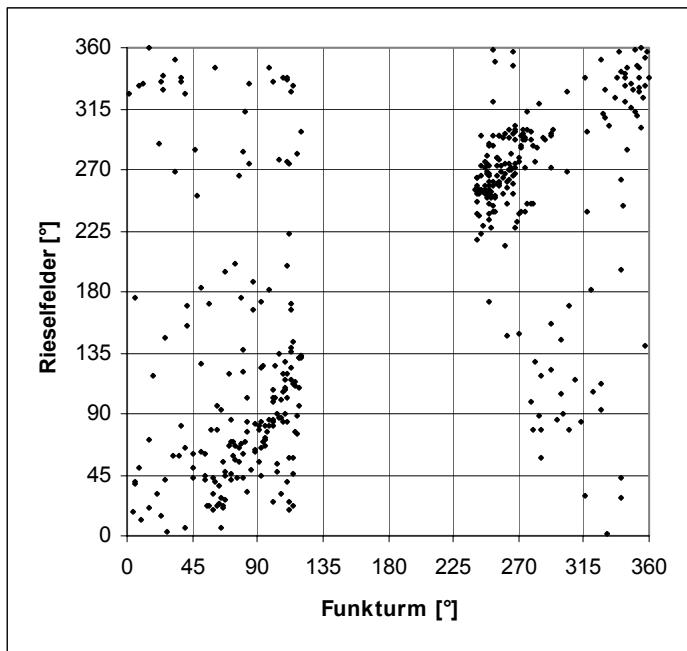


Abbildung 3.10 Das Verhältnis der Windrichtungen am Fernsehturm und in den Rieselfeldern

Es ist ein deutlicher Zusammenhang zu erkennen. Die Windrichtungen in den Rieselfeldern entsprechen denen vom Fernsehturm weitestgehend, auch wenn es eine sichtbare Streuung gibt. Der Korrelationskoeffizient hat den Wert 0,59. Im Bereich von 120°- 240° existieren auf Grund der aussortierten Fernsehturmdaten keine Werte.

Das in Abbildung 3.10 dargestellte Verhältnis der Windgeschwindigkeiten zeigt ebenfalls einen Zusammenhang (Korrelationskoeffizient 0,58), aber die Messungen am Fernsehturm weisen systematisch höhere Windgeschwindigkeiten auf. Die eingezeichnete Regressionsgerade verdeutlicht dies.

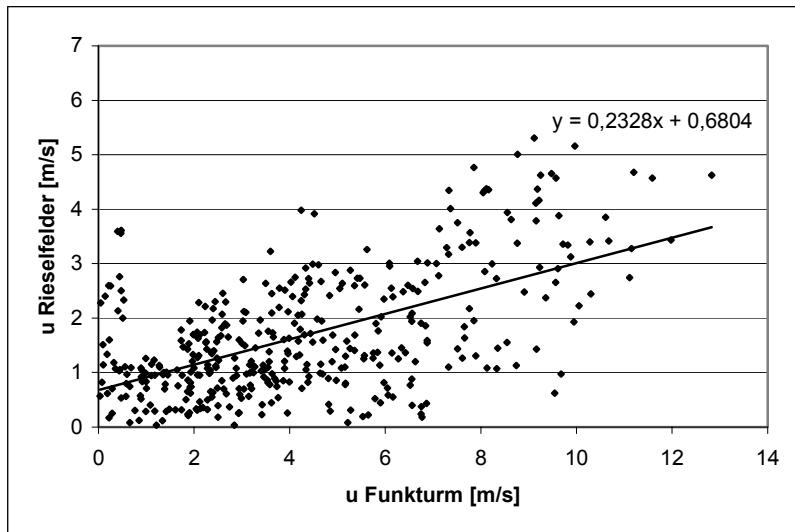


Abbildung 3.11 Das Verhältnis zwischen den Windgeschwindigkeiten am Fernsehturm und in den Rieselfeldern

Damit mögliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern erkannt werden können, werden die Messungen zweier Tage herausgegriffen, von denen dann alle Werte verglichen werden. Das betrifft den 31.05.03 und den 09.06.03, weil sich hier beim Überblick über den gesamten Zeitraum typische Unterschiede abzeichneten. In den Abbildungen 3.12 und 3.13 ist der Verlauf der Windrichtung und in den Abbildungen 3.14 und 3.15 der Verlauf der Windgeschwindigkeit dargestellt.

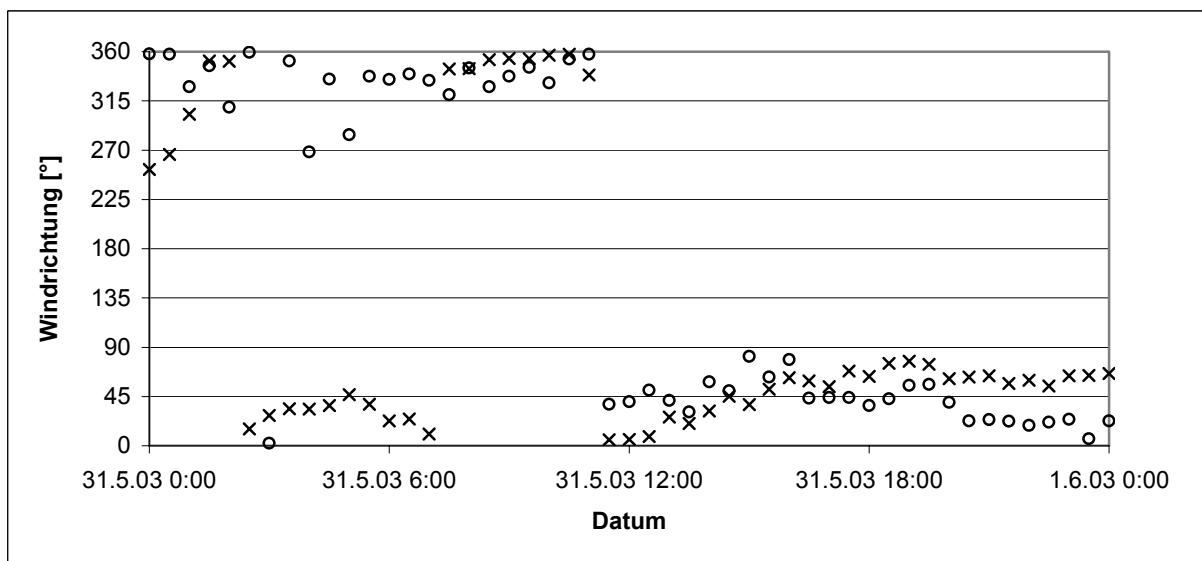


Abbildung 3.12 Verlauf der Windrichtung am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

Am 31. Mai herrschten nördliche Winde vor, die im Tagesverlauf von Nordwest nach Nordost drehten. Am 9. Juni gab es bis zum Abend überwiegend Westwind. Danach drehte der Wind über Nord bis auf Südost.

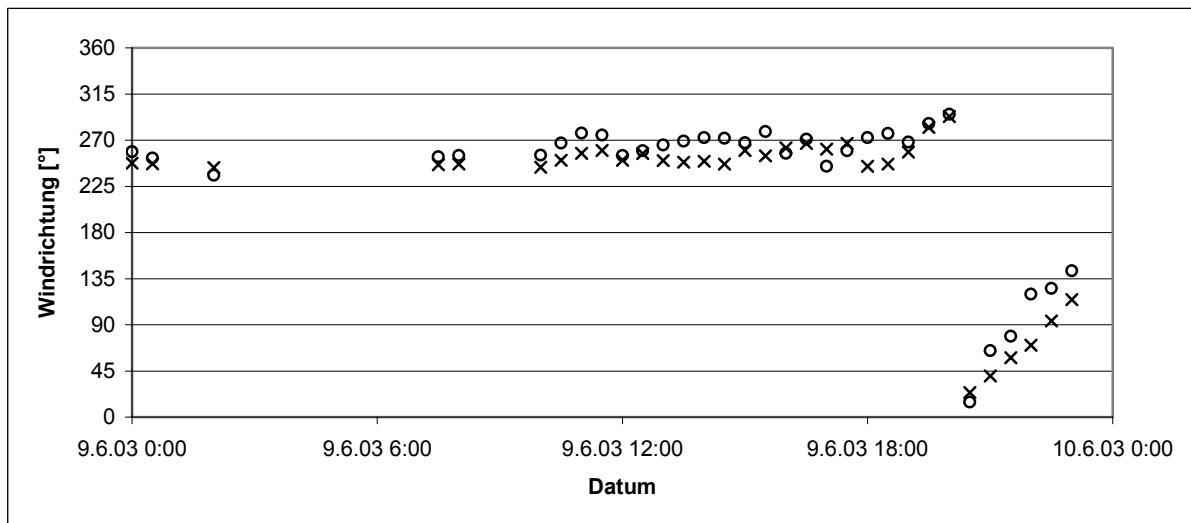


Abbildung 3.13 Verlauf der Windrichtung am 09.06.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

