

DAS NIGERIANISCHE MIKROMETEOROLOGISCHE FELDEXPERIMENT NIMEX-1

M. MAUDER¹, O. O. JEGEDE² und T. FOKEN¹

¹*Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

²*Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria*

1 EINLEITUNG

Zur Untersuchung des atmosphärischen Energieaustauschs und der Energiebilanz an der Erdoberfläche in den tropischen Breiten Nigerias wurde durch die Atmospheric Research Group der Universität Ile-Ife (Nigeria) ein Mikrometeorologisches Feldexperiment zwischen dem 15. Februar und dem 10. März 2004 organisiert. Der Projektname NIMEX-1 ist ein Akronym für **N**Igerian **M**icrometeorological **E**Xperiment (Phase I). Das Projekt wird von einer Wissenschaftlergruppe betrieben, die von folgenden Universitäten stammen: Obafemi Awolowo University, Ile-Ife (Nigeria), University of Ibadan (Nigeria), Federal University of Technology Akure (Nigeria) und Universität Bayreuth. Insgesamt beteiligten sich 26 Wissenschaftler und Studenten an der Durchführung von NIMEX-1. Das Feldexperiment wurde durch folgende Institutionen gefördert: International Programmes in the Physical Sciences of Uppsala University (Schweden), African Regional Centre for Space Science Education (Nigeria), Alexander von Humboldt Stiftung, Deutscher Akademischer Austauschdienst und Universität Bayreuth. Die Klimatologie des Messstandortes im Südwesten Nigerias ließ erwarten, dass die Intensivmessphase von NIMEX-1 in die Übergangszeit von der Trocken- zur Regenzeit in Ile-Ife fallen wird (7.55°N, 4.56°E, 288 m ü.NN.). So ergibt sich die Möglichkeit, innerhalb eines vergleichsweise kurzen Messzeitraumes den Austausch von Stoffen, Impuls und Energie unter zwei unterschiedlichen für die Tropen typischen Witterungsverhältnissen zu vergleichen.

2 FELDEXPERIMENT

Als Standort für das Feldexperiment NIMEX-1 wurde eine brachliegende Fläche in der Nähe von Ile-Ife ausgewählt. Der Bestand setzte sich vor allem aus Gras und kleinen Büschen zusammen und hatte eine Höhe von 0.30 m. Alle Feldmessungen der Intensivmessphase von NIMEX-1 fanden in der Zeit vom 19. Februar bis zum 10. März 2004 statt.

2.1 MESSAUFBAU

Zu Beginn des Feldexperimentes NIMEX-1, am 16. Februar 2004, wurden auf der Untersuchungsfläche drei Messstandorte eingerichtet. Zwei von diesen, M1 und M2, wurden mit langsam ansprechenden Sensoren ausgestattet (für Mastmessungen von Wind, Temperatur, Feuchte, Druck, Globalstrahlung und Strahlungsbilanz in der Bodenschicht). Jede Messgröße wurde von Sensoren unterschiedlichen Typs erfasst, um deren Qualität in der Nachbearbeitung der Daten vergleichend bewerten zu können. Als Referenz für die Strahlungsbilanzmessung diente ein Kipp&Zonen CNR1, das einen Monat vor Messbeginn zur Kalibrierung im deutschen nationalen Strahlungszentrum in Lindenberg war. Der Bodenwärmestrom wurde mit einer selbstkalibrierenden Platte vom Typ HFP01SC der Firma Hukseflux bestimmt. Ein drittes System M3 wurde mit schnellen Sensoren ausgestattet, die eine direkte Bestimmung der turbulenten Flüsse mittels der Eddy-Kovarianz Methode ermöglichen. Dieser Messstandort M3 ist auf Abbildung 1 im Bildvordergrund zu sehen, während im Bildhintergrund der 15m-Profilmast M2 zu erkennen ist.



Abbildung 1: Turbulenzmesskomplex M3 mit METEK USA-1 Ultraschallanemometer und Campbell KH20 Kryptonhygrometer, 15m Profilmast M2 im Bildhintergrund auf dem Messfeld von NIMEX-1.

