

UNTERSUCHUNG DYNAMISCHER EIGENSCHAFTEN KOHÄRENTER STRUKTUREN ÜBER EINEM HOHEN FICHTENWALD MITTELS WAVELET-ANALYSE

C. THOMAS¹, TH. FOKEN¹,

¹*Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

1 EINLEITUNG

Kohärente Strukturen werden als fester Bestandteil von Zeitreihen turbulenter Windvektoren und skalarer Größen über hohen, rauen Unterlagen beobachtet. Sie sind als niederfrequente und rampenähnliche Muster deutlich von den hochfrequenten, chaotischen Signalen der atmosphärischen Turbulenz unterscheidbar. Kohärente Strukturen wurden von bislang von verschiedenen Autoren in der rauen Unterschicht über hoher Vegetation untersucht (e.g. Bergström und Högström, 1989; Gao *et al.*, 1989; Paw U *et al.*, 1992; Collineau und Brunet, 1993). Die veröffentlichten Studien zum Einfluss dieser kohärenten Strukturen auf gemessene Energie- und Stoffflussbilanzen haben gezeigt, dass diese zeitweise einen erheblichen Beitrag zu den atmosphärischen Flüssen leisten, ohne dabei von klassischen mikrometeorologischen Flussbestimmungsverfahren wie der Eddy-Kovarianz-Methode korrekt erfasst zu werden. Obwohl kohärente Strukturen in Zeitreihen visuell leicht zu erkennen sind, ist ihre objektive Erfassung und damit die Möglichkeit einer statistischen Auswertung erst durch komplexe mathematische Verfahren wie der Wavelet-Transformation ermöglicht worden.

Bislang basierten die Ergebnisse zur Untersuchung kohärenter Strukturen weitgehend auf der Analyse kurzzeitiger Datenreihen, da aufgrund der Datenmenge turbulenter Zeitreihen ein erheblicher Rechenaufwand besteht. Die Entstehung und räumlich-zeitliche Entwicklung der rampenähnlichen Strukturen blieb dabei weitgehend ungeklärt und verlangt weitere eingehende Untersuchungen. Diese Studie beinhaltet die Ergebnisse zur Untersuchung kohärenter Strukturen über den Zeitraum mehrerer Monate während des WALDATEM-2003 Experimentes. Im Vordergrund stehen hierbei Eigenschaften der Dynamik des Auftretens und der räumlichen Dimensionen.

2 DATENGRUNDLAGE

Die Datengrundlage für die vorliegende Studie wurde während des Experimentes WALDATEM-2003 im Zeitraum Mai bis Juli 2003 an der CarboEurop-Station GE1 Weidenbrunnen (50°08'53" Nord und 11°52'00" Ost, 775 m ü. NN) nahe des Grossen Waldsteines im Fichtelgebirge im Rahmen der BITÖK-Forschung durchgeführt. Diese komplexe Wald-Grenzschicht Experiment diente der intensiven Untersuchung von kohärenten Strukturen und Kohlenstoffflüssen in und über einem hohen Fichtenwald. Die Kronenhöhe betrug 19 m. Der Name des Experimentes leitet sich von den verwendeten Messsystemen ab, wobei WALD für WAVELET Detection und ATEM für Atmospheric Turbulent Exchange Measurements steht. Für die hochauflösende Erfassung der kohärenten Strukturen diente ein Vertikalprofil von sechs Ultraschallanemometern (2.3 m, 5.5 m, 13.6 m, 17.7 m, 22.4 m und 33.1 m ü. Grund), das mit einer Probenahmefrequenz von 10 Hz bzw. 20 Hz betrieben wurde. Eine detaillierte Beschreibung der Instrumentierung wird in Thomas *et al.* (2004) vorgestellt. Zusätzlich zu den Windmessungen wurden vier Messhöhen mit schnellen Gasanalysatoren für Wasserdampf und Kohlendioxid ausgestattet, um deren atmosphärische Flüsse höhenabhängig bilanzieren zu können. Der Messbereich umfasste dabei den gesamten Stamm- und Kronenraum, sowie Teile der rauen Unterschicht über dem Fichtenwald.

3 DETEKTION UND ANALYSE DER KOHÄRENTEN STRUKTUREN

Die Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen wurde mit Hilfe der selbstentwickelten Software WALDSCHRAT (WAVELET Detection Software for CoHERent Ramp paTterns) durchgeführt, die auf der Wavelet Transformation basiert. Die einzelnen Arbeitsschritte sowie Grundlagen zur Wavelettransformation sind in Thomas und Foken (2004) vorgestellt. An dieser Stelle sollen nur eine grobe Übersicht über die Vorgehensweise vorgestellt werden.

