

OBERSEMINAR TU BERGAKADEMIE FREIBERG

BESTIMMUNG DER REELLEN VERDUNSTUNG MITTELS EDDY-FLUX-ANLAGE

1. Einführung: Hydrogeologisches Versuchsfeld an der TU Freiberg

Im Herbst 2001 wurde auf dem Gelände der TU Bergakademie Freiberg ein hydrogeologisches Versuchsfeld durch die "Fa. Ecotech, Bonn" installiert. Die offizielle Inbetriebnahme fand am 17. Mai 2002 statt. Zum Versuchsfeld gehören insgesamt sechs Brunnen mit automatisch aufzeichnenden Sonden, eine Unterwasserbohrlochkamera, ein Pump- und Probenahmesystem, eine meteorologische Station, eine Bodensickerwassergewinnungsanlage, Tensiometer und FDR-Sonden, eine Eddy-Flux-Anlage und ein CO₂-Bodenluft-Meßsystem. Die Anlage wurde anteilig finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Land Sachsen. Abbildung 1 liefert einen schematischen Überblick über das Messfeld.

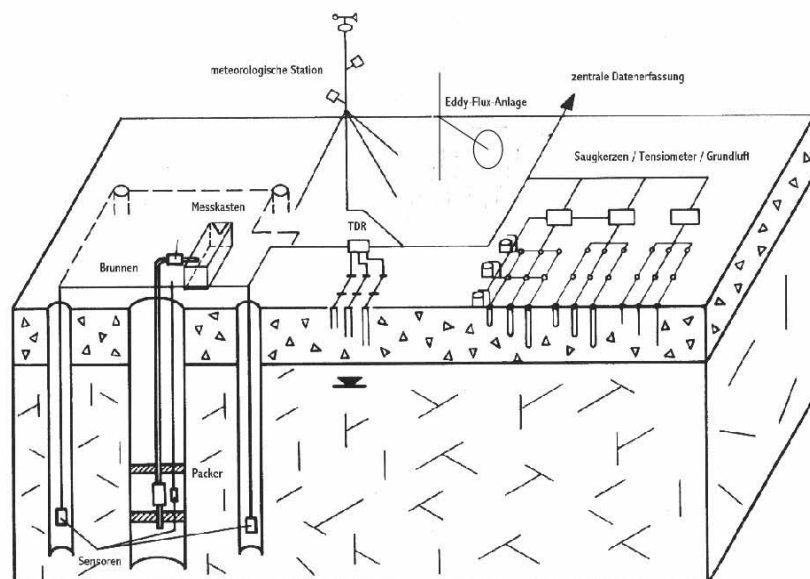


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Messfeldes der TU Bergakademie Freiberg

Abbildung 2 zeigt nochmals die Dimensionen des Versuchsfeldes auf dem Gelände der TU Bergakademie Freiberg.



Abb. 2: Blick auf einen Teil des hydrogeologischen Versuchsfeldes der TU Bergakademie Freiberg.

2. Verdunstungsmessung

2.1. Methoden

Die Verdunstung gehört neben Niederschlag, Abfluss, Speicherung im Boden und atmosphärischen Wassertransport zu den entscheidenden Größen einer Wasserbilanz. Durch den Prozess der Verdunstung wird der Atmosphäre Wasserdampf zugeführt. Die dazu notwendige Energie wird durch auf die Erdoberfläche eintreffende Sonneneinstrahlung zur Verfügung gestellt. In Prozess der Verdunstung wird somit Energie verwendet um Wasser von seinen flüssigen zum gasförmigen Aggregatzustand zu verändern. Dadurch wird Energie von der Erdoberfläche wieder in die Atmosphäre transportiert.

Die Verdunstung, oder auch Evapotranspiration, setzt sich aus Evaporation, Interception und Transpiration zusammen. Dabei umfasst die Evaporation die physikalische Verdunstung von unbewachsenen Boden und die Interzeptionsverdunstung, während die Transpiration nur die Abgabe von Wasserdampf durch die Spaltöffnungen von Pflanzen umfasst. Des Weiteren unterscheidet man bei der Summe aus beiden, der Evapotranspiration, zwischen reeller und potentieller Evapotranspiration. Dabei ist die reelle Evapotranspiration die tatsächlich an einen Standort zu verzeichnende Verdunstung. Dagegen definiert die potentielle Verdunstung die maximale Verdunstung, welche mit der zur Verfügung stehenden Energie, bei unbegrenzter Wasserversorgung, unter dem herrschenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre auftreten könnte (FRÜHAUF 1998). Die reelle Verdunstung ist vorwiegend bei der Berechnung der Grundwasserneubildungsrate von großer Bedeutung um Sickerwassermengen zum Grundwasser zu ermitteln. Außerdem ist die Bestimmung der reellen Verdunstung notwendig bei Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt, oder bei Fragen der Berechnungswürdigkeit landwirtschaftlicher Flächen, oder für Wachstum- und Ertragsprognosen in der Land- und Forstwirtschaft. Zudem können durch Messung der reellen Verdunstung Auswirkungen anthropogener Landnutzungsänderungen direkt quantifiziert werden.