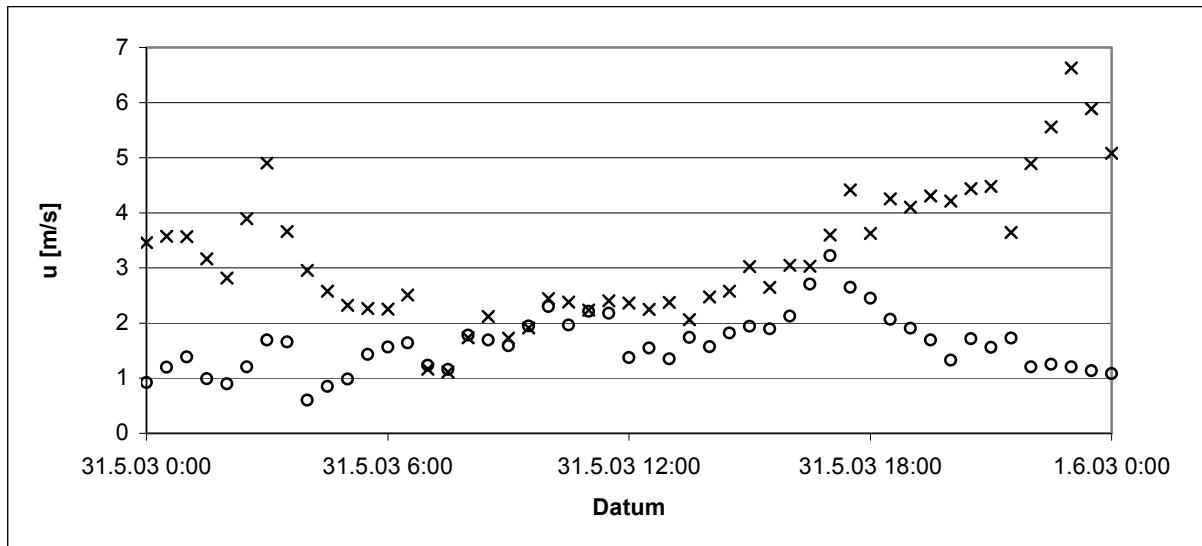


Abbildung 3.14 Verlauf der Windgeschwindigkeit am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

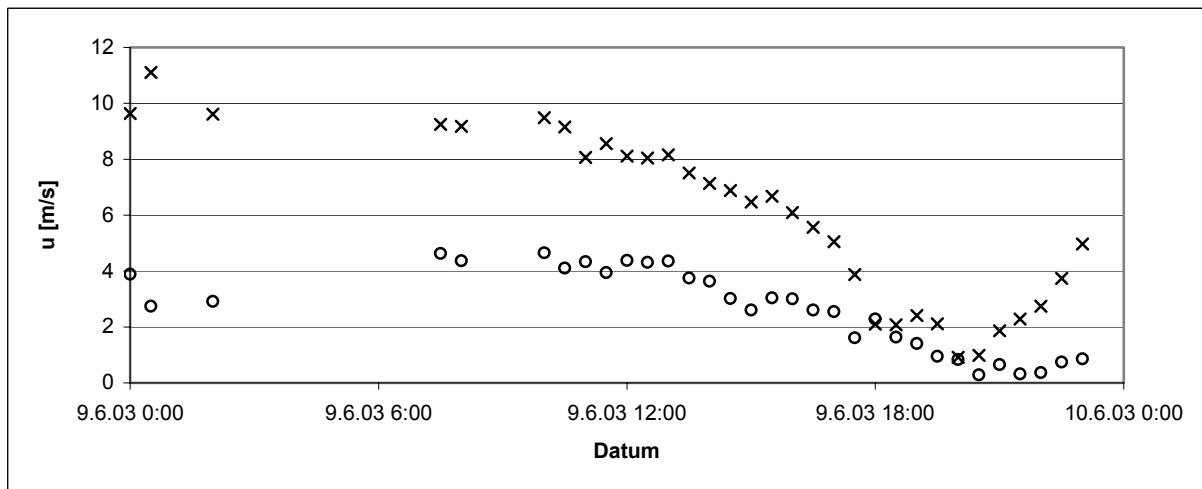


Abbildung 3.15 Verlauf der Windgeschwindigkeit am 09.06.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

Generell ist die Windgeschwindigkeit am 09.06.03 höher. Außerdem ist die Differenz zwischen beiden Standorten bis zum Abend größer. Am Ende des 31. Mai wächst der Unterschied zwischen den Werten der Rieselfelder und denen des Fernsehturms. Am frühen Abend des 9. Juni nähern sich die Werte beider Standorte zunächst an. Später steigt die Differenz wieder.

3.3.2 Die Stabilität

Der Stabilitätsparameter (Abb. 3.16 und 3.17) schwankt vor allen Dingen am Fernsehturm sehr stark. In den Rieselfeldern ergaben die Messungen im Zeitraum vom 15. Mai bis zum 10. Juni eine deutlich geringere Amplitude und Streuung. Aus diesem Grund werden bei der Darstellung extreme Werte für den Stabilitätsparameter nicht berücksichtigt. Dies betrifft ausschließlich Werte vom Fernsehturm und bedeutet, dass am 31. Mai neun 30 min- Intervalle fehlen und am 9. Juni eines. Die Abbildungen 3.15 und 3.16 zeigen, dass die Schichtung an beiden Tagen tagsüber mit Werten von 0 oder knapp unter 0 neutral bis labil ist, während sie zwischen 18 Uhr und 6 Uhr mit Werten über 0 stabil ist. Eine Ausnahme bilden einige wenige Werte am Abend des 9. Juni, wo es ins Negative abweichende Werte gibt.

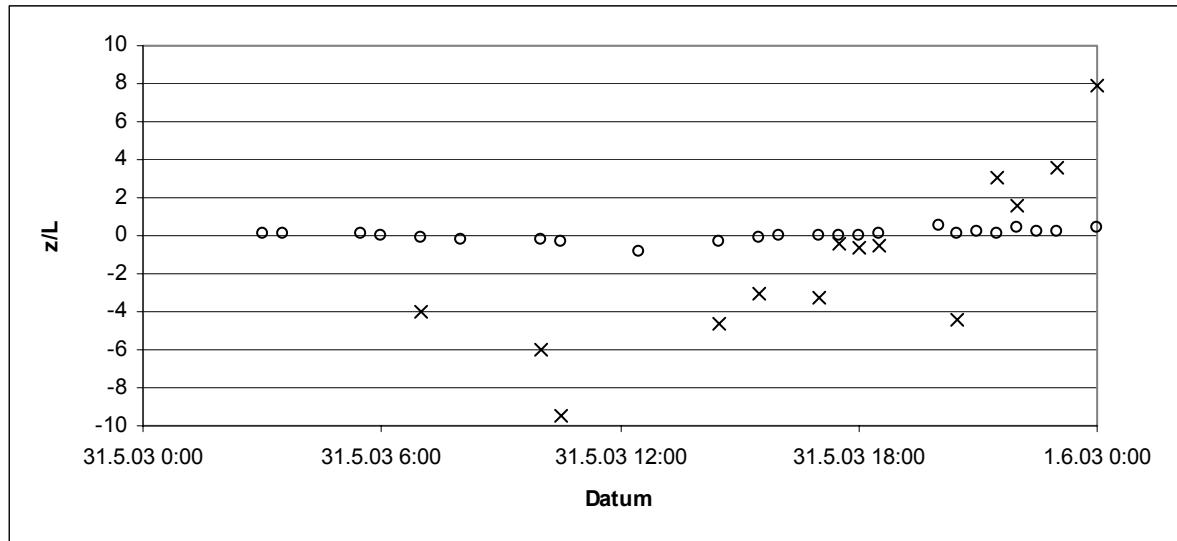


Abbildung 3.16 Verlauf des Stabilitätsparameters am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

