

# **Wissenschaftliche Mitteilungen**

aus dem  
**Institut für Meteorologie der Universität Leipzig**



ISBN 3-9807315-7-X

---

## **Tethered-Balloon Borne Turbulence Measurements in the Cloudy Boundary Layer**

Holger Siebert

Leipzig 2002

**Band 28**



## Zusammenfassung

Turbulente Austauschprozesse an Wolkenoberkanten spielen eine bedeutende Rolle für die Entwicklung der wolkenmikrophysikalischen Parameter wie Tröpfchengrößenverteilung und Flüssigwassergehalt. Besonders die Tröpfchengrößenverteilungen in den obersten Wolken-schichten sind für den Energiehaushalt der Erde von großer Bedeutung, da dort z.T. die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung reflektiert wird. Die Strahlungseigenschaften der Wolke können durch Einmischung von trockener Luft von Bereichen oberhalb der Wolke signifikant modifiziert werden.

Diese Mischungsprozesse haben verschieden Ursachen wie z.B. Windscherung, aber auch lokale Abkühlung an der Wolkenoberkante durch Verdunstungseffekte und dadurch resul-tierendes Absinken von einzelnen Luftpaketen. Das Einmischen geschieht oft sporadisch und auf räumlichen Skalen von einigen Dekametern bis hinab in den mm-Bereich.

Bisher gibt es nur wenige – zumeist flugzeuggestützte – Messungen von Wolkenparametern mit einer räumlichen Auflösung im cm-Bereich; die meisten Messungen in Wolken sind auf eine Auflösung von wenigen Metern limitiert und können somit die oben genannten Prozesse nicht auflösen. Um die räumliche Auflösung zu erhöhen, bieten sich bei gleicher Abtastrate der Sensoren langsam fliegende Plattformen als Systemträger an. In dieser Arbeit wird eine neuentwickelte Plattform für Turbulenzmessungen in Wolken vorgestellt, welche für den Einsatz unter Fesselballonen konzipiert ist.

In einer Reihe von Labor- und Feldexperimenten wurde die Wolkentauglichkeit und generelle Leistungsfähigkeit von geeigneten Sensoren untersucht. Es wurde eine minimale Abtastfrequenz von 100 Hz für Messungen des dreidimensionalen Windvektors, der Tem-peratur, Luftfeuchte und des Flüssigwassergehalts in Wolken angestrebt. Dies ermöglicht bei typischen Windgeschwindigkeiten von  $10 \text{ m s}^{-1}$  eine theoretische räumliche Auflösung von 10 cm. Zum Teil werden identische Meßgrößen von verschiedenen Sensoren mit un-terschiedlichen Zeitkonstanten abgetastet, sodaß sowohl ein genauer, aber langsamer, Ref-erenzwert als auch eine schnelle Messung zur Verfügung stehen. Während der Windvektor mit einem kommerziell erhältlichen Ultraschallanemometer gemessen wird, wurden für die Temperatur- und Feuchtemessungen speziell für den Wolkeneinsatz angepaßte Sensoren en-twickelt.

In ersten Feldexperimenten an der Nordseeküste wurde die generelle Tauglichkeit des Systems nachgewiesen. So konnten z.B. in einer abgehobenen Nebelschicht Feinstrukturen in Temperatur und Flüssigwassergehalt auf Skalen von z.T. deutlich unter einem Meter gemessen werden. Einzelne Nebelereignisse oberhalb der kompakten Nebelschicht korre-lierten mit lokalen Temperaturerhöhungen von nur etwa 50 mK.