Die Palette zur Bestimmung der Evapotranspiration ist sehr umfangreich und Methoden welche sich hinsichtlich ihrer Eingangsgrößen, ihrer Anwendbarkeit (zeitlich und räumlich), ihrer Genauigkeit aufgrund der gemachten Annahmen, dem Messaufwand und den Messgeräten unterscheiden. Des Weiteren muss zwischen indirekten und direkten Methoden zur Bestimmung der Verdunstung unterschieden werden. Man unterscheidet grundsätzlich zwei praktikable Meßmethoden: die Wasserbilanzmethoden, und die Energiebilanzmethoden (Wärmehaushaltmethoden), welche jedoch selten angewendet werden. Die Wasserbilanzmethode basiert dabei auf einer Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung, während die Wärmehaushaltsmethode auf einer Anwendung der Energiebilanzgleichung basiert. Die am häufigsten verwendete Wasserhaushaltsmethode zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung ist die Messung mittels Verdunstungskessel (class a pan). Außerdem kann die potentielle Verdunstung mittels Floßverdunstungskessel auf freien Wasserflächen gemessen werden. Zudem existiert eine Vielzahl von empirischen und physikalisch-halbempirischen Formeln zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration, wie z.B. die PENMAN-Formel, die TURC-Formel (oft auch in Kombination mit der IVANOV-Formel), und die HAUDE-Formel, die zum Teil sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Methoden zur direkten Messung der reellen Evapotranspiration sind das Lysimeter und die Eddy-Flux-Anlage. Tabelle 1 zeigt abschließend einen Überblick über einige Bestimmungsmethoden der Verdunstung.

Tab. 1: Auswahl von Bestimmungsmethoden der Evapotranspiration

Typ	Methoden
Wasserbilanzierung	<ul style="list-style-type: none"> • Verdunstungskessel (class A pan) • Floßverdunstungskessel • Lysimeter • Piche – Atmometer • Tensiometer • TDR / FDR
Empirische Formeln	<ul style="list-style-type: none"> • PENMAN-Formel • TURC-Formel • IVANOV-Formel • HAUDE-Formel • ...
Energiebilanzierung	<ul style="list-style-type: none"> • Eddy-Kovarianz (Eddy-Flux) • Bowen-Verhältnis
Pflanzenphysiologie (nur Transpiration)	<ul style="list-style-type: none"> • Kammermessungen • Xylemflußmessungen • Dendrometermessungen

2.2. Eddy-Kovarianz-Methode

Die Eddy-Kovarianz-Methode ist die am meisten verwendete mikrometeorologische Methode zur Bestimmung der realen Verdunstung, da es sich um eine direkte Messung mit einem Minimum an Annahmen handelt (FRÜHAUF 1998). Im Folgenden soll detaillierter auf die Bestimmung der realen Verdunstung mittels Eddy-Flux bzw. Eddy-Kovarianz eingegangen werden.

2.2.1. Theoretische Grundlagen der Eddy-Kovarianz-Methode

Die Methode beruht auf der Annahme, dass jeglicher Transport von Wärme, Feuchtigkeit, Momentum, und Verschmutzungen zwischen bodennaher Grenzschicht und Atmosphäre durch turbulenten Austausch vonstattengeht. Diese räumlich begrenzten Turbulenzen werden auch Eddies genannt. Diese Wirbel bilden die Basis für zum Beispiel Wärme- oder Feuchtigkeitsaustausch zwischen tiefer und höher gelegenen Luftschichten. Mit der Eddy-Kovarianz-Methode wird die Verdunstung auf Grundlage dieses vertikalen Wasserdampfstroms ermittelt.