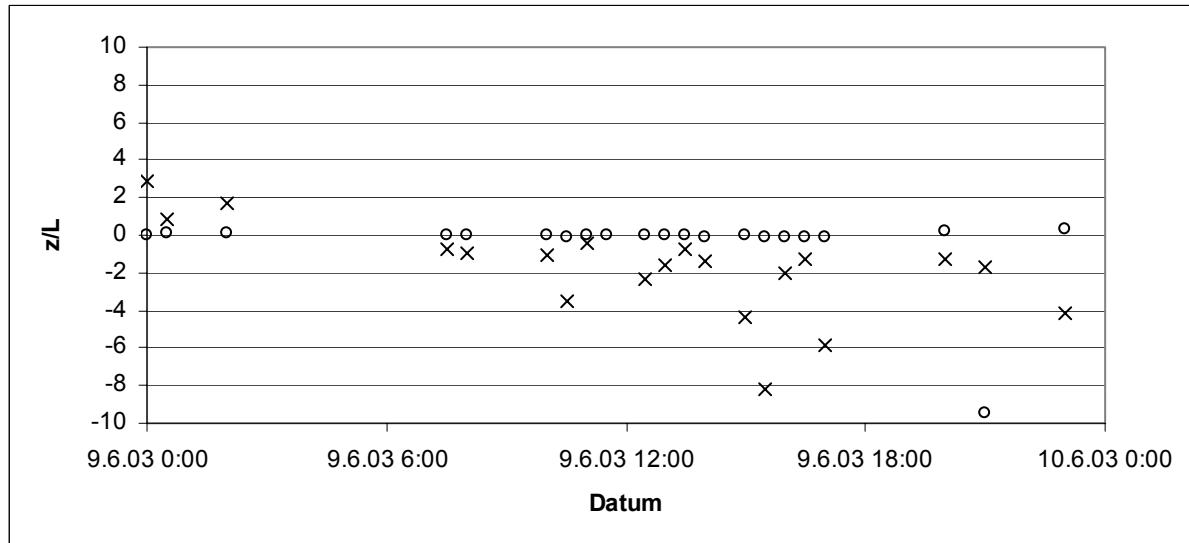


Abbildung 3.17 Verlauf des Stabilitätsparameters am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

3.3.3 Die Schubspannungsgeschwindigkeit

Weit geringere Schwankungen weisen die Werte für die Schubspannungsgeschwindigkeit, welche ein Maß für den Impulstransport ist, auf. Sie reicht am Fernsehturm von 0,016 m/s bis 0,598 m/s und in den Rieselfeldern von 0,010 m/s bis 0,709 m/s. Die Abbildung 3.18 zeigt, dass in den Rieselfeldern meist höhere Schubspannungsgeschwindigkeiten herrschten. Die Regressionsgerade hat eine Steigung von rund 0,89 und der Schnittpunkt mit y-Achse liegt bei 0,073. Das bedeutet, dass bei niedrigeren Schubspannungsgeschwindigkeiten, die Werte in den Rieselfeldern höher sind. Dieser Unterschied nimmt mit höher werdenden Schubspannungsgeschwindigkeiten ab. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,71.

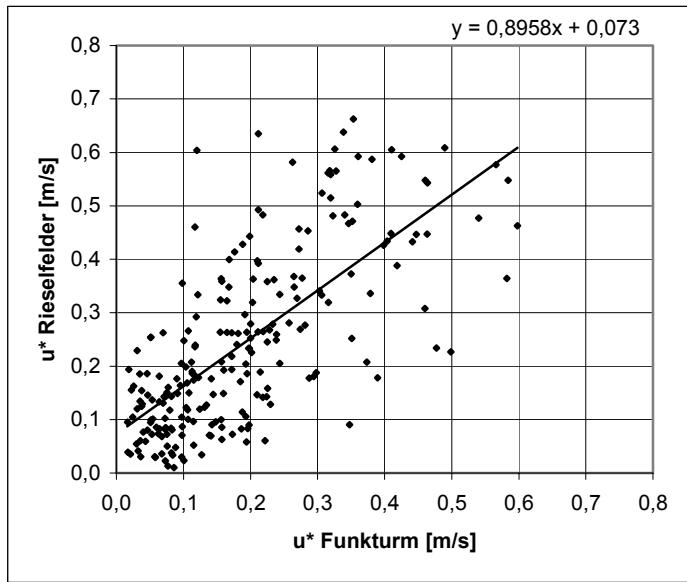


Abbildung 3.18 Das Verhältnis zwischen den Schubspannungsgeschwindigkeiten am Fernsehturm

Im gesamten Verlauf zeigt sich, dass es Tage mit größerem Unterschied zwischen den Werten vom Fernsehturm und aus den Rieselfeldern, und Tage mit geringerem Unterschied gibt. Am 31.05.05 (Abb. 3.16) ist die Differenz zwischen den Werten aus den Rieselfeldern und den Werten vom Fernsehturm relativ gering. Insgesamt ist die Schubspannungsgeschwindigkeit und damit die Intensität des Impulsflusses in den Rieselfeldern meistens etwas höher.

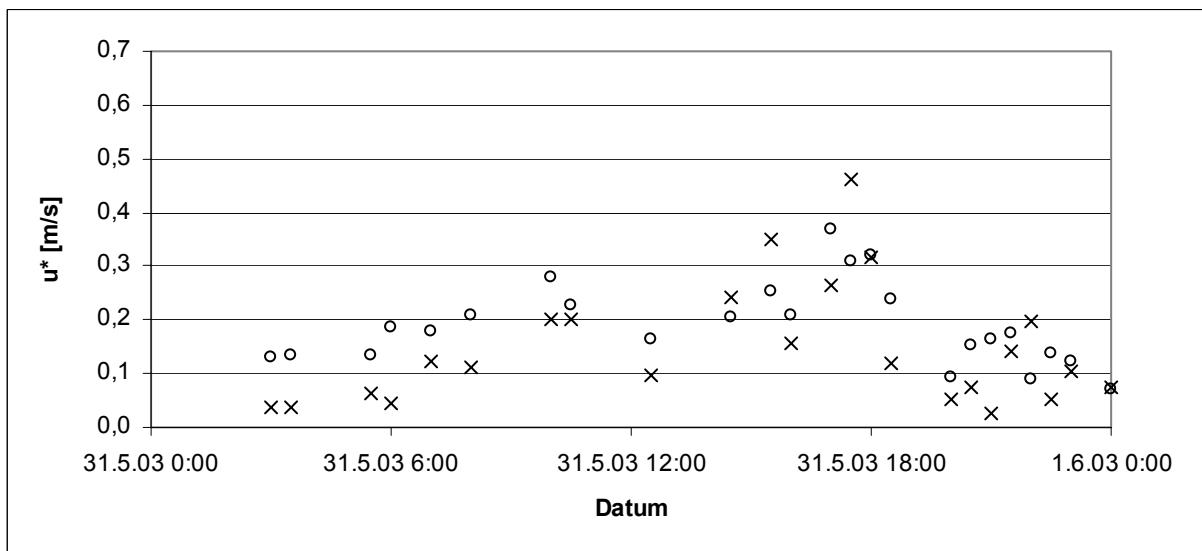


Abbildung 3.19 Verlauf der Schubspannungsgeschwindigkeit am 09.06.2003; o Rieselfelder, x Fernsehturm

Der 09.06.03 (Abbildung 3.20) ist ein Beispiel für unterschiedlichen Impulstransport. Am Abend verringert sich an beiden Standorten die Schubspannungsgeschwindigkeit und Differenz zwischen den Werten beider Standorte ebenfalls.

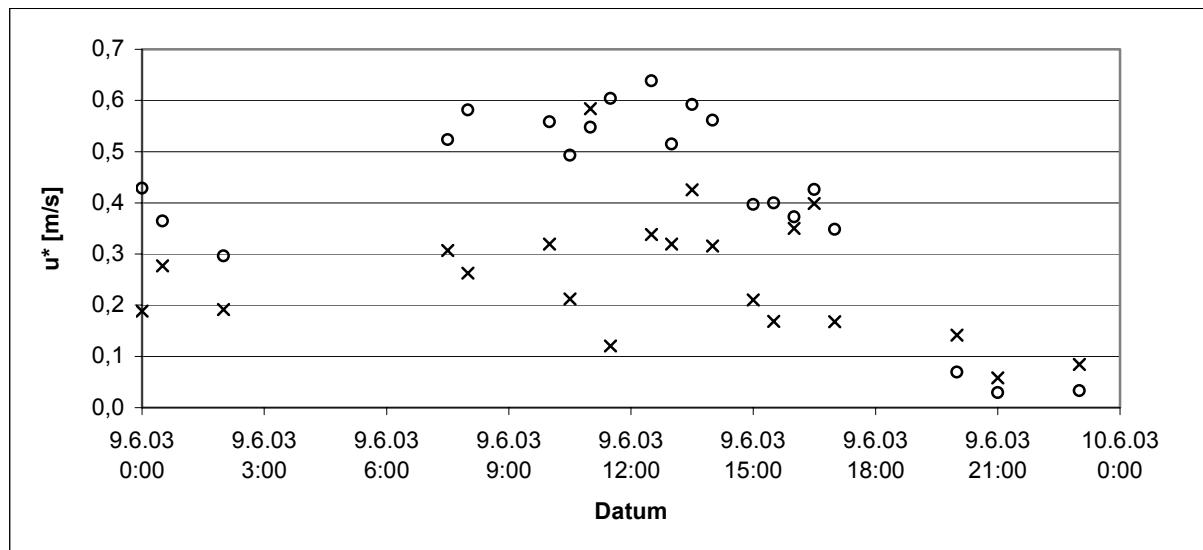


Abbildung 3.20 Verlauf der Schubspannungsgeschwindigkeit am 09.06.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

3.3.4 Der Auftriebstrom

Setzt man die an den beiden Standorten für den Auftriebsstrom gemessenen Werte ins Verhältnis (Abb. 3.21), wird deutlich, dass in den Rieselfeldern häufig höhere Werte gemessen werden. Die berechnete Regressionsgerade hat eine Steigung von etwa 1,14. Aufgrund des sich bietenden Bildes und eines Korrelationskoeffizienten von 0,55 liegt ein Zusammenhang sehr nahe.