In der Datenvorbereitung werden die gesammelten Zeitreihen zunächst einem Spiketest (Vickers and Mahrt,

1997) unterworfen, der Ausreisser aussortiert und die Lücken linear interpoliert. Anschliessend wird die ursprüngliche zeitliche Datenaufösung von 20 Hz auf 2 Hz durch Blockmittelung reduziert, um die Rechenzeit für die nachfolgende Waveletanalyse zu reduzieren. Dieser Schritt ist gerechtfertigt vor dem Hintergrund, dass die kohärenten Strukturen typische Ereignisdauern von mehreren Sekunden bis zu wenigen Minuten aufweisen, sie in den Zeitreihen durch die Blockmittelung folglich nicht signifikant verändert werden. Test mit verschiedenen Probenabmehfrequenzen nach der Blockmittelung bestätigten dies. Anschliessend werden die Zeitreihen durch das Anhängen von Nullen an beiden Rändern der Zeitreihe künstlich verlängert, um Randeefekte zu vermeiden und optimale Bedingungen für die Waveletanalyse zu schaffen. Die Datenvorbereitung wird abgeschlossen durch die Filterung mit einem Tiefpassfilter, der ein biorthogonales Wavelet für die Zerlegung und Wiederherstellung verwendet. Die anschliessende kontinuierliche Wavelettransformation wird mit dem komplexen Morlet-Wavelet betrieben, das eine sehr gute Lokalisierung im Frequenzraum aufweist und somit ideal für die Berechnung der Waveletvarianz ist. Die Maxima in dem Waveletvarianzspektrum korrespondieren mit den charakteristischen Ereignisdauern der kohärenten Strukturen in den Zeitreihen. Anschliessend wird unter Zuhilfenahme der ermittelten charakteristischen Ereignisdauern eine weitere Wavelettransformation mit dem Mexican-Hat-Wavelet durchgeführt, um die individuellen kohärenten Strukturen zu erkennen. Abschliessend können somit die charakteristische Auftrittshäufigkeit, der Abstand der einzelnen kohärenten Strukturen zueinander und die Varianz der Auftrittshäufigkeit berechnet werden.

Weiterhin wurde die Struktur der Turbulenz und der kohärenten Strukturen nach der Mischungsschichtanalogie (Raupach *et al.*, 1996) ausgewertet. Diese Theorie besagt, dass der mittlere Abstand aufeinanderfolgender kohärenter Strukturen Λ_x der untersuchten Variable x eine lineare Funktion der Windscherungsskala L_s ist (Gleichung 1). Λ_x wird dabei aus den Ergebnissen der Waveletanalysen bestimmt.

$$\Lambda_x = m \cdot L_s \quad (1)$$

Diese Windscherungsskala L_s wurde unabhängig aus dem mittleren Vertikalprofil der Schalensternanemometer bestimmt und wird massgeblich durch den Windgeschwindigkeitgradienten $(\delta u / \delta z)_{z=h_c}$ in der mittleren Bestandeshöhe h_c definiert. L_s berechnet sich durch

$$L_s = \frac{\delta_w}{2} = \frac{u(h_c)}{\left(\frac{\delta u}{\delta z}\right)_{z=h_c}} \quad (2)$$

wobei δ_w der mittlere vertikale Durchmesser der Wirbel und $u(h_c)$ die horizontale Windgeschwindigkeit in Bestandeshöhe sind.

4 ERGEBNISSE

In Abbildung 1 ist die Horizontalwindgeschwindigkeit als Funktion der Windrichtung in der Messhöhe 33.1 m dargestellt. Deutlich sind die drei ausgewiesenen Hauptsektoren der Anströmung zu erkennen: Der Nordsektor von 320° bis 50°, der Ostsektor von 70° bis 180° und der Westsektor von 200° bis 300° Anströmrichtung. Da diese drei Sektoren unterschiedliche Anströmbedingungen repräsentieren, wurde die Auswertung bezüglich der Mischungsschichtanalogie (Raupach *et al.*, 1996) getrennt für diese Sektoren durchgeführt. Im Nordsektor erfolgt die Anströmung der Messfläche im Lee eines kleinen Berggipfels, die mittleren Stromlinien sind folglich leicht nach unten geneigt. Wind aus dem Westsektor strömt die Messfläche aus dem Tal an, sodass die mittleren Stromlinien leicht nach oben geneigt sind. Im Ostsektor erfolgt die Anströmung der Messfläche verhältnismässig eben, sodass keine Neigung der mittleren Stromlinien zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Berechnung zur Mischungsschichtanalogie sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Daten, die während der frühen Morgenstunden und der frühen Abendstunden gesammelt wurden, wurden für die Auswertung verworfen, da die Detektionsmethode oft unzuverlässige Ergebnisse lieferte. Die eingezeichneten Regressionsgeraden der drei Hauptsektoren weisen deutlich unterschiedliche Steigungen auf. Für den Nordsektor konnte ein Verhältnis von $m = 8$ (Gleichung 1), für den Ostsektor ein Verhältnis von $m = 13$ und für den Westsektor ein Verhältnis von $m = 10$ ermittelt werden. Im Vergleich dazu fanden Raupach *et al.* (1996) und Brunet und Irvine (2000) übereinstimmend ein Verhältnis von $m = 8.1$ unabhängig von der Windrichtung. Im Gegensatz zu den Messflächen während WALDATEM-2003 stammten diese Daten von Messflächen, die von allen Windrichtungen vergleichsweise homogene Anströmbedingungen aufwiesen. Im Vergleich der ermittelten Verhältnisse während WALDATEM-2003 und den Literaturwerten ergibt