Auf Basis der Reynolds-Zerlegung ist es möglich den turbulenten Transport zu quantifizieren. Demnach kann jedes Signal (Variable) in durchschnittliche und in turbulente Teile zerlegt werden. Für eine beliebige Variable x hat dies folgendes Aussehen:

$$x = \bar{x} + x'$$

wobei \bar{x} der Mittelwert der Variablen über einen bestimmten Zeitraum und x' die momentane Abweichung von diesem Mittelwert ist. Bildet man das Produkt von zwei Variablen, hier x und s , so folgt:

$$sx = (\bar{s} + s')(\bar{x} + x') = \bar{s}\bar{x} + \bar{s}x' + s'\bar{x} + s'x'$$

Bildet man davon den Mittelwert ergibt sich:

$$\overline{sx} = \overline{\bar{s}\bar{x}} + \overline{\bar{s}x'} + \overline{s'\bar{x}} + \overline{s'x'}$$

Davon ausgehend, dass der Mittelwert der Fluktuationen $\overline{s'} = 0$ und $\overline{x'} = 0$ ist, fallen der zweite und der dritte Term der Gleichung weg und die Gleichung vereinfacht sich zu:

$$\overline{sx} = \overline{\bar{s}\bar{x}} + \overline{s'x'}$$

wobei $\overline{s'x'}$ die Kovarianz ist. Zurückkommend zu einem Eddy (Wirbel), so wird dieser durch drei Variablen bestimmt:

- seine Masse (bzw. bei Betrachtung eines Einheitsvolumens: seine Dichte ρ)
 \Rightarrow Luftdichte
- seine vertikale Geschwindigkeit ω
 \Rightarrow Windgeschwindigkeit in Richtung z
- der volumetrische Gehalt der Beimengung s
 \Rightarrow spezifische Feuchte q

Durch Anwendung der Reynolds-Zerlegung auf diese drei Merkmale, kann die mittlere vertikale Flussdichte der Beimengung, welche der Evapotranspiration ETP entspricht, geschrieben werden als:

$$ETP = \overline{(\bar{\rho} + \rho')(\bar{\omega} + \omega')(\bar{q} + q')}$$

wobei nach Ausmultiplikation der einzelnen Merkmale sich folgendes ergibt:

$$ETP = (\underbrace{\overline{\overline{\rho\omega q}}}_1 + \underbrace{\overline{\overline{\rho\omega q'}}}_2 + \underbrace{\overline{\overline{\rho\omega'q}}}_3 + \underbrace{\overline{\overline{\rho\omega'q'}}}_4 + \underbrace{\overline{\overline{\rho'\omega q}}}_5 + \underbrace{\overline{\overline{\rho'\omega q'}}}_6 + \underbrace{\overline{\overline{\rho'\omega'q}}}_7 + \underbrace{\overline{\overline{\rho'\omega'q'}}}_8)$$

Diese Gleichung kann jedoch vereinfacht werden durch folgende Annahmen:

- ⇒ Alle Terme, die nur eine fluktuierende Variable enthalten, können entfernt werden, da das Mittel über ihnen Null ist und somit der gesamte Term auch Null wird → Terme 2, 3, 5
- ⇒ Terme, die den fluktuierenden Anteil der Luftdichte ρ enthalten, können vernachlässigt werden, da die Luftdichte annähernd zeitkonstant innerhalb der unteren Atmosphäre angenommen werden kann → Terme 5, 6, 7, 8
- ⇒ Werden nur homogene Gebiete, ohne Stellen die vertikale Bewegungen begünstigen untersucht, können Terme, die die mittlere vertikale Geschwindigkeit enthalten, vernachlässigt werden (vertikaler Wärmestrom verursacht keinen aufwärts gerichteten Wind) → Terme 1, 2, 5, 6

Dadurch erhält man:

$$ETP = \overline{\rho\omega'q'}$$

wobei die Mittelstriche über ρ unter der Annahme der Konstanz der Luftdichte weggelassen werden können (FRÜHAUF 1998).

Allgemeine Voraussetzungen für die Anwendbarkeit sind (FRÜHAUF 1998):

- ein homogener Zustand der atmosphärischen Turbulenz, um eine Unterteilung in mittlere und fluktuierende Größe zu gewährleisten
- höhenkonstante Energieaustauschströme, um die in der Höhe gemessenen Werte denen zwischen Unterlage und Atmosphäre gleichsetzen zu können
- statistische Unabhängigkeit der beiden zu korrelierenden Größen

