

QUALITÄTSSICHERUNG DER ENERGIEFLUSSMESSUNGEN FÜR LITFASS-2003

M. MAUDER und T. FOKEN

Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland

1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Verbundprojektes DEKLIM/EVA-GRIPS fand in der Zeit vom 19.05.2003 bis zum 17.06.2003 das Experiment LITFASS-2003 (**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain – **F**luxes between **A**tmosphere and **S**urface: a longterm Study) am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) und in dessen Umgebung statt (Beyrich, 2004). Ziel dieses Experimentes war es, die Verdunstung über den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Landnutzungstypen zu bestimmen. Dazu wurden neben anderen Methoden der Verdunstungsmessung auch In-situ-Messungen auf Standorten aller typischen Landnutzungsklassen durchgeführt. An insgesamt 17 Stationen wurden von sechs Arbeitsgruppen Energieflussmessungen nach der Eddy-Kovarianz Methode betrieben. Gerade weil von vorn herein nicht bekannt war, in welchem Maße sich die Wasserdampf Flüsse über den unterschiedlichen Landnutzungstypen unterscheiden, sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle der gewonnenen Messdaten von großer Bedeutung. Sie leisten eine wesentliche Grundlage für jegliche weitere Auswertung dieser Daten. Dabei ist es unerlässlich, dass eine Vergleichbarkeit sowohl der Datenbearbeitungsalgorithmen als auch der Instrumentierung der einzelnen Standorte gewährleistet ist.

2 EINHEITLICHE BEARBEITUNG UND QUALITÄTSMESSUNG DER MESSDATEN

Die einzige Möglichkeit, turbulente Wärmeströme direkt zu messen, bietet die Eddy-Kovarianz Methode. Im Allgemeinen werden turbulente Wärmeströme als die Kovarianz zwischen zwei hochfrequent abgetasteten Zeitreihen von Vertikalwindgeschwindigkeit und einer zu transportierenden skalaren Größe wie Temperatur oder Luftfeuchte bestimmt. Diese beiden Zeitreihen sollten an einem Punkt in Raum und Zeit gemessen werden. Atmosphärische Messungen dieser Art sind allerdings immer mit Unzulänglichkeiten behaftet, so dass die Annahmen und Voraussetzungen der Eddy-Kovarianz Methode teilweise nicht oder nur annähernd erfüllt werden können. Deshalb ist eine Nachbearbeitung der Daten mit Qualitätskontrolle erforderlich.

Ein Vergleich der Datenbearbeitungsalgorithmen während eines von der Universität Bayreuth ausgerichteten Workshops ergab, dass sich die von den verschiedenen Projektteilnehmern bestimmten Energieflüsse deutlich unterscheiden. Um diese ungewollte Beeinflussung der Messergebnisse auszuschließen, wurde von der Universität Bayreuth ein umfassendes Softwarepaket zur einheitlichen Datennachbearbeitung aller am Experiment LITFASS-2003 beteiligten Eddy-Kovarianz Messsysteme entwickelt. Es beinhaltet Qualitätstest der Rohdaten, alle notwendigen Korrekturen und auch Qualitätstests der resultierenden turbulenten Flüsse (Abbildung 1).

Mit diesem Programmpaket wurden die Daten aller 17 bei LITFASS-2003 betriebenen Eddy-Kovarianz Komplexe prozessiert. So war es möglich, die Qualität aller Flussmessungen in einheitlicher Weise zu bestimmen. Für eine ausgewählte mikrometeorologische Messstation (A6), die sich auf einem Maisfeld befand, ist beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt, wie groß der prozentuale Anteil qualitativ hochwertiger 30-min Daten für den latenten Wärmestrom in der Zeit zwischen 0600 und 2000 UTC für jeden Tag des Experimentes LITFASS-2003 war. Flussdaten mit dieser Qualitätskennzeichnung (Flag 1-3) genügen den Anforderungen für Grundlagenforschung (Foken, et al., 2004).