Die langsam ansprechenden Sensoren wurden jede Sekunde abgetastet, und die Messwerte wurden daraufhin als Mittelwerte über 1 Minute gespeichert. Der Turbulenzmesskomplex setzte sich aus einem Ultraschallanemometer (USA-1 der Firma METEK, Deutschland) und einem Krypton-Hygrometer (KH20 der Firma Campbell Scientific) zusammen. Das Ultraschallanemometer befand sich in einer Höhe 2,5 m und wurde mit 16Hz abgetastet, während das Kryptonhygrometer für die Messung der turbulenten Feuchtefluktuationen mit einer Frequenz von 8Hz abgetastet wurde. Die Daten dieser beiden Systeme wurden mit Hilfe von Laptops im Feld gespeichert. Die übrigen langsam ansprechenden Sensoren wurden auf Datenloggern der Firma Campbell Scientific aufgezeichnet (Modell CR10X). Es gab weniger als 10% Ausfallzeiten für die langsam ansprechenden Systeme. Die Datenaufzeichnung des Turbulenzmesskomplexes musste an einigen Tagen aufgrund von Gewitterstürmen unterbrochen werden.

2.2 DATENBEARBEITUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG

Die Programme zur Datenerfassung bzw. Reduzierung und auch zur Aufbereitung der Daten wurden von Wissenschaftlern von der Obafemi Awolowo University, Ile-Ife und der Universität Bayreuth entwickelt. Die Daten der langsam ansprechenden Sensoren wurden täglich gesichtet und einfachen visuellen Qualitätstests unterzogen (Foken, 2003). Zur Datenbearbeitung und Qualitätssicherung der Turbulenzdaten für die Eddy-Kovarianz Methode wurde ein Programmpaket (vgl. Mauder und Foken, 2004) verwendet, das die folgenden Prozeduren beinhaltet.

- Ausschluss von nicht plausiblen Messwerten für weitere Berechnungen.
- Identifizierung von Spikes nach Vickers und Mahrt (1997).
- Bestimmung der zeitlichen Verschiebung zwischen Ultraschallanemometer und Kryptonhygrometer durch Berechnung der Kreuzkorrelation.
- Querwindkorrektur der Schalltemperatur nach Liu et al. (2001)
- Planar Fit Methode zur Transformation des Koordinatensystems (Wilczak et al., 2001).
- Korrektur der Sauerstoffquerempfindlichkeit von Kryptonhygrometern (Tanner et al., 1993); (Dijk et al., 2003).

- Korrektur spektraler Verluste aufgrund von Messstreckenmittlung und Sensorseparation nach Moore (1986) unter Verwendung von Modellspektren von Kaimal et al. (1972) und Højstrup (1981).
- Umrechnung der Schalltemperaturfluktuationen in Fluktuationen der aktuellen Temperatur zur Bestimmung deren Varianz und Kovarianz nach Schotanus et al. (1983).
- Dichtekorrektur des Wasserdampfdruckes nach Webb et al. (1980) und Liebenthal & Foken (2003).
- Iteration der Korrekturschritte zur Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Abhängigkeit.
- Spektralanalyse und Bestimmung des kumulativen Integrals unter den Spektren, den so genannten Ogiven (Oncley, 1989).
- Qualitätskontrolle der berechneten turbulenten Flüsse nach Foken & Wichura (1996) und Foken et al. (2004).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Laufe der Intensivmessphase von NIMEX-1 gab es zwei unterschiedliche Wetterlagen. Die erste Hälfte des Messexperimentes war durch Winde aus südlichen Richtungen geprägt (Abbildung 2). Verbunden damit waren Tageshöchsttemperaturen von knapp 35° C und absolute Feuchten um 20 gm⁻³ (Abbildung 3).