2.2.2. Messtechnik

Wie vorausgehend erläutert ergibt sich der vertikale Wasserdampfstrom aus den zeitlichen Mittel des Produkts der Fluktuationen von vertikaler Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte. In Folgenden soll genauer erläutert werden mit welchen Messgeräten die Messung dieser beiden Komponenten erfolgt. Die Eddy-Flux-Methode stellt sehr hohe Anforderungen an die Messtechnik, da der Frequenzbereich in dem die Fluktuationen auftreten breit ist (Sekunden – Minuten). Daher müssen die Sensoren erstens über eine ausreichend hohe Auflösung verfügen, und zweitens muss die Messperiode lang genug sein, um eine komplette statistische Stichprobe der niedrigen Frequenzen zu erhalten (FRÜHAUF 1998). Bei der Messung mit der Eddy-Flux-Anlage an der TU Bergakademie Freiberg wird eine Messfrequenz von 10 Hz und 10-minütige Mittelungsintervalle verwendet.

2.2.2.1. Messung der vertikalen Windgeschwindigkeit

Innerhalb des hydrogeologischen Versuchsfeldes an der TU Bergakademie Freiberg wird ein Ultraschallanemometer des Typs USA 1 Standard der Firma Metek verwendet um die drei Windkomponenten u , v und w zu messen. Im nächsten Abschnitt wird genauer auf den Messaufbau des Anemometers, und im zweiten Abschnitt auf dessen Messprinzip eingegangen.

2.2.2.1.1. Messaufbau

Der prinzipielle Aufbau des Anemometer USA 1 ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Am Gerät sind sechs Sensorköpfe angebracht, wobei sich jeweils zwei Sensorköpfe genau gegenüber stehen. Es handelt sich dabei um ein für 120° rotationssymmetrisches Gerät bei dem die drei Pfade nicht orthogonal angelegt sind. In jeden Sensorkopf befindet sich ein Sender und ein Empfänger um Ultraschallimpulse zu senden und zu empfangen. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger beträgt jeweils 175 mm.

Der Vorteil gegenüber konventionellen Windmessgeräten besteht darin, dass die Messung nicht über bewegliche Teile erfolgt, die sonst oft mechanische Probleme zur Folge haben. Außerdem können auch Windkomponenten mit kleinen oder sehr hohen Windgeschwindigkeiten zufriedenstellend gemessen werden (0 – 50 m/s). Die Anlage erlaubt eine Datenaufzeichnung mit einer Messfrequenz (Abtastrate) zwischen 0.1 und 25 Hz. Online können neben den Windgeschwindigkeitskomponenten in x , y und z -Richtung auch die Temperatur (-30°C – 50°C) gemessen werden. Dabei transformiert der Prozessor des

Gerätes direkt die gemessenen Windvektoren in ein x, y, z – Koordinatensystem. Insgesamt kann das Gerät 16383 normale Datensätze aufzeichnen, oder 2047 Datensätze bei denen zugleich weitere Größen wie Standardabweichungen, Kovarianzen der x, y und z -Komponenten berechnet werden. Zudem kann das Gerät auch Kovarianzen mit weiteren Input-Kanälen, wie zum Beispiel von der Luftfeuchte-Messung, berechnen.