# Contents

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | The Cloud-Topped Boundary Layer . . . . .                                | 1         |
| 1.2      | Field Experiments . . . . .  | 3         |
| 1.3      | Tethered-Balloon-Borne Systems for Fine-Scale Measurements . . . . .     | 4         |
| 1.4      | Intention and Structure of this Work . . . . .                           | 6         |
| <b>2</b> | <b>Theory</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1      | Basic Concepts . . . . .   | 7         |
| 2.1.1    | Fourier Transformation and Spectral Analysis . . . . .                   | 7         |
| 2.1.2    | Structure Functions . . . . .  | 9         |
| 2.1.3    | The Atmospheric Energy Spectrum and the Inertial Subrange . . . . .      | 9         |
| 2.2      | Time Series Analysis . . . . .   | 10        |
| 2.2.1    | Discrete Sampling and the Nyquist Frequency . . . . .                    | 10        |
| 2.2.2    | Data Conditioning: Aliasing, Red Noise, and Windowing . . . . .          | 10        |
| <b>3</b> | <b>Experimental Setup</b>  | <b>14</b> |
| 3.1      | Sensor Overview and Platform Design . . . . .                            | 14        |
| 3.1.1    | Sensors . . . . .  | 14        |
| 3.1.2    | Platform Design . . . . .  | 15        |
| 3.2      | Wind and Temperature Measurements with Ultrasonic . . . . .              | 16        |
| 3.2.1    | Design of the Solent HS Sonic . . . . .                                  | 17        |
| 3.2.2    | Laboratory and Field Experiments with the Solent HS Sonic . . . . .      | 19        |
| 3.2.3    | Sonic Measurements Under Cloudy Conditions . . . . .                     | 31        |
| 3.2.4    | Summary of the Sonic Performance . . . . .                               | 36        |
| 3.3      | Fast Temperature Measurements in Clouds with Fine-Wire Sensors . . . . . | 37        |
| 3.3.1    | Adiabatic Heating and Sensor Wetting . . . . .                           | 38        |
| 3.3.2    | Design of the New Ultra Fast Thermometer (UFT-B) . . . . .               | 39        |
| 3.3.3    | Wind Tunnel Tests with the UFT-B . . . . .                               | 46        |
| 3.4      | Humidity Measurements . . . . .  | 63        |
| 3.4.1    | Lyman- $\alpha$ Hygrometer . . . . .                                     | 63        |
| 3.4.2    | Capacitive Hygrometer . . . . .  | 65        |
| 3.4.3    | Calibration and First Tests of the Lyman- $\alpha$ Hygrometer . . . . .  | 65        |
| 3.5      | Microphysical Measurements . . . . .                                     | 68        |
| 3.5.1    | Aerosol Particle Measurements . . . . .                                  | 68        |
| 3.5.2    | Liquid Water Content Measurements . . . . .                              | 71        |
| 3.6      | Attitude and Position Measurements . . . . .                             | 72        |
| 3.6.1    | Coordinate Systems and Transformations . . . . .                         | 73        |
| 3.6.2    | Inertial Navigation System (INS) . . . . .                               | 75        |
| 3.6.3    | Global Positioning System (GPS) . . . . .                                | 75        |
| 3.6.4    | Barometric Height . . . . .  | 77        |
| 3.7      | The Tethered-Balloon System 'MAPS-Y' . . . . .                           | 78        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>4 Experiences and Results from First Test Flights</b>                                | <b>80</b>  |
| 4.1 Case Study of a Lifted Fog Layer . . . . .  | 81         |
| 4.2 Dynamic Behaviour of the Platform . . . . .   | 82         |
| 4.3 Measurements of Turbulence and Microphysical Parameters . . . . .                   | 87         |
| 4.3.1 UFT-B Calibration . . . . .   | 87         |
| 4.3.2 Fine-Scale Structures of $T$ , $u_p$ , $N_p$ , and $LWC$ - A Case Study . . . . . | 88         |
| <b>5 Summary and Outlook</b>  | <b>96</b>  |
| 5.1 Summary . . . . .   | 96         |
| 5.2 Outlook . . . . .   | 98         |
| <b>A Appendices</b>   | <b>100</b> |
| A.1 Transformation of Sonic-Axes Velocities . . . . .                                   | 100        |
| A.2 "Tuning-Fork" Effect . . . . .  | 101        |
| A.3 Coordinates Transformation . . . . .  | 103        |
| <b>List of Figures and Tables</b>   | <b>104</b> |
| <b>Symbols, Constants, and Acronyms</b>   | <b>110</b> |
| <b>References</b>   | <b>113</b> |
| <b>Danksagung–Acknowledgements</b>  | <b>123</b> |