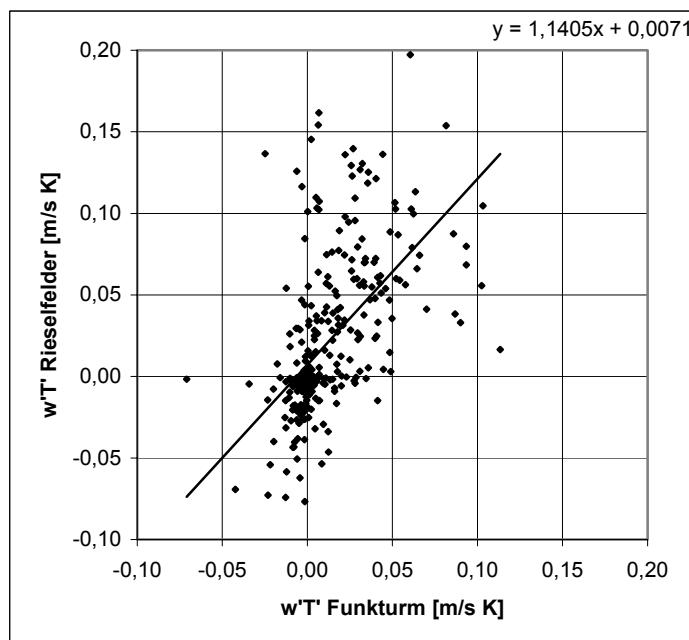


Abbildung 3.21 Das Verhältnis des Auftriebsstroms in den Rieselfeldern zum Auftriebsstrom am Fernsehturm vom 15.05.03 - 09.06.03

Im Vergleich der beiden Tage 31. Mai (Abb. 3.22) und 9. Juni (Abb. 3.23) sind die Werte von Fernsehturm und Rieselfeldern am 31. Mai ähnlich und am 9. Juni unterschiedlich. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Werte für den Auftriebsstrom in den Rieselfeldern am 9. Juni deutlich höher sind als am 31. Mai. Die Fernsehturmdaten unterscheiden sich an beiden Tagen weniger, auch wenn die Werte am 9. Juni etwas niedriger sind.

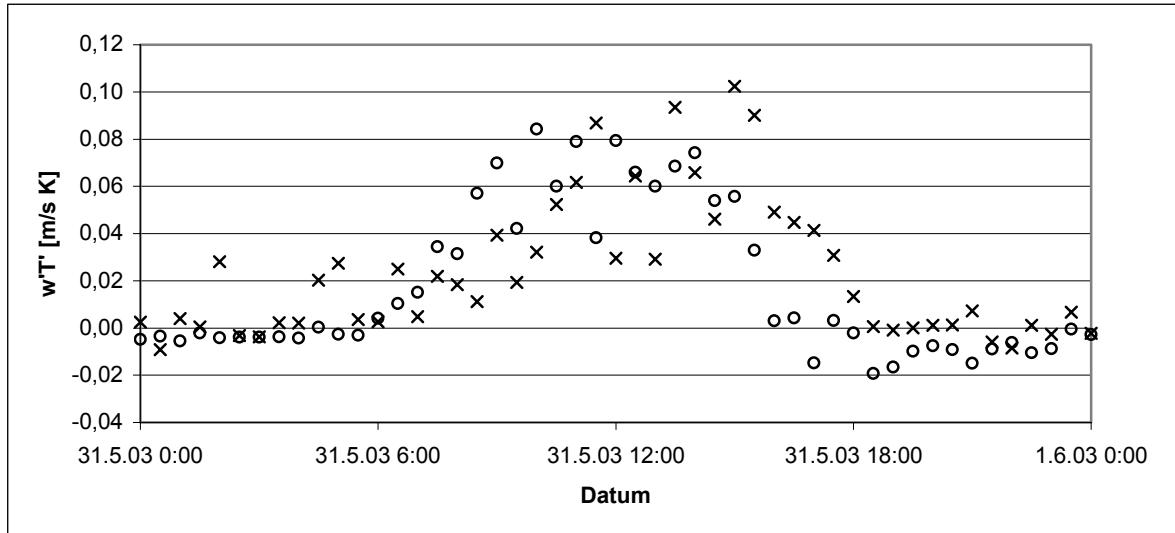


Abbildung 3.22 Verlauf des Auftriebstroms am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

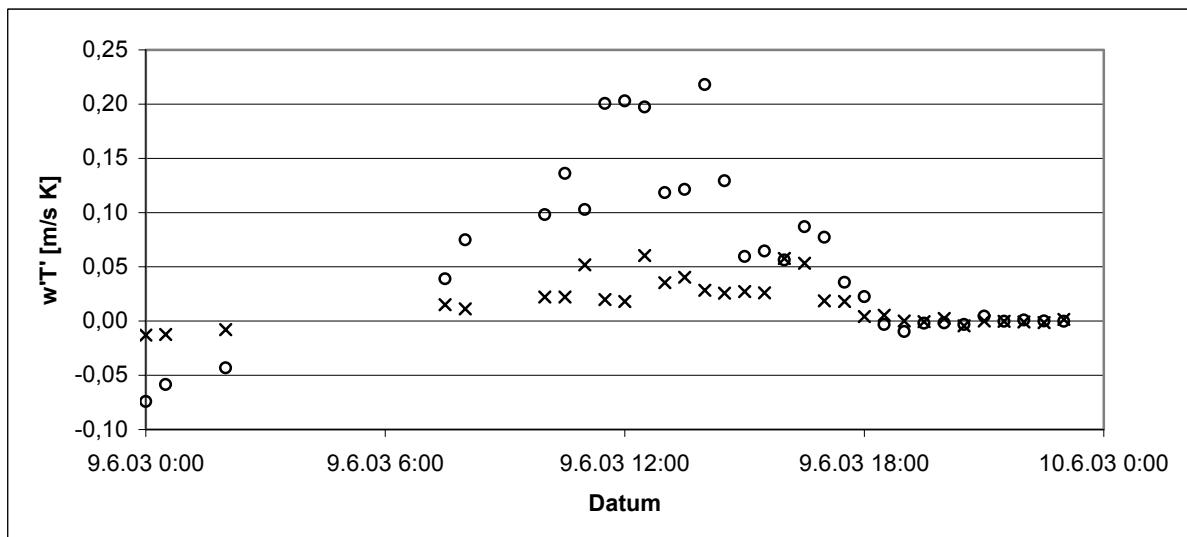


Abbildung 3.23 Verlauf des Auftriebstroms am 09.06.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

3.3.5 Temperatur und Strahlung

Zur weiteren Bewertung der bestimmten Flussparameter werden im Folgenden Temperatur und Strahlung der beiden herausgegriffenen Tage dargestellt und erläutert. Bei der Temperatur handelt es sich um die vom Ultraschallanemometer gemessene akustische Temperatur. Am 31. Mai (Abb. 3.24) weisen Strahlung und Temperatur den typischen Tagesgang mit wenigen Unregelmäßigkeiten auf. Die kurzwellige Einstrahlung weicht durch

leichte Schwankungen vom regelmäßigen Verlauf der Einstrahlung, der sich durch den Einstrahlungswinkel der Sonne ergibt, ab. Das liegt vermutlich an unterschiedlicher Bewölkung. Gegen Mittag ist die kurzwellige Einstrahlung mit fast 850 W/m^2 am höchsten und die Temperatur ist es gegen Nachmittag. Die beiden Temperaturkurven verlaufen relativ parallel, mit einem etwas größeren Abstand am Tage und etwas geringerem Abstand in der Nacht.