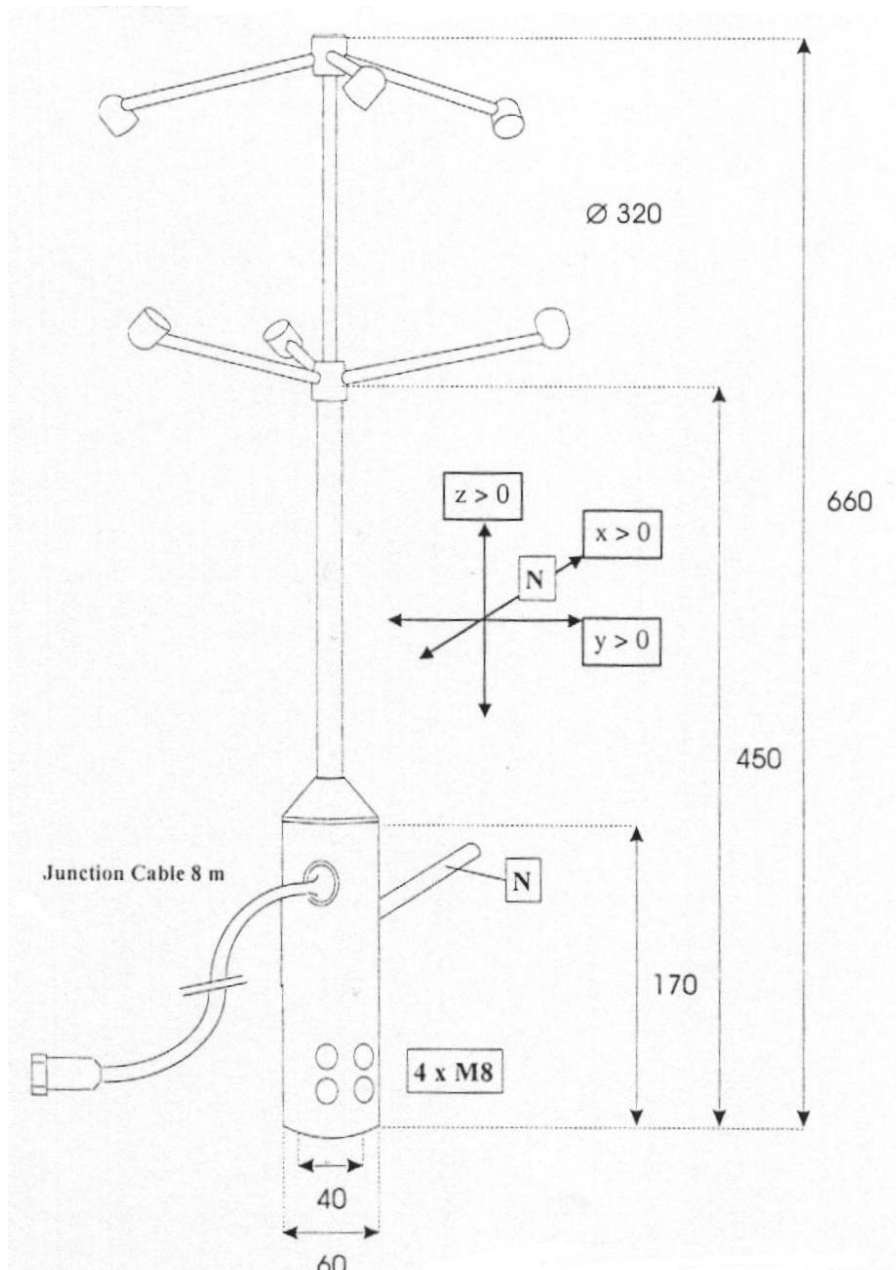


Abb. 3: Schematischer Aufbau des USA-1 Sensors (USA-1 User Manual).

2.2.2.1.2. Messprinzip

Die Bestimmung des Windgeschwindigkeitskomponenten erfolgt mit Hilfe des Laufzeitverfahrens. Wie bereits erwähnt befinden sich in jeden Sensorkopf ein Empfänger

und ein Sender. Abwechselnd werden nun von jeweils zwei sich gegenüberliegenden Sensorköpfen Ultraschallimpulse gesendet und empfangen. Die gemessenen Laufzeiten zwischen den Sensoren sind neben der Schallgeschwindigkeit c in ruhender Luft von der Geschwindigkeit v abhängig, mit der sich die Luft bewegt. Die schematische Abfolge eines zweier solcher gesendeten Ultraschallimpulse ist in Abbildung 4 gezeigt.

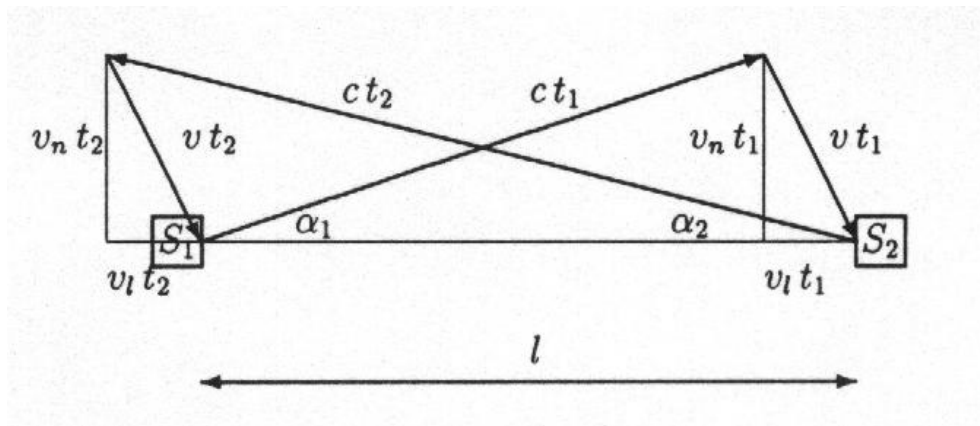


Abb. 4: Schematische Darstellung der Fortbewegungskomponenten der gesendeten Ultraschallimpulse (FRÜHAUF 1998).