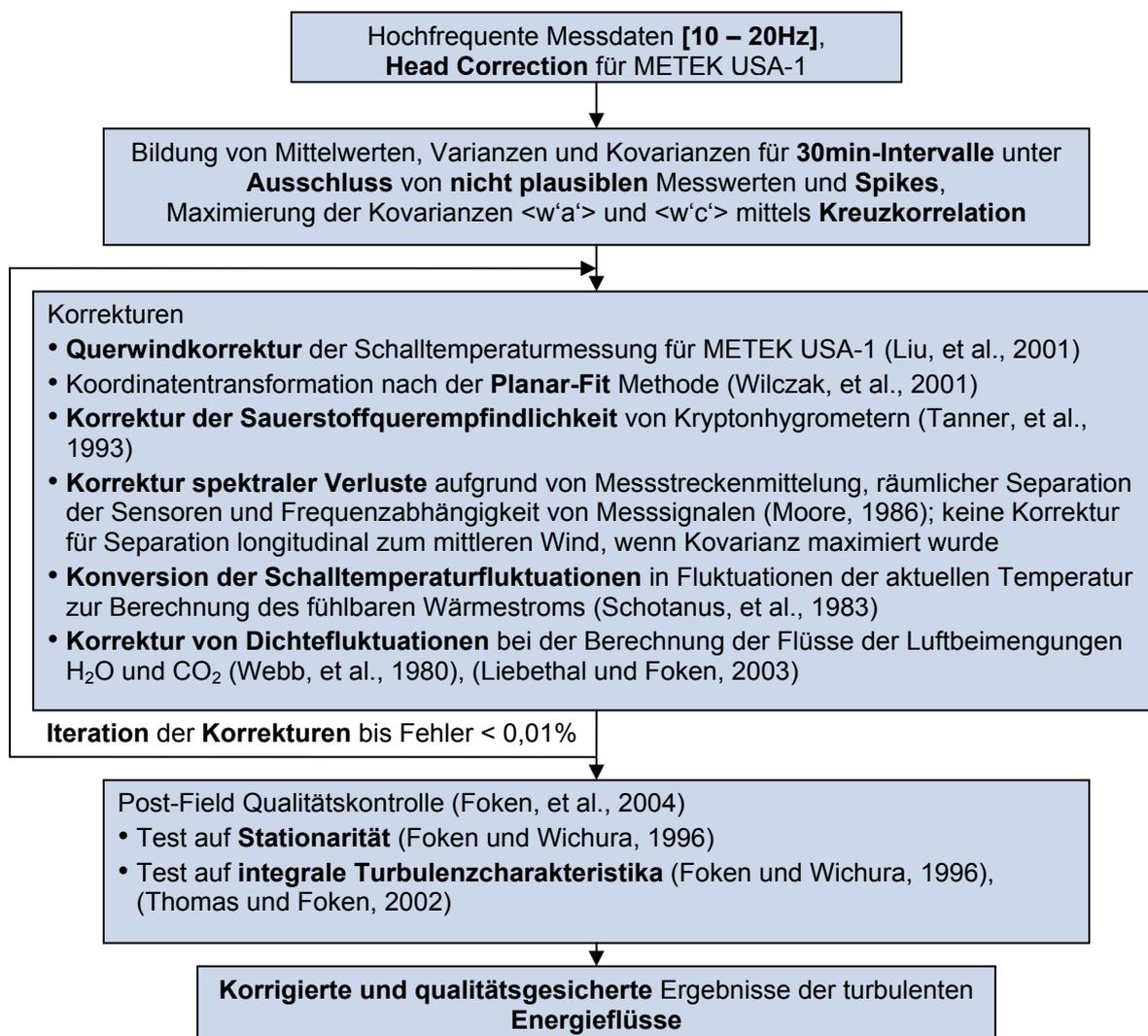


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Datenbearbeitungsschritte zur Qualitätssicherung der Eddy-Kovarianz Flussmessungen für LITFASS-2003

Während der meisten Tage der Messkampagne von LITFASS-2003 sind tagsüber Anteile von mehr als 90% qualitativ hochwertiger Daten für den latenten Wärmestrom zu verzeichnen. Deutlich niedrigere Prozentzahlen am 19.6., 22.5. sowie am 5.6.2003 hängen mit Niederschlagsereignissen zusammen, welche die Messungen mit Ultraschallanemometern und optischen Feuchtesensoren störten. Am 31.5. und 1.6.2003 kam es zu einem längeren Ausfall der Datenübertragung, weshalb auch an diesen Tagen weniger Flussdaten hoher Qualität zur Verfügung stehen. Dem Nutzer der Messdaten kann also eine schnelle Übersicht zur Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Flussdaten angeboten werden. Diese Methode ist nicht nur in der Lage, Unzulänglichkeiten meteorologischer Art aufzuzeigen, sondern weist ebenso auf messtechnische Probleme hin. Dieses gleiche Verfahren wurde auch auf allen übrigen mikrometeorologischen Stationen von LITFASS-2003 angewendet.