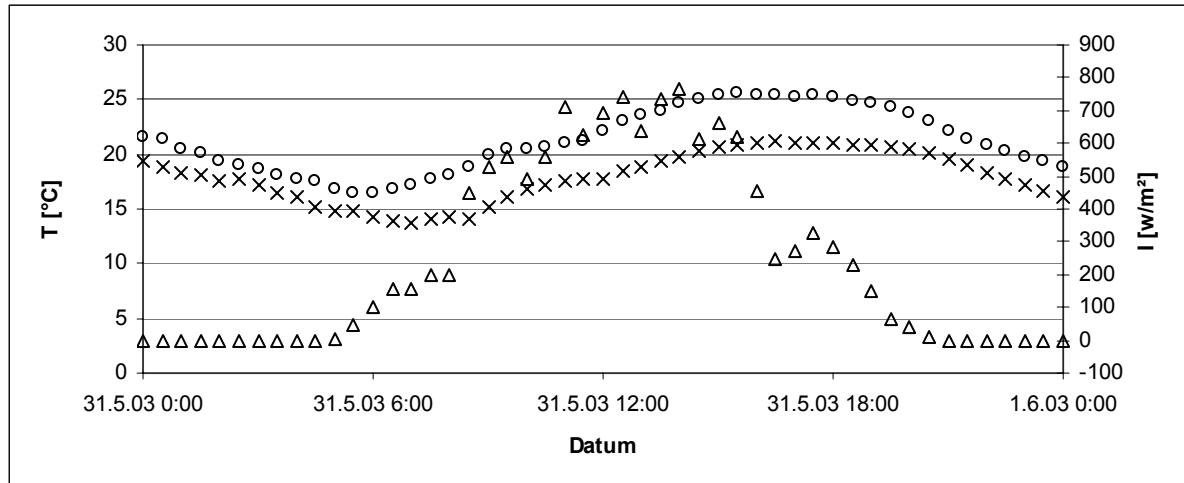


Abbildung 3.24 Verlauf von Temperatur und Strahlung am 31.05.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

Am 9. Juni verlaufen die Temperaturkurven bis zum Abend ähnlich synchron parallel. Ihr Abstand am Tage ist größer als am 31. Mai und gegen Abend nähern sich die Kurven fast bis zur Kongruenz an. Der Strahlungsverlauf ist unregelmäßiger als am 31. Mai. Es werden aber mit fast 950 W/m^2 höhere Werte für die kurzwellige Einstrahlung erreicht. Die Temperaturkurven verlaufen am 9. Juni um etwa 5 K niedriger.

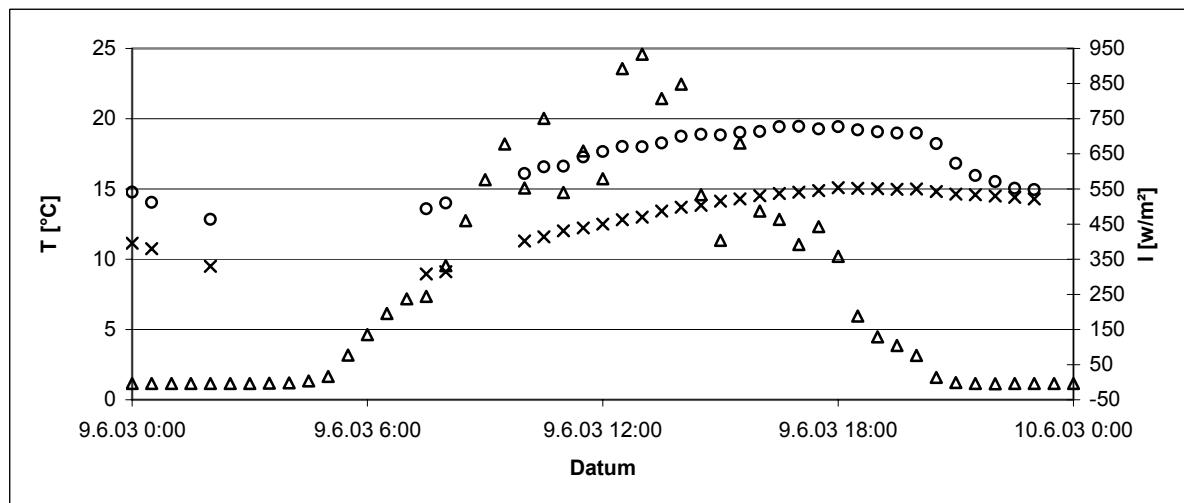


Abbildung 3.25 Verlauf von Temperatur und Strahlung am 09.06.03; o Rieselfelder, x Fernsehturm

4 Diskussion

Für die Bewertung des Fernsehturms als Standort für Turbulenzmessungen und um die Anbindung des dort bestimmten Turbulenzregimes einzuschätzen, spielt der Vergleich mit Turbulenzmessdaten aus den Rieselfeldern in geringer Messhöhe eine zentrale Rolle. Es soll versucht werden aus dem Vergleich Rückschlüsse über das Turbulenzverhalten am Fernsehturm zu ziehen. Diese Erkenntnisse sollen dann auf die komplette Messreihe des Fernsehturms übertragen werden. Außerdem sollen sie die Footprint – Analyse unterstützen. Aus genannten Gründen werden zuerst die Daten aus dem Vergleich, dann die Messreihe vom Fernsehturm - und zum Schluss die Ergebnisse aus der Footprint – Analyse diskutiert.

4.1 Vergleich Fernsehturm – Rieselfelder

Der Vergleich der Daten erfolgt hinsichtlich der in den Ergebnissen dargestellten Parameter Stabilität, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Schubspannungsgeschwindigkeit, Auftriebsstrom und Temperatur. Außerdem fließt die, auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie, bestimmte kurzwellige Sonneneinstrahlung mit ein.

Einen ersten Anhaltspunkt für einen Zusammenhang zwischen dem Windfeld am Boden und dem am Fernsehturm, gibt das Verhältnis der gemessenen horizontalen Windrichtungen. Die Übereinstimmung des Großteils der Werte für die Windrichtung, zeigt einen direkten Zusammenhang zwischen dem Regime am Fernsehturm und dem in den Rieselfeldern. Dies deutet bereits darauf hin, dass sich die Schicht konstanter Flüsse (Prandtl – Schicht) häufig bis in Höhe des Messstandorts auf dem Fernsehturm erstreckt. Da die reibungsbedingte Winddrehung hauptsächlich im oberen Teil der atmosphärischen Grenzschicht (Ekman – Schicht) stattfindet, sind keine deutlichen höhenabhängige Unterschiede der Windrichtung innerhalb der Prandtl-Schicht zu erwarten (Helbig et al., 1999).

Mit der Höhe über Grund nimmt die Windgeschwindigkeit zu. Deswegen sind die auf dem Fernsehturm gemessenen Windgeschwindigkeiten meist höher als in den Rieselfeldern. Für den neutralen Fall gilt in der Prandtl- Schicht folgende Gleichung: $u = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$ (Helbig et al., 1999).

Bei labiler Schichtung nimmt die horizontale Windgeschwindigkeit mit der Höhe weniger zu und bei stabiler Schichtung nimmt sie mit der Höhe mehr zu als im neutralen Fall (Oke, 1987). Da die Stabilität schwankt, schwankt der Unterschied zwischen den Windgeschwindigkeiten der beiden Standorte. Deutlich wird das auch an den zwei

exemplarisch herausgegriffenen Tagen. Während am 31. Mai tagsüber labile Verhältnisse vorherrschen, sind es am 9. Juni neutrale Verhältnisse. Dementsprechend ist der Unterschied zwischen den in 6,50 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeiten und den in 130 m Höhe gemessenen am 31. Mai tagsüber relativ gering und am 9. Juni relativ groß. Da in den Nächten die Schichtung stabil wird, wächst der Unterschied zwischen den Messwerten der verschiedenen Standorte.

Für die Schubspannungsgeschwindigkeit spielen Windgeschwindigkeit, Oberflächenrauhigkeit und Stabilität eine Rolle. Innerhalb der Prandtl – Schicht wird die Schubspannungsgeschwindigkeit als nahezu konstant angenommen. Die nur geringen Unterschiede zwischen Rieselfeldern und Fernsehturm am 31. Mai lassen deswegen den Schluss zu, dass sich die Prandtl-Schicht bis in die Höhe des Standorts auf dem Fernsehturm erstreckt. Am 9. Juni hingegen, scheint sich der Standort außerhalb der Schicht konstanter Flüsse zu bewegen. Dem Einfluss der Windgeschwindigkeit, welcher am 9. Juni bis zum frühen Nachmittag deutlich höher ist, ist zuzuschreiben, dass sich die Schubspannungsgeschwindigkeit am 9. Juni bis zu dieser Zeit auf einem höheren Niveau bewegt. Andererseits ist die Schichtung am 9. Juni eher neutral als labil, wie am 31. Mai. Aus Abbildung 3.2 geht hervor, dass die höchsten Schubspannungsgeschwindigkeiten unter neutralen bis leicht labilen Verhältnissen $0 < z/L < -1$ auftreten. Sowohl am 31. Mai als auch am 9. Juni lag der Stabilitätsparameter in diesem Bereich. Er scheidet deswegen als Ursache für die insgesamt höhere Schubspannung am 9. Juni aus. Turbulenter Austausch von Impuls und sensibler Wärme verringern sich am Abend so bald z/L positiv wird. Für die Bewertung der Stabilität wird in erster Linie das in den Rieselfeldern bestimmte z/L benutzt, weil der Parameter am Fernsehturm stark schwankt und nicht gewährleistet ist, dass sich der dortige Standort in der Prandtl- Schicht befindet.