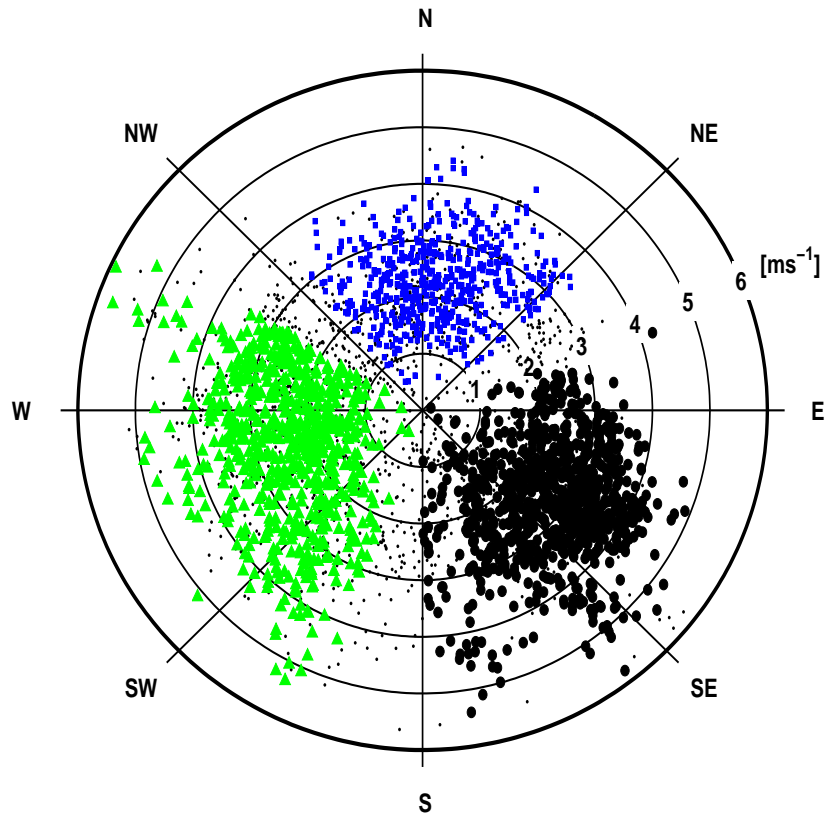


Abbildung 1: Horizontalwindgeschwindigkeit in 33.1 m Höhe als Funktion der Windrichtung während WALDATEM-2003: Alle Daten (schwarze Punkte), Nordsektor $320^\circ - 50^\circ$ (blaue Kästchen), Ostsektor $70^\circ - 180^\circ$ (schwarze Kreise) und Westsektor $200^\circ - 300^\circ$ (grüne Dreiecke).

