

Diss. ETH No. 14514

**Determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric  
surface layer over various types of terrain by optical scintillometry**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

Alexandra Weiss

Diplom Meteorologe  
University of Hamburg, Germany

born 07 November 1967, Hamburg  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Ohmura, examiner  
Prof. Dr. H. Ingensand, co-examiner  
Dr. E. Andreas, co-examiner  
PD Dr. M. W. Rotach, co-examiner

## Abstract

Thermal stratification and turbulence in the atmospheric surface layer cause refraction and scintillation of an optical beam. On the one hand, such atmospherically induced effects are undesirable in many applications which are based on optical wave propagation through the atmospheric boundary layer. Such examples are found in many applications of terrestrial optical surveying. On the other hand, such atmospherically induced effects can be used to derive various meteorological parameters. Based on these considerations the present work deals with the determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric surface layer over different types of terrain by optical scintillometry.

First, in this study a method is introduced and experimentally verified to derive correction values for precise terrestrial geodetic measurements. For highly precise optical direction and distance measurements, such corrections require line-averaged temperature or refractive index gradients. Secondly, this study investigates how precisely line-averaged turbulence parameters can be derived in the atmospheric surface layer by scintillometry and whether their derivation deepens our understanding of the structure of the atmospheric surface layer, especially over non-homogeneous terrain. Here, the main focus lies in the investigation of the accuracy of the turbulent sensible heat and momentum fluxes, and the dissipation rate of turbulent kinetic energy, which are of grave importance for many meteorological applications. This work is based on various field experiments conducted with a so-called *displaced-beam* scintillometer under different atmospheric conditions. The experimental sites varied from homogeneous and flat terrain to flat, non-homogeneous terrain up to slanted, non-homogeneous terrain in an alpine valley. For validation of the method, additional meteorological measurement techniques are used and are considered in the data analysis, such as eddy-correlation measurements with sonic anemometer-thermometers and Krypton hygrometers, and temperature profile measurements with Pt-1000 sensors.

The derivation of the thermal stratification from the scintillation method is especially dependent on the accuracy of the derived turbulent sensible heat flux. In the scope of this study, satisfactory accuracy of the derived turbulent sensible heat fluxes is obtained, even for non-homogeneous terrain. It is shown that the presented method is applicable for deriving line-averaged refraction correction values over various types of terrain and for different atmospheric conditions with a good temporal resolution. This result is confirmed by comparisons with local temperature profile measurements. The limitations of this method are discussed on the basis of the experimental data-sets. For instance, under neutral conditions, with weak thermal turbulence, the derivation of accurate values of the turbulent momentum flux can be problematic with this method. However, in this work it is shown that the scintillation method gives accurate values under many atmospheric conditions including the turbulent momentum flux and for several other turbulence parameters. On the basis of the field experiments, new insights into the turbulence structure of the surface layer can be achieved by scintillometry, even over non-homogeneous terrain. In this context the turbulent structure in an alpine valley is analysed and described under various boundary layer features.

## Zusammenfassung

Thermische Schichtung und Turbulenz führen zu Refraktion und Szintillation einer optischen Wellen, die sich in der bodennahen Grenzschicht ausbreitet. Einerseits sind diese atmosphärisch induzierten Effekte bei vielen Anwendungen von optischen Wellen in der Grenzschicht unerwünscht, wie beispielsweise in zahlreichen Aufgabenfeldern auf dem Gebiet der terrestrischen optischen Vermessung. Auf der anderen Seite können diese atmosphärisch induzierten Effekte zur Ableitung von verschiedenen meteorologischen Parametern genutzt werden. Hierauf basiert die vorliegende Arbeit, die sich mit der Bestimmung der thermischen Schichtung und der Turbulenz in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht aus optischen Szintillationsmessungen über unterschiedlichen Gelände befasst.

In dieser Arbeit wird erstens ein Verfahren zur Bestimmung von Refraktions-Korrekturwerten aus Szintillationsmessungen für terrestrische geodätische Messungen vorgestellt und experimentell verifiziert. Für hoch präzise optischen Richtungs- und Distanzvermessungen zählen zu diesen Korrekturwerten der über die Messstrecke gemittelte Temperatur- oder Brechungsindexgradient. Zweitens wird in dieser Arbeit untersucht, mit welcher Genauigkeit sich Turbulenz-Parameter in der bodennahen Grenzschicht der Atmosphäre als integrale Grösse aus Szintillationsmessungen ableiten lassen und in wieweit sie neue Erkenntnisse über die Struktur der atmosphärischen Grenzschicht zulassen, insbesondere über inhomogenem Gelände. Hierbei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Untersuchung der Genauigkeit der turbulent Flüsse von sensibler Wärme und Impuls, sowie der Dissipationsrate der turbulent kinetischen Energie gelegt, die für viele meteorologische Anwendungen von grosser Bedeutung sind. Als Grundlage der Untersuchungen dieser Arbeit wurden verschiedene Feldexperimente mit einem sogenannten *displaced-beam* Szintillometer durchgeführt unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen. Die experimentellen Untersuchungsgebiete variierten, von homogenem und flachem Gelände, über flaches inhomogenes Gelände, bis hin zu geneigtem, inhomogenem Gelände in einem alpinen Tal. Zur Validierung der Methode wurden zusätzliche meteorologische Messverfahren eingesetzt und für die Analyse mit herangezogen. Hierzu gehörte unter anderen Eddy-Korrelationsmessungen mit Sonic-Anemometer-Thermometer und Krypton Hygrometer, sowie Temperaturprofilmessungen mit Pt-1000 Sensoren.

Die Ableitung der thermischen Schichtung aus der vorgestellten Szintillationsmethode, hängt insbesondere von der Genauigkeit der abgeleiteten sensiblen Wärmeflüsse ab. Es wird im Rahmen dieser Arbeit eine generell zufriedenstellende Genauigkeit der abgeleiteten sensiblen Wärmeflüsse erreicht, auch über nicht homogenem Gelände. Es wird gezeigt, dass die vorgestellte Methode geeignet ist, Refraktions-Korrekturwerte als integrale Grösse mit guter Genauigkeit und hoher zeitlichen Auflösung über die optische Messstrecke abzuleiten. Dieses Ergebnis wurde durch lokale Vergleichsmessungen des Temperaturprofils untermauert. Die Einschränkungen der Szintillationsmethode werden anhand der experimentell gewonnen Datensätze aufgezeigt. So kann beispielsweise die Ableitung des turbulenten Impulsflusses unter neutralen Bedingungen im Zusammenhang mit schwacher thermischer Turbulenz mit dieser Messmethode problematisch sein.