Der Fluss fühlbarer Wärme hängt neben der Stabilität, von der kurzweligen Sonneneinstrahlung ab (Grimmond und Oke, 1995). Das Korrelationsdiagramm von Auftriebsstrom und Strahlung (Abb. 3.5) macht dies ebenfalls deutlich. Zu berücksichtigen ist, dass der für diese Arbeit gemessene Auftriebsstrom im Mittel etwa 10 – 20 % höher ist als der Fluss fühlbarer Wärme (Foken, 2003). Dass in den Rieselfeldern der Auftriebsstrom meistens größer ist als am Fernsehturm, kann verschiedene Ursachen haben. Allein der Höhenunterschied kann die Ursache für die unterschiedlichen Auftriebsströme sein (Roth und Oke, 1995). Die an der Oberfläche entstandenen Turbulenzen schließen sich beim Aufsteigen

zu einem Fluss zusammen, in dem sich die nicht homogene Oberfläche nicht mehr abbildet. Diese Höhe kann zum Beispiel bei der inhomogenen Struktur einer Vorstadt 30 m über Grund betragen (Schmid, 1997). Je höher man die turbulenten Flüsse misst, desto größer werden die Quellgebiete, wo sie entstanden sind (Schmid, 1997). Die Messungen in den Rieselfeldern fanden in 6,50 m und die am Fernsehturm in 130 m Höhe statt. Hinzu kommt, dass die Rieselfelder 9 km nördlich vom Fernsehturm, am anderen Ende der Stadt sind. Eine Abweichung der Flüsse beider Standorte ist somit zu erwarten und bedeutet nicht automatisch, dass das am Fernsehturm bestimmte Turbulenzregime nicht an das Bodenregime gebunden ist. Tagsüber am 9. Juni war die Schichtung eher neutral ($-0,05 < z/L < 0,05$), während sie am 31. Mai instabiler ($-0,79 < z/L < -0,11$) war. Das kann die Ursache für eine bessere turbulente Durchmischung bis in höhere Luftsichten sein. Aus diesem Grund verlaufen Schubspannung und Auftriebsstrom tagsüber am 31. Mai parallel, während dies am 9. Juni nicht der Fall ist. Das deutet darauf hin, dass die Prandtl – Schicht an diesem Tag bis in die Höhe der Messungen am Fernsehturm reicht. Entscheidend dafür ist die Stabilität. Da die Strahlung an beiden Tagen etwa gleich ist, kann sie am 9. Juni nicht der begrenzende Faktor für die Höhe der Prandtl – Schicht sein.

Ein weiterer Faktor ist die mit dem Ultraschallanemometer bestimmte akustische Temperatur. Ihre Differenz zur potentiellen Temperatur ist bei starkem Wind und unter instabilen Bedingungen am größten (Kaimal and Gaynor, 1991). Das wirkt sich auf die Werte für den Vergleich der Auftriebströme aus, weil die Windgeschwindigkeit am Fernsehturm meistens höher ist.

4.2 Daten vom Fernsehturm

Die im Vergleich gewonnen Erkenntnisse sollen in die Diskussion der Ergebnisse der gesamten Messungen mit einfließen. Dabei müssen jahreszeitliche Schwankungen berücksichtigt werden, denn der Vergleich fand von Mitte Mai bis Mitte Juni statt. Aufgrund des hohen Sonnenstandes erreichte viel Strahlung die Erdoberfläche.

Da die Stabilitätsverhältnisse entscheidend für die Ausprägung der Turbulenz sind, werden diese zuerst diskutiert. Auffällig sind die großen Schwankungen des Stabilitätsparameters. Dieser Parameter wird dann besonders groß beziehungsweise klein, wenn die Obukhov – Länge L im Verhältnis zur Messhöhe besonders nahe Null ist. Da der Auftriebsparameter per Definition Werte von $-\infty$ bis $+\infty$ annehmen kann, sind extreme Werte plausibel (Klemm, 2003). L lässt sich nur in der Prandtl – Schicht bestimmen (Bernhardt, 1995). Erstreckt sich

diese zum Zeitpunkt der Datenerfassung nicht bis in die Höhe des Messstandorts, sind die Werte für z/L nicht richtig. Wann sich die Prandtl – Schicht bis in diese Höhe erstreckt, lässt sich nur mit Hilfe der anderen Parameter klären. Dass am Tage negative z/L und in der Nacht positive z/L vorherrschen bedeutet, nachts behindern negative Auftriebskräfte turbulenten vertikalen Austausch, der durch Windscherung angetrieben wird, während tagsüber positive thermische Auftriebskräfte Turbulenz begünstigen.

Der große Unterschied zwischen den Fernsehturm- und den Institutsdaten erklärt sich aus der unterschiedlich angewendeten Messtechnik. Die am Fernsehturm gemessene Ultraschalltemperatur sollte aufgrund der Formel 2.2 meistens etwas höher als die reale Temperatur sein. Sie ist aber meist niedriger als die auf Basis der Daten vom Dach des Instituts für Landschaftsökologie berechneten Werte. Der Grund dafür könnte sein, dass sich der Wärmeinseleffekt der Stadt stärker auf die auf dem Institutsdach gemessene Temperatur auswirkt. Es wäre auch möglich, dass die Messtechnik auf dem Fernsehturm nicht richtig kalibriert war. Da es keine Vergleichsmessungen vor Ort gab, lässt sich dies weder bestätigen noch verwerfen.

Mit höheren Windgeschwindigkeiten wird die Windscherung bzw. Schubspannung größer (Formel 2.6). Mit der Schubspannung steigt die Schubspannungsgeschwindigkeit (Formel 2.7). Diese Abhängigkeit spiegelt sich in den Ergebnissen (Abb. 3.4) wieder. Die gemessenen Werte für u^* im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit scheinen zu niedrig, vergleicht man mit den von (Roth, 1993) angegebenen Werten. Dem dort angegebenen Verhältnis entsprechen 0,1 m/s Schubspannungsgeschwindigkeit 1 m/s Windgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf suburbanes Gelände. Die Schubspannungsgeschwindigkeit wächst mit der Rauigkeit der Oberfläche (Oke, 1987). Für die Windrichtungen von West bis Nordwest lässt sich eine erhöhte Schubspannungsgeschwindigkeit erkennen. Dafür gibt es zwei mögliche Ursachen, entweder ist der Untergrund in diesen Richtungen rauer oder die Windgeschwindigkeit aus diesen Richtungen ist größer. Die Windgeschwindigkeit weist jedoch eine andere Richtungsverteilung auf als die Schubspannungsgeschwindigkeit. Die Folgenden Abbildungen 4.1 bis 4.7 zeigen den größten Anteil bebauter Fläche im Bereich von 259° bis 345° also im Westen und Nordwesten. Dort sind die Werte für Schubspannungsgeschwindigkeiten am größten (Abb. 3.3). Geringere Schubspannungsgeschwindigkeiten treten vor allen Dingen im Osten auf. Aus den Abb. 4.2 bis 4.4 geht hervor, dass die Oberfläche weniger durch Bebauung und mehr durch Wiesen,

Äcker und kleinere Waldbestände geprägt ist. Oberflächen von Städten wie Münster haben eine Rauhigkeitslänge von 0,6 bis 1,5 m, während für Freilandoberflächen mit vielen Hecken, Bäumen und wenigen Gebäuden Rauhigkeitslängen von 0,1 bis 0,5 m typisch sind (Stull, 1991). Die größeren Schubspannungsgeschwindigkeiten für westliche Richtungen haben somit ihre Ursachen in der größeren Oberflächenrauhigkeit.



Abbildung 4.1 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 355° - 24°



Abbildung 4.2 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 24°-78°



Abbildung 4.3 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 67° - 121°



Abbildung 4.4 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung $107^\circ - 161^\circ$



Abbildung 4.5 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung $259^\circ - 312^\circ$



Abbildung 4.6 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung $291^\circ - 345^\circ$



Abbildung 4.7 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung $315^\circ - 9^\circ$

Beim Auftriebstrom ließ sich keine Richtungsabhängigkeit feststellen. Lediglich der schon im Vergleich der Turmdaten mit den Daten aus den Rieselfeldern festgestellte Zusammenhang mit der kurzweligen Sonneneinstrahlung. Der Vergleich der Strahlung und des Auftriebsstroms zeigt, dass sie parallel verlaufen und ihr Tagesmaximum etwa gleichzeitig

erreichen. Gleichermaßen hat auch die Untersuchung von Strahlung und Wärmefluss verschiedener nordamerikanischer Städte ergeben (Grimmond und Oke, 1995). Auffällig war, der geringe Auftriebsstrom am 27. und 28. September, verglichen mit den Daten vom 3. - 5. April und vom 3. – 7. August. Grund dafür können die niedrige Strahlung und der positive Stabilitätsparameter sein. Die Korrelation zwischen Strahlung und Auftriebsstrom (Abb.3.5) zeigt, dass der Auftriebsstrom bei unter 200 W/m² kaum über null hinaus kommt. Am 27. und 28. September übersteigt die Strahlung nur für 2 – 3 Stunden dieses kritische Maß. Anfang April und Anfang August steht die Sonne in einem steileren Winkel, sowie länger über dem Horizont, so dass mehr kurzwellige Strahlung auf die Oberfläche trifft. Das begünstigt einen stärkeren Auftriebsstrom. Hinzu kommt, dass der Stabilitätsparameter am 27. und 28. September tagsüber häufiger positiv ist als in der Zeit vom 3. - 5. April und vom 3. – 7. August. Es muss berücksichtigt werden, dass bei geringem Auftriebstrom, die Prandtl – Schicht nicht bis zur Messhöhe am Fernsehturm reichen könnte. Deswegen sind die Werte für z/L mit Vorsicht zu betrachten, denn der Stabilitätsparameter gilt nur für die Prandtl-Schicht.