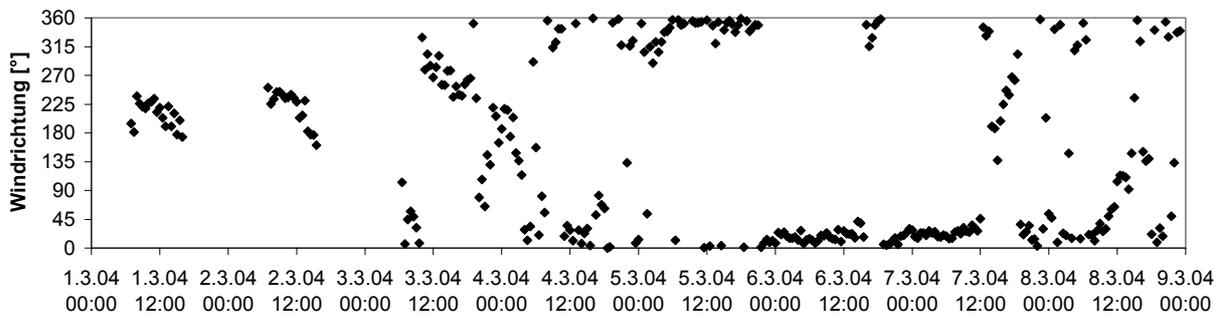


Abbildung 2: Windrichtung in 2.48 m über dem Messfeld von NIMEX-1 in Ile-Ife, Nigeria

Am 4.3.2004 drehte der Wind auf Nord (Abbildung 2). Die Temperaturen waren dann um einige wenige Grad niedriger. Dabei lagen die Werte für die absolute Feuchte mit Werten zwischen 5 und 10 gm⁻³ unter Nordwindbedingungen deutlich niedriger als zuvor (Abbildung 3).

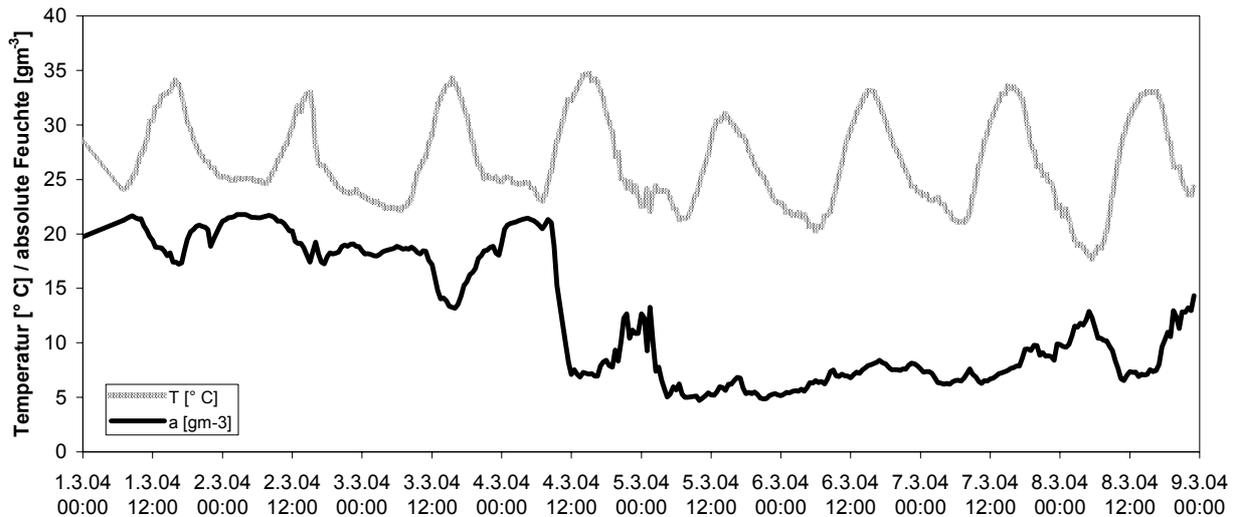


Abbildung 3: Temperatur und absolute Feuchte in 4.9 m über dem Messfeld von NIMEX-1 in Ile-Ife, Nigeria.