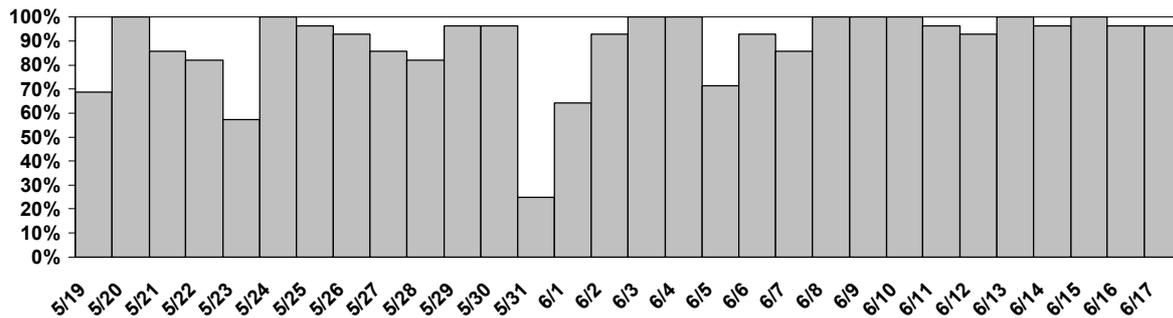


Abbildung 2: Verfügbarkeit von Daten für den latenten Wärmestrom von hoher Qualität in % zwischen 0600 and 2000 UTC. Mikrometeorologische Messstation LITFASS-2003/A6, 19.5. – 17.6.2004

3 VERGLEICHSEXPERIMENT EVA_GRIPS 2002

Neben der Erfüllung aller theoretischen Annahmen der Eddy-Kovarianz Methode ist die Instrumentierung eine weitere Quelle für Unsicherheiten bei der Bestimmung turbulenter Energieflüsse. Um die besonderen Eigenschaften der bei LITFASS-2003 verwendeten Sensoren charakterisieren zu können, wurde etwa ein Jahr vor dem Hauptexperiment an gleicher Stelle ein Vergleichsexperiment auf dem Grenzschichtmessfeld des Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) durchgeführt (Abbildung 3).