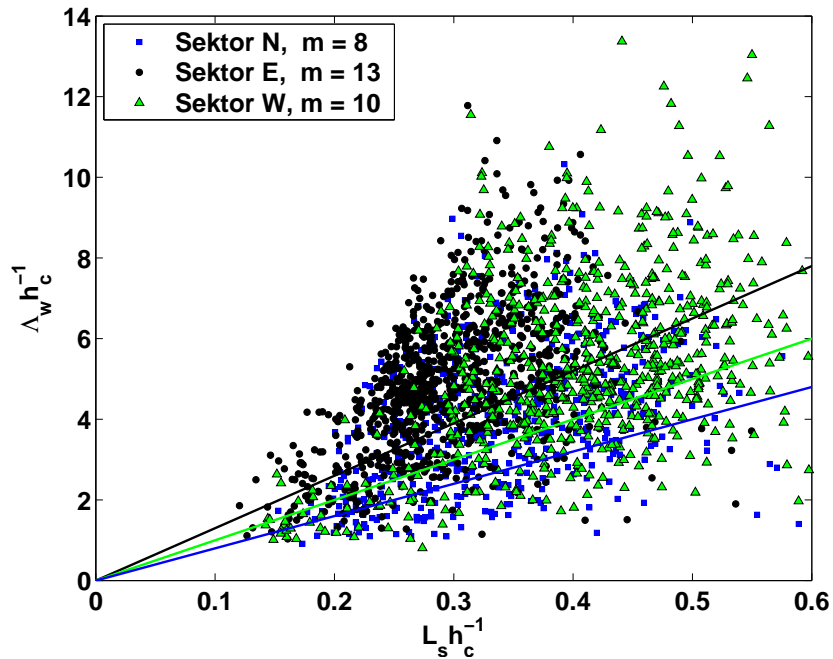


Abbildung 2: Normierter mittlerer Abstand der kohärenten Strukturen im Vertikalwind Λ_w als Funktion der normierten Windscherungsskala L_s mit $m = \Lambda_w / L_s$ während WALDATEM-2003 für die 3 Hauptsektoren der Anströmrichtung; h_c ist die mittlere Bestandeshöhe.

sich, daß lediglich der Nordsektor eine klare Übereinstimmung aufweist, wobei der West- und der Ostsektor zunehmend davon abweichen. Eine mögliche Erklärung ist im Einfluss der Orographie zu finden: Bei Anströmung aus dem Nordsektor wird die Strömung im Lee des kleinen Gipfels mechanisch dazu gezwungen, sich neu zu formieren. Die Folge davon ist, daß die im Luv befindliche Oberflächenstruktur keinen prägenden Einfluss mehr auf die Strömung ausüben kann. Die Neuformation der turbulenten Strömung und damit die Organisation der kohärenten Strukturen erfolgt gemäß den Bedingungen der Windscherungsskala, folglich ist in diesem Sektor eine gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten zu erwarten. Die gefundenen Ergebnisse bestätigen diese Hypothese. Im Gegensatz dazu prägt die sich im Luv der beiden anderen Sektoren befindliche Oberfläche die Strömung durch Hindernisse und charakteristische Strukturen, dass diese einen Einfluss auf die Organisation der Strömung und damit auf die der kohärenten Strukturen gewinnen. Folglich ist bei Anströmung aus dem Ost- und Westsektor eine Abweichung von der Theorie der Mischungsschichtanalogie zu erwarten, die die Organisation der kohärenten Strukturen nur als Abhängigkeit der Windscherungsskala definiert.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegende Studie untersuchte die dynamischen Eigenschaften kohärenter Strukturen mit Hilfe der Wavelet-Transformation. Als Datengrundlage dienten Zeitreihen, die während des Experimentes WALDATEM-2003 gesammelt wurden. Im Hinblick auf die Mischungsschichtanalogie über hoher Vegetation konnte nur für einen Anströmungssektor die in der Literatur veröffentlichten Verhältnisse zwischen Windscherungsskala und mittlerem Abstand der kohärenten Strukturen bestätigt werden. Für die anderen Anströmungssektoren wurden davon abweichende Verhältnisse gefunden, die sich möglicherweise durch den Einfluss der sich im Luv befindlichen Oberflächenstruktur erklären lassen.

DANKSAGUNGEN

Wir danken den Mitarbeitern des BITÖK (Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung) der Universität Bayreuth für die tatkräftige Unterstützung der experimentellen Arbeiten. Die vorliegende Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Vertrag PT BEO51-0339476 D.

LITERATUR

- Bergström, H, Högström, U (1989). Turbulent exchange above a pine forest. II. Organized structures. *Boundary-Layer Meteorol.*, 49: 231-263.
- Brunet, Y, Irvine, MR (2000). The control of coherent eddies in vegetation canopies: streamwise structure spacing, canopy shear scale and atmospheric stability. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94: 139- 163.
- Collineau, S, Brunet, Y (1993). Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part II: Timescales and conditional averages. *Boundary-Layer Meteorol.*, 66: 49-73.
- Gao, W, Shaw, RH, Paw U, KT (1989). Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 47: 349-377.
- Paw U, KT, Brunet, Y, Collineau, S, Shaw, RH, Maitani, T, Qiu, J, Hipps, L (1992). Evidence of Turbulent Coherent Structures in and above Agricultural Plant Canopies. *Agric.For.Meteorol.*, 61: 55-68.
- Raupach, MR, Finnigan, JJ, Brunet, Y (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 78: 351-382.
- Thomas, C and Foken, Th (2004). Detection of Long-term Coherent Exchange over Spruce Forest Using Wavelet Analysis, *Theor. & Appl. Climatol.*, accepted.
- Thomas, C, Ruppert, J, Lüers, J, Olesch, J, Bertolini, T, Mayer, J-C, Schröter, J, Delany, AC, Foken, T (2004). Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Vickers, D, Mahrt, L (1997). Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmospheric & Oceanic Technol.*, 14: 512-526.