Dies führte zu einem etwa doppelt so hohen Sättigungsdefizit nach dem 4.3.2004 gegenüber vorher. Nachts wurde nun keine Sättigung der Luft mit Wasserdampf mehr erreicht. Das Sättigungsdefizit fiel in Zeit vom 5.3.2004 bis zum 7.3.2004 nicht unter 5 hPa (Abbildung 4). Zeitgleich mit dem Abfall der absoluten Luftfeuchte erhöhte sich der Anteil an Partikeln in der Luft drastisch, so dass die Sonne nur noch hinter einem Staubschleier sichtbar war. Die geografische Lage Nigerias zwischen der Sahara im Norden und dem Golf von Guinea im Süden erklärt dieses Wettergeschehen. Durch den Südwind werden feuchtwarmer Luftmassen vom atlantischen Ozean herangeführt. Von Norden her wird heiße trockene Luft advehiert, die aus der Sahara stammt. Dies lässt sich auch am extrem hohen Staubanteil erkennen. Solch ein staubiger Wind, der von der Sahara zur Westküste Afrikas weht, wird als *Harmattan* bezeichnet. Er tritt gewöhnlich während der Trockenzeit zwischen Anfang Dezember und Ende Februar auf.

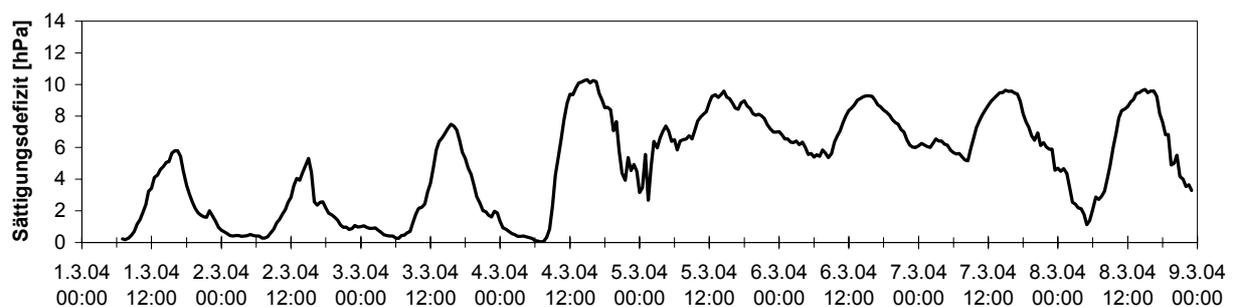


Abbildung 4: Sättigungsdefizit in 4.9 m über dem Messfeld von NIMEX-1 in Ile-Ife, Nigeria.

Von Beginn der Messungen bis zum 4.3.2004 traten immer wieder Wolken auf, was sich in gelegentlichen Einbrüchen der Strahlungsbilanzkurve widerspiegelt, die Maximalbeträge von fast 700 Wm^{-2} erreicht (Abbildung 5). Zwischen dem 5.3. und dem 8.3.2004 gleicht die Strahlungsbilanzkurve dagegen fast einer Glockenform. Die täglichen Maximalbeträge der Strahlungsbilanz liegen unter den Harmattan-Bedingungen nur noch bei etwa 450 bis 500 Wm^{-2} . Der Bodenwärmestrom an der Oberfläche folgt im Wesentlichen dem Verlauf der Strahlungsbilanzkurve. Auch diese Kurve ist in der zweiten Hälfte der ausgewählten Messperiode gleichmäßiger als in der ersten. Die täglichen Maxima des Bodenwärmestroms betragen vor dem 4.3.2004 etwa 180 Wm^{-2} . Ab dem 5.3.2004 erreichen sie nur noch Werte um 130 Wm^{-2} .