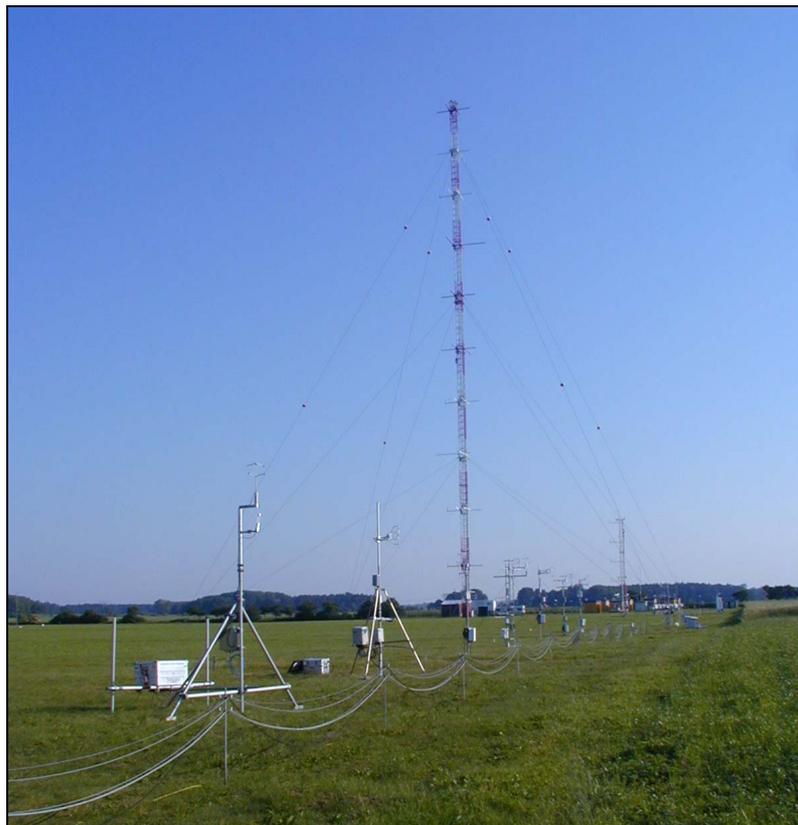


Abbildung 3: Turbulenzmessgerätevergleichsexperiment EVA_GRIPS-2002 auf dem Grenzschichtmessfeld des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg (MOL)

Der Zeitraum für die Vergleichsmessungen dauerte 10 Tage vom 29.5.2002 bis zum 7.6.2002. Es wurden sieben Turbulenzmesskomplexe in einer Linie nebeneinander betrieben, jeweils bestehend aus einem Ultraschallanemometer und einem schnellen Feuchtesensor. Diese repräsentierten die Prototypen aller beim Hauptexperiment von den teilnehmenden Arbeitsgruppen eingesetzten Sensorkombinationen. Der Abstand zwischen den Messkomplexen betrug ca. 8.50 m. Die Messhöhe war ca. 3.25 m über dem Boden. Das Messfeld war im Footprint-Bereich der ausgewerteten Messungen mit kurz geschnittenem Gras als bewachsen.

Als Referenz für die Vergleichsuntersuchungen diente ein Messkomplex bestehend aus einem Campbell CSAT3 mit einem LI-7500 Infrarot Gasanalysator (LiCor Inc.), der von der Universität Bayreuth betrieben wurde. Neben diesen beiden Sensortypen wurden auch ein METEK USA-1 Ultraschallanemometer und ein Campbell KH20 Krypton Hygrometer eingesetzt. Die verschiedenen Messkomplexe wurden von den folgenden Gruppen betrieben. Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg, Technische Universität Dresden und Universität Bayreuth.

Für die Auswertung des Vergleichsexperimentes wurden die statistischen Momente erster und zweiter Ordnung der aufgenommenen hochfrequenten Zeitreihen herangezogen. Es wurden nur Messungen aus einem vergleichsweise engen Windrichtungssektor von 45° verwendet. Damit wurde gewährleistet, dass sich die Messkomplexe nicht gegenseitig stören und die Footprint-Bereiche der Flüsse aller Messkomplexe von der gleichen Unterlage stammen. Alle Datensätze wurden einheitlich nach dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren bearbeitet. Es wurden lediglich Daten der Qualitätsklassen 1 bis 3 (hohe Qualität, für Grundlagenforschung geeignet) in die Analyse einbezogen.

Die statistische Auswertung der Messergebnisse für den fühlbaren Wärmestrom ergab, dass die unterschiedlichen Ultraschallanemometer kaum mehr als 5% von dem Referenzgerät abweichen, oder mindestens bis zu etwa 10 Wm⁻² (Tabelle 1). Die Datenerfassung des schnellen Feuchtesensors an Komplex UBT#2 war defekt, so dass keine latenten Wärmeströme für diesen Komplex berechnet werden konnten. Die Ergebnisse für die latenten Wärmeströme der übrigen Messkomplexe wiesen relative Unterschiede bis zu 25% zur Referenz auf, oder mindestens Abweichungen von bis zu etwa 30 Wm⁻². Die Streuungen um die Ausgleichsgerade zur Referenzmessung waren für den latenten Wärmestrom deutlich größer als für den fühlbaren, was sich in vergleichsweise niedrigen Bestimmtheitsmaßen R² ausdrückt (Tabelle 2).