Entscheidend für die Mächtigkeit der Prandtlschicht sind die Strahlung und die Stabilität. Die Auswertung der Daten vom Fernsehturm zeigt, eine möglichst hohe Strahlung begünstigt einen starken turbulenten Austausch fühlbarer Wärme. Der Vergleich mit den Rieselfeldern ergab, dass wenn zusätzlich labile Verhältnisse mit z/L kleiner -0,11 herrschen, das Turbulenzregime am Fernsehturm an das Bodenregime gebunden ist.

4.3 Footprint - Analyse

Die Footprint – Analyse zeigte keine Richtungsabhängigkeit von Größe und Form der Quellgebiete. Lediglich die Häufung der „Footprint – fähigen“ Daten für westliche Richtungen fiel auf. Ursache dafür sind die niedrigen Rauhigkeitslängen bei Ostwind. Die Rauhigkeit geht durch z_m/z_0 in die Berechnung mit ein. Das bedeutet, niedrige Oberflächenrauhigkeiten führen zu einem sehr großen z_m/z_0 . Bei der Messung am Fernsehturm in 115 m über der Verschiebungshöhe gilt das Modell nur bei einer Rauhigkeit $z_0 > 0,115$ m unter labilen und $z_0 > 0,23$ m unter stabilen Bedingungen, weil ansonsten die z_m/z_0 für das Modell zu klein würde (Tabelle 2.2). Bei westlichen Windrichtungen ist der Median für die Rauhigkeitslängen größer. Deswegen gab es häufiger Fälle in denen der Wert hoch genug war und es konnten mehr Footprint – Analysen gemacht werden. Die Abbildungen 4.1 bis 4.7 zeigen, dass sich bebaute Flächen hauptsächlich im Westen befinden, was die für diese Richtungen bestimmten höheren Rauhigkeitslängen erklärt. Da es am

Fernsehturm tagsüber häufig labile Bedingungen ($z/L < -0,61$) und nachts stabile Bedingungen ($z/L > 0,09$), die FSAM numerisch nicht verarbeiten kann, gegeben hat, gibt es die meisten „Footprint-fähigen“ Daten in der Zeit um den Sonnenauf- beziehungsweise Sonnenuntergang, weil z/L beim Wechsel zwischen labil und stabil im neutralen Bereich aufhält.

Bei stabiler werdender Schichtung werden die Quellgebiete lang gezogen und die Entfernung zum Messpunkt wird größer (Schmid, 1994). Weil die Schichtung am 29.9. 7:30 Uhr stabiler war ($z/L = 0,087$), sind die Quellgebiete lang gezogen und weiter vom Messpunkt entfernt. Am 24.4. waren die Verhältnisse mit $z/L = -0,0452$ am labilsten, deswegen ist dieses Quellgebiet am wenigsten gestreckt.

Die Flussberechnung funktioniert nur innerhalb Prandtl – Schicht, wo die Flüsse annähernd konstant sind (Schmid, 1997). Wenn sich die Plattform auf dem Fernsehturm zum Zeitpunkt der Messung nicht in der Prandtl – Schicht befindet, sind die gemessenen Flüsse keine Bodenflüsse und die Quellgebiete lassen sich nicht mit FSAM berechnen. Das Turbulenzregime am Fernsehturm ist nur bei hoher kurzwelliger Sonneneinstrahlung und labiler Schichtung an das Bodenturbulenzregime gebunden (Kapitel 4.1 und 4.2). Zu keinem Zeitpunkt an dem Footprints berechnet werden konnten, wurden diese Bedingungen vollständig erfüllt. Die Footprints vom 24.4. 10:00 Uhr und 5.8. 11:30 Uhr sind relativ nah an den Werten (Tabelle 3.4) Die Wahrscheinlichkeit, dass hier tatsächlich Bodenflüsse gemessen wurden ist groß.

5 Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war den Fernsehturm als Standort zu Bestimmung des Turbulenzregimes der Stadt Münster zu bewerten und herauszufinden ob man mit der Footprint – Methode die Quellgebiete der am Turm gemessenen Flüsse bestimmen kann. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

Der Anteil der thermisch induzierten Turbulenz ist entscheidend für die Ausprägung der turbulenten Mischungsschicht (Prandtl – Schicht). Bei hoher kurzwelliger Sonneneinstrahlung und unter labilen Bedingungen bildet sie sich bis in 130 m Höhe aus, wo die Turbulenzmessungen auf dem Fernsehturm stattfanden. Der Stabilitätsparameter z/L muss unter $\approx -0,1$ sein. Für die kurzwellige Strahlung ließ sich kein Mindestwert ermitteln. Tage

mit gut ausgeprägtem Auftriebsstrom hatten zumeist ein Tagesmaximum über 400 W/m². Möchte man das Bodenturbulenzregime der Stadt bestimmen, muss man die Turbulenzen demzufolge am Tag messen. Nachts sind die Unterschiede zwischen dem Windfeld am Boden und in 130 m Höhe am größten. Die Schichtung ist stabil, Windrichtung und Windgeschwindigkeit weichen zwischen den verschiedenen Höhen stark ab. Ist die Schichtung tags stabil, ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Einfluss der mechanisch induzierten Turbulenz ist für die Mächtigkeit der Prandtl – Schicht am Tage nicht entscheidend. Man sollte also am besten an Strahlungstagen im Sommer mit labiler Schichtung messen, um auf dem Fernsehturm das Bodenregime der Stadt Münster zu bestimmen.

Diese Konstellation ist für Footprint – Analysen ungünstig, weil das Modell nach Schmid nur bei annähernd neutralen Bedingen funktioniert und die Rauhigkeitslänge aus der Höhenformel nur unter neutralen Bedingungen bestimmt werden kann. Im Messzeitraum vom 20.03.2003 bis zum 01.10.2003 gab es nur zwei Intervalle für die man mit großer Wahrscheinlichkeit sagen kann, dass hier Bodenflüsse gemessen wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass gerade im Sommer bei Gewitterwetterlagen labiler Schichtung viele Messungen ausgefallen sind. Um solche Ausfälle in Zukunft zu minimieren, müsste man die automatische Datenerfassung häufiger kontrollieren.

In Bezug auf die Hauptwindrichtung ist die Lage des Fernsehturms im Südwesten der Stadt günstig, jedoch nicht optimal. Da in Münster Südwestwinde vorherrschen, wäre ein Standort im Nordosten der Stadt der günstigste um Flüsse aus dem Stadtgebiet bestimmen zu können. Ungünstig ist auch das Störungsfeld durch die Massivität des Turms. Dadurch waren über 30% der Messungen nicht nutzbar.

Entscheidend für die Bestimmung des Bodenturbulenzregimes ist die Messhöhe. Mit 130 m ist diese meiner Meinung nach zu hoch gewählt. Eine Höhe zwischen 30 m und 50 m wäre optimal, somit sind Schwankungen auf Grund interner Grenzschichten bereits ausgetilgt und man befindet sich trotzdem noch in der Schicht konstanter Flüsse.