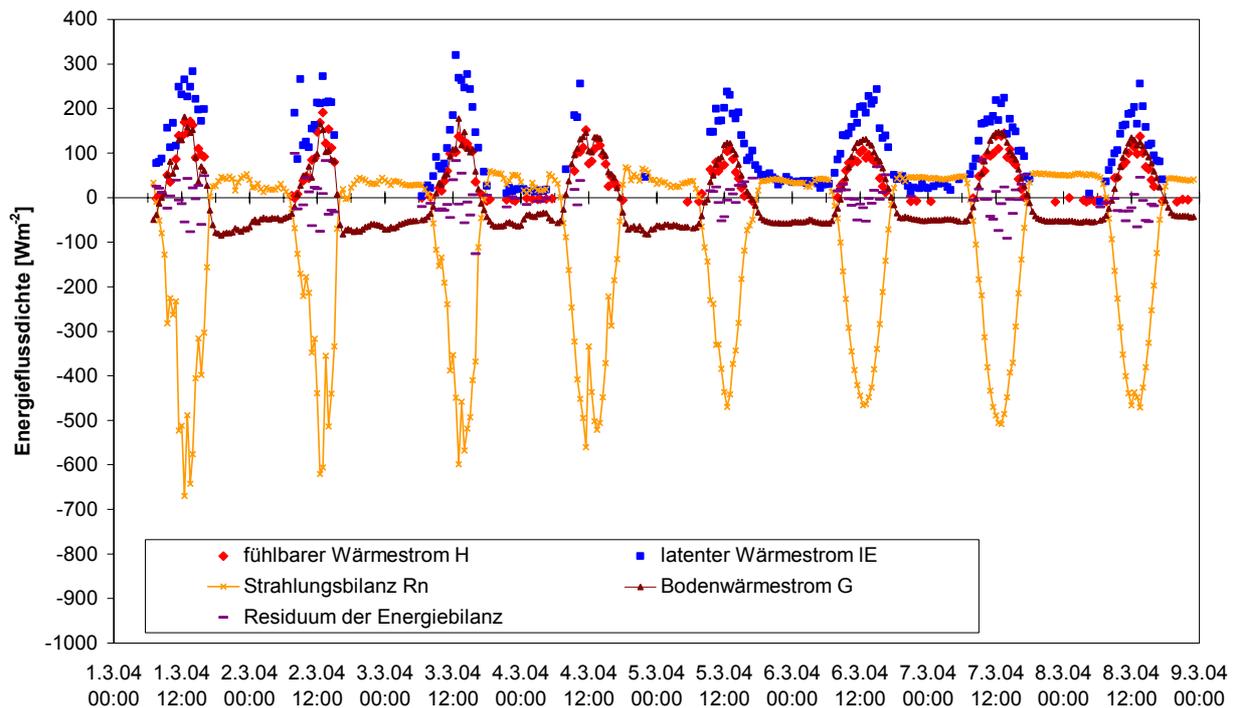


Abbildung 5: Ergebnisse der Energieflussmessungen am Messfeld von NIMEX-1 in Ile-Ife, Nigeria. Dargestellt sind nur turbulente Austauschströme der Qualitätsklassen 1-3 (höchste Qualität, für Grundlagenforschung geeignet).

Die turbulenten Energieaustauschströme wurden unter Tagbedingungen nach den durchgeführten Qualitätstests meist als für Grundlagenforschung geeignet befunden. Dieser Kategorie werden nur Werte höchster Qualität zugeordnet, was den Qualitätsflags 1 bis 3 entspricht. Kleine Beträge der turbulenten Flüsse führen in der Nacht häufig dazu, dass diesen Werten aufgrund des Tests auf integrale Turbulenzcharakteristika schlechtere Qualitätsflags zugeordnet werden.

Da in der zweiten Hälfte nach dem 4.3.2004 die für die turbulenten Flüsse verfügbare Energie um 100 Wm^{-2} bis 150 Wm^{-2} geringer war als zuvor, liegen die Maxima des fühlbaren und latenten Wärmestroms ebenfalls entsprechend niedriger. Die Maxima des latenten Wärmestroms nehmen von etwa 300 Wm^{-2} auf Werte zwischen 200 und 230 Wm^{-2} ab. Der fühlbare Wärmestrom erreicht vor dem 4.3.2004 Werte von maximal 190 Wm^{-2} gegenüber Maximalwerten zwischen 100 und 140 Wm^{-2} danach. Ebenso ist in Abbildung 5 zu erkennen, dass die Werte für den latenten Wärmestrom unter Harmattan-Bedingungen in der Nacht nicht auf null zurückgehen, sondern Werte um 40 Wm^{-2} behalten. Dies ist durch die Advektion einer Luftmasse mit vergleichsweise hohem Sättigungsdefizit von mehr als 5 hPa zu begründen (Abbildung 4).