Tabelle 1: Ergebnisse der statistischen Auswertung des Turbulenzmessgerätevergleichsexperimentes EVA_GRIPS-2002 für den fühlbaren Wärmestrom, Referenzkomplex UBT#1 (CSAT3/LI-7500)

Referenz: UBT#1	GKSS	MOL#1	MOL#2	TUDD	UBT#2	MPIM
Bestimmtheitsmaß R ²	0.96	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92
Steigung a	0.94	0.95	1.04	1.03	1.00	0.94
Achsenabschnitt b [Wm ⁻²]	-1	-1	-8	0	-6	-6

Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertung des Turbulenzmessgerätevergleichsexperimentes EVA_GRIPS-2002 für den latenten Wärmestrom, Referenzkomplex UBT#1 (CSAT3/LI-7500)

Referenz: UBT#1	GKSS	MOL#1	MOL#2	TUDD	UBT#2	MPIM
Bestimmtheitsmaß R ²	0.82	0.77	0.74	0.77	-	0.68
Steigung a	0.98	1.07	0.87	1.25	-	0.92
Achsenabschnitt b [Wm ⁻²]	23	29	19	13	-	29

4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Beim Hauptexperiment LITFASS-2003 wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung der turbulenten Energieflüsse angewendet. Dabei kamen direkte Messungen, Parametrisierungen und Modellierungen zum Einsatz. Die Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Eddy-Kovarianz Messungen leisteten einen wichtigen Beitrag zur vergleichenden Interpretation der Ergebnisse dieser verschiedenen Methoden. Dabei wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse aller mikrometeorologischen Stationen nach demselben Algorithmus ausgewertet wurden. Außerdem konnte ein Turbulenzmessgerätevergleichsexperiment Aufschluss darüber geben, inwieweit sich die Instrumentierung, die sich aus verschiedenen Sensortypen zusammensetzte, auf die Ergebnisse der Energieflussmessungen auswirkt. Danach muss für die Messung des fühlbaren Wärmestroms mit Fehlern von 5% oder mindestens 10 Wm^{-2} gerechnet werden. Für den latenten Wärmestrom betragen die Abweichungen der Flussmessungen mit den verwendeten Sensoren weniger als 25% oder mindestens 30 Wm^{-2} . Unterschiede zwischen den Flussmessungen über den verschiedenen Landnutzungstypen beim Hauptexperiment LITFASS-2003, die größer als die beim Vergleichsexperiment festgestellten Abweichungen sind, können demnach als signifikant betrachtet werden.

DANKSAGUNGEN

Die hier vorgestellten Studien wurden im Rahmen des Verbundprojektes EVA_GRIPS durchgeführt. EVA_GRIPS ist ein Teilprojekt des Deutschen Klimaforschungsprogramms (DEKLIM), welches vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wird (BMBF 01LD0103-UBT). Die Daten für das Vergleichsexperiment EVA_GRIPS-2002 wurden von den Autoren und den folgenden Gruppen erfasst: Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg MOL (F. Beyrich, J.-P. Leps), GKSS Forschungszentrum Geesthacht (H. Lohse, S. Huneke), Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg MPIM (G. Peters, H. Münster), Technische Universität Dresden TUDD (C. Bernhofer, R. Queck).

LITERATUR

- Beyrich, F., 2004. Verdunstungsmessung über einer heterogenen Landoberfläche, Das LITFASS-2003 Experiment, Ein Bericht. Deutscher Wetterdienst Forschung und Entwicklung, Offenbach am Main, pp. 104.
- Foken, T. und Wichura, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 83-105.
- Foken, T., Göckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B. D. und Munger, J. W. (2004). Post-field data quality control. In: Lee, X. (Editor), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer, Dordrecht, pp. 81-108 in print.
- Liebenthal, C. und Foken, T. (2003). On the significance of the Webb correction to fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 109, 99–106.
- Liu, H., Peters, G. und Foken, T. (2001). New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer. *Boundary-Layer Meteorology*, 100, 459-468.
- Moore, C. J. (1986). Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 37, 17-35.
- Schotanus, P., Nieuwstadt, F. T. M. und DeBruin, H. A. R. (1983). Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluctuations. *Boundary-Layer Meteorology*, 26, 81-93.
- Tanner, B. D., Swiatek, E. und Greene, J. P. (1993). Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements. In: Allen, R. G. (Editor), *Management of irrigation*

- and drainage systems: integrated perspectives. American Society of Civil Engineers, New York, NY, pp. 945-952.
- Thomas, C. und Foken, T., 2002. Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterisations, 15th Conference on Turbulence and Boundary Layers. Am. Meteorol. Soc., Wageningen, NL, pp. 129-132.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. und Leuning, R. (1980). Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 106, 85-100.
- Wilczak, J. M., Oncley, S. P. und Stage, S. A. (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127-150.