6 Literaturverzeichnis

allesklar.com AG (2003): „Meine Stadt Münster Statistik, Menschen, Stadt und Umwelt, Siegburg“, Online unter:
<http://www.meinestadt.de/muenster-westfalen/statistik?Bereich=Menschen%2C+Stadt+%26+Umwelt> (abgerufen am 8.12.03)

Bernhardt, K.H. (1995): „Zur Interpretation der Monin – Obuchovschen Länge“, Meteorologische Zeitschrift 4, 81-82

Claussen, M.U. und J.L. Walmsley (1994): “Modification of blending height procedure in a proposed new PBL resistance law”, Boundary-Layer Meteorology 68, 201-205

Finke, L. (1996): „Landschaftsökologie“, 2. Auflage, Westermann, Braunschweig

Foken, T. (2003): „Angewandte Meteorologie“, 1. Auflage, Springer, Berlin

Fezer, F. (1995): „Das Klima der Städte“, 1. Auflage, Justus Perthes, Gotha

Grimmond, C.S.B. und T.R. Oke (1995): Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities, Journal of applied meteorology 34, 873-899

Helbig, A., J. Baumüller und M. J. Kerschgens (Hrsg.)(1999): Stadtklima und Luftreinhaltung, 2. Auflage Springer, Berlin

AG Klmatologie(2003): Klmatologie - aktuelles Wetter, Institut für Landschaftsökologie Münster, online unter: <http://kli.uni-muenster.de/db84.html> (abgerufen am: 22.12.03)

Kaimal, J. C. und J.E. Gaynor (1991): Another look at sonic thermometry, Boundary – Layer Meteorology 56, 401 – 410

RM Young Company (2003): Meteorological Instruments, Michigan, online unter:
<http://www.youngusa.com/rmyprod1.htm> (abgerufen am: 15.11.03)

Kiese, O. et al (1992): Stadtklima Münster, 2. Auflage, Stadt Münster -Umweltamt-Herausgeber: Der Oberstadtdirektor, Münster

Klemm, O. (2003): „Script Vorlesung Umweltmeteorologie“, Institut für Landschaftsökologie, Münster, online unter: <http://kli.uni-muenster.de/db94.html#ch261> (abgerufen am 20.07.03)

Mangold, A. (1999): „Turbulenzmessungen am Standort Weidenbrunnen“ (Diplomarbeit), Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth

Mauder, M. (2002): „Auswertung von Turbulenzmessgerätevergleichen unter besonderer Berücksichtigung von EBEX 2000“ (Diplomarbeit), Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth

Oke, T.R. (1987): “Boundary layer climates”, 2. Auflage, Routledge, London

RM Young Company (2003): “Meteorological Instruments”, Michigan, online unter:
<http://www.youngusa.com/rmyprod1.htm> (abgerufen am: 15.11.03)

Roth M. (1993): “Turbulent transfers relationships over an urban surface. II: Integral characteristics”, Quarterly journal of the Royal Meteorological Society 119, 1105-1120

Roth M., Oke T.R. (1995): “Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface”, Journal of the atmospheric sciences Vol. 52, No. 11, 1863-1874

Schmid, H.P. (1994): “Source areas for scalars and scalar fluxes”, Boundary-Layer Meteorology 67, 293-318

Schmid, H.P. (1997): "Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes", Agricultural and Forest Meteorology 87, 179-200

Schmid H.P. und Oke T.R. (1990): "A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain", Quarterly journal of the Royal Meteorological Society 116, 965-988

Schneider, P. (1966): „Unser Münsterland“, 1. Auflage, Aschendorff, Münster

Streit, U. (2004): „Vorlesung Geostatistik Online“, Institut für Geoinformatik, Münster, online unter: <http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geostatistik/Münster> (abgerufen am: 26.01.04)

Stull, R. B. (1991): "An introduction to boundary layer meteorology", 2. Auflage, Kluwer, Dordrecht

Universität Freiberg (2004): „Hydrogeologisches Versuchsfeld: Eddy-Flux Anlage, Einführung“, online unter:
http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/messfeld/eddy_flux/webseite/theoret_grundlagen.htm
(abgerufen am: 10.01.04)

Wilczak, J.M., S.P. Oncley und S.A. Stage (2000): "Sonic anemometer tilt correction algorithms", Boundary-Layer Meteorology 99, 127-150

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Tagesgang der turbulenten Schichtung (Foken, 2003)	3
Abbildung 1.2 Aufbau der Stadtgrenzschicht, Höhenangaben gelten für Wohnviertel mit einheitlich hohen Häusern von 7 m (Fezer, 1995), Ausnahme: Höhenangabe der Inertialschicht ist verallgemeinert (Claussen und Walmsley, 1994)	4
Abbildung 1.3 Windrose Münster bestimmt im Klimamessfeld des Instituts für Landschaftsökologie in der Steinfurter- Str. Nov. 1990 - Dez. 1999	7
Abbildung 1.4 Messstandorte	8
Abbildung 2.1 Young 81000 (R. M . Young Company, 2003)	9
Abbildung 2.2 Automatische Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie (AG Klmatologie, 2003)	10
Abbildung 2.3 Aufbau der Messanlage auf dem Fernsehturm	10
Abbildung 2.4 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung auf Basis des unrotierten Datensatzes	17
Abbildung 2.5 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung nach der Rotation unter Ausschluss der Daten aus der Anströmrichtung 150° - 210°	18
Abbildung 2.6 Vertikale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung nach der Rotation unter Ausschluss der Daten aus der Anströmrichtung 120° - 240°	19
Abbildung 2.7 Die gemessenen Windrichtungen auf dem Fernsehturm im Verhältnis zu den Windrichtungen gemessen auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie	20
Abbildung 2.8 Taylor – Hypothese, ein Turbulenzelement mit Anfangstemperatur 10 °C und Endtemperatur von 5 °C passiert das Messgerät	21
Abbildung 2.9 Quelldichtefunktion (Schmid, 1994)	21
Abbildung 2.10 Quellgebiet (Schmid, 1994)	22
Abbildung 3.1 Häufigkeit der Windrichtungen am Fernsehturm	25
Abbildung 3.2 Die Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zum Stabilitätsparameter	26
Abbildung 3.3 Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zur Windrichtung	26
Abbildung 3.4 Die Schubspannungsgeschwindigkeit in Relation zur Windgeschwindigkeit	27
Abbildung 3.5 Der Auftriebsstrom im Verhältnis zur kurzweligen Einstrahlung	28
Abbildung 3.6 Turbulenter Auftriebsstrom und kurzwellige Einstrahlung 03.04. – 06.04.	29
Abbildung 3.7 Turbulenter Auftriebsstrom und kurzwellige Einstrahlung 04.08. – 07.08.	29
Abbildung 3.8 Turbulenter Auftriebsstrom und kurzwellige Einstrahlung 27.09. – 29.09.	30
Abbildung 3.9 Der Flächeninhalt der Footprints aus denen 50 % der Flüsse stammen	31
Abbildung 3.10 Das Verhältnis der Windrichtungen am Fernsehturm und in den Rieselfeldern	34
Abbildung 3.11 Das Verhältnis zwischen den Windgeschwindigkeiten am Fernsehturm und in den Rieselfeldern	35

Abbildung 3.12 Verlauf der Windrichtung am 31.05.03	35
Abbildung 3.13 Verlauf der Windrichtung am 09.06.03	36
Abbildung 3.14 Verlauf der Windgeschwindigkeit am 31.05.03	36
Abbildung 3.15 Verlauf der Windgeschwindigkeit am 09.06.03	36
Abbildung 3.16 Verlauf des Stabilitätsparameters am 31.05.03	38
Abbildung 3.17 Verlauf des Stabilitätsparameters am 31.05.03	38
Abbildung 3.18 Das Verhältnis zwischen den Schubspannungsgeschwindigkeiten am Fernsehturm	39
Abbildung 3.19 Verlauf der Schubspannungsgeschwindigkeit am 09.06.2003	39
Abbildung 3.20 Verlauf der Schubspannungsgeschwindigkeit am 09.06.03	40
Abbildung 3.21 Das Verhältnis des Auftriebsstroms in den Rieselfeldern zum Auftriebsstrom am Fernsehturm vom 15.05.03 - 09.06.03	40
Abbildung 3.22 Verlauf des Auftriebstroms am 31.05.03	41
Abbildung 3.23 Verlauf des Auftriebstroms am 09.06.03	41
Abbildung 3.24 Verlauf von Temperatur und Strahlung am 31.05.03	42
Abbildung 3.25 Verlauf von Temperatur und Strahlung am 09.06.03	42
Abbildung 4.1 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 355° - 24°	47
Abbildung 4.2 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 24°-78°	48
Abbildung 4.3 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 67° - 121°	48
Abbildung 4.4 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 107° - 161°	49
Abbildung 4.5 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 259° - 312°	49
Abbildung 4.6 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 291° - 345°	50
Abbildung 4.7 Oberflächenbeschaffenheit vom Fernsehturm betrachtet, Blickrichtung 315° - 9°	50

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Plausibilitätskriterien der Messung mit dem Young 81000	15
Tabelle 2.2	Grenzwerte der Eingangsgrößen des Footprintmodells	22
Tabelle 3.1.	Zeiträume fehlender Messreihen	24
Tabelle 3.2.	Extremwerte der 30 min – Mittel am Fernsehturm	25
Tabelle 3.3	Flussrelevante Daten der Footprints	31

9 Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel und Quellen als die angegebenen verwendet zu haben.

Münster, 6. Februar 2004

Sebastian Schmetzke

Westfälische Wilhelms - Universität Münster
Institut für Landschaftsökologie
Robert – Koch – Str. 26
48149 Münster

Eignung des Fernsehturms Münster zur Bestimmung
des Turbulenzregimes der Stadt

Diplomarbeit vorgelegt von
Sebastian Schmetzke, Februar 2004

1. Gutachter: Prof. Dr. Otto Klemm
2. Gutachter: Dipl. – Geoökol. Andreas Held