Da alle Terme der Energiebilanz am Erdboden bei NIMEX-1 direkt gemessen wurden, ist es möglich, das Residuum der Energiebilanz zu bestimmen.

$$\text{Residuum} = R_n + G + H + \lambda E$$

Bemerkenswert ist, dass für den Datensatz von NIMEX-1 keine systematische Schließungslücke der Energiebilanz zu verzeichnen ist. Das Residuum streut lediglich um die Nulllinie. Bei früheren Experimenten, die allerdings außerhalb der tropischen Breiten durchgeführt wurden, beträgt das Residuum der Energiebilanz oft 10% bis 20% der Strahlungsbilanz (Foken und Oncley, 1995).

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Durch die sehr gute Zusammenarbeit der Obafemi Awolowo University, Ile-Ife (Nigeria) und der Universität Bayreuth wurde bei dem Feldexperiment NIMEX-1 ein Datensatz direkter Messungen aller Terme der Energiebilanz an der Erdoberfläche von hoher Qualität in den tropischen Breiten Afrikas gemessen. Durch diese Messungen wurden verschiedene an der afrikanischen Westküste während des Übergangs von der Trocken- zur Regenzeit typische Wettersituationen abgedeckt. Dieser Datensatz kann dazu dienen, die Qualität verschiedener einfacher Messmethoden der Energieaustauschströme zu evaluieren und verfügbare Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Evapotranspiration und Strahlung aus meteorologischen Standardmessungen für die tropischen Bedingungen Afrikas zu validieren.

Bei NIMEX-1 konnte keine systematische Nichtschließung der Energiebilanz festgestellt werden. Eine tiefer gehende Analyse dieses Datensatzes, zum Beispiel der besonderen turbulenten Austauschbedingungen bei NIMEX-1, kann möglicherweise weitere Fortschritte im Hinblick auf die experimentelle Schließung der Energiebilanz an der Erdoberfläche bringen. Außerdem ist geplant, den NIMEX-1 Datensatz zur Validierung eines vom Coriolis-Parameter abhängigen Modells zur Bestimmung integraler Turbulenzcharakteristika unter nahezu neutralen Schichtungsbedingungen zu verwenden (Thomas und Foken, 2002).

LITERATUR

- Dijk, A.v., Kohsiek, W. und DeBruin, H.A.R., 2003. Oxygen sensitivity of krypton and Lyman-alpha hygrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 143-151.
- Foken, T., 2003. *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Heidelberg, 289 pp.
- Foken, T., Göckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B.D. und Munger, J.W., 2004. Post-field data quality control. In: X. Lee (Editor), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer, Dordrecht, pp. 81-108 in print.
- Foken, T. und Oncley, S.P., 1995. Results of the workshop 'Instrumental and methodical problems of land surface flux measurements'. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76: 1191-1193.
- Foken, T. und Wichura, B., 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 83-105.
- Højstrup, J., 1981. A simple model for the adjustment of velocity spectra in unstable conditions downstream of an abrupt change in roughness and heat flux. *Boundary-Layer Meteorology*, 21: 341-356.
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. und Coté, O.R., 1972. Spectral characteristics of surface layer turbulence. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 98: 563-589.
- 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.
- Mauder, M. und Foken, T., 2004. Qualitätssicherung der Energieflussmessungen für LITFASS-2003, DACH-Tagung 2004. Karlsruhe, Poster P5.28.
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 37: 17-35.
- Oncley, S.P., 1989. Flux parametrization techniques in the atmospheric surface layer. Diss. Thesis, University of California, Irvine CA, 202 pp.

- 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: R.G. Allen (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.
- Vickers, D. und Mahrt, L., 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14: 512-526.
- 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.