Von Sensor S_1 ausgehend legt der erste Impuls in Richtung S_2 mit der Schallgeschwindigkeit c in der Zeit t_1 die Strecke ct_1 zurück. Eine zusätzliche Verlängerung des Weges erfolgt jedoch um die Strecke vt_1 , da sich die Luft zudem noch mit der Geschwindigkeit v fortbewegt. Danach wird die Laufzeit t_1 des ersten Impulses registriert. Nun wird zweitens noch ein Impuls von Sender S_2 in Richtung des Empfängers S_1 ausgesendet. Auch für diesen Impuls wird analog zum ersten Impuls die Laufzeit t_2 registriert. Da bei kurzer zeitlicher Aufeinanderfolge der Messung der Laufzeiten t_1 und t_2 davon ausgegangen werden kann, dass die Luftgeschwindigkeit v annähernd konstant bleibt, so ist auch $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Für das rechtwinklige Dreieck in Abbildung 4 mit den Seiten ct_1 , $v_n t_1$ und $l - v_l t_1$ ergibt sich folgende Beziehung:

$$\cos \alpha = \frac{l - v_l t_1}{ct_1}$$

Stellt man diese Gleichung nach t_1 um ergibt sich folgendes:

$$t_1 = \frac{l}{c \cos \alpha + v_l}$$

In der selben Weise lässt sich für t_2 folgende Beziehung aufstellen:

$$t_2 = \frac{l}{c \cos \alpha - v_l}$$

Kombiniert man die beiden letzten Gleichungen so ergibt sich eine Bestimmungsgleichung für die Geschwindigkeit v_l entlang des Weges l , die nur von den Laufzeiten t_1 und t_2 , und der Länge des Messweges, l , abhängig ist:

$$v_l = \frac{l}{2} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2}$$

Werden nun alle drei Messwege zwischen den 6 Sensoren des Gerätes kombiniert so können davon die horizontalen Windgeschwindigkeiten u und v und die vertikale Windgeschwindigkeit w bestimmt werden (FRÜHAUF 1998).

2.2.2.2. Messung der Luftfeuchte

Zur Messung der Luftfeuchte (Wasserdampfgehalt der Luft) wird im hydrogeologischen Messfeld der TU Bergakademie Freiberg ein Infrarot-Hygrometer des Typs Licor LI-7500 verwendet. Im den folgenden zwei Abschnitten werden der Geräteaufbau und das Messprinzip der Anlage genauer betrachtet.

2.2.2.2.1. Messaufbau

In Abbildung 5 ist der Aufbau des Gasanalysators schematisch dargestellt. Das Gerät kann genutzt werden um Partialdrücke von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid in Luft zu messen. Das LI-7500 hat eine Länge von 30 cm und der Sensorkopf am oberen Ende des Hygrometers hat einen Durchmesser von 6.5 cm. Dieser Sensorkopf kann in jede beliebige Richtung gerichtet werden ohne dass die Genauigkeit der Messergebnisse beeinflusst wird. Das Hygrometer sollte jedoch möglichst nah an das zuvor beschriebene Anemometer angebracht sein damit bei beiden Messungen auch vom selben Mikroklima ausgegangen werden kann.

Die Messung der Wasser- bzw. Kohlendioxidgehalte in der Luft erfolgt entlang eines 12.5 cm langen offenen Messpfades. Die von der Infrarot-Quelle im unteren Teil des Gerätes emittierte Infrarot-Strahlung geht durch ein Rotor-Filter-Rad und danach durch eine Sammellinse hindurch. Diese bündelt die erzeugte Infrarot-Strahlung zu einem 1 cm im Durchmesser starken optischen Strahl, welcher entlang des Messweges bis zu einen Blei-Selen-Detektor im oberen Teil des LI-7500 verläuft. Die Fenster an beiden Enden des

Messpfades sind aus Saphiren gefertigt und schützen somit die Messelektronik im Inneren des Gerätes vor Verunreinigungen. Das komplette Messgerät ist auch an sich wasserdicht und erlaubt Messungen in einen Temperaturbereich zwischen -25 und 50°C . Wählbare Ausgabebandweiten der Messdaten sind 5, 10, oder 20 Hz. Die Messdaten des Gerätes können über eine analoge Verbindung auch an das Anemometer weitergeleitet werden, welches dann direkt von beiden Messwerten die Kovarianz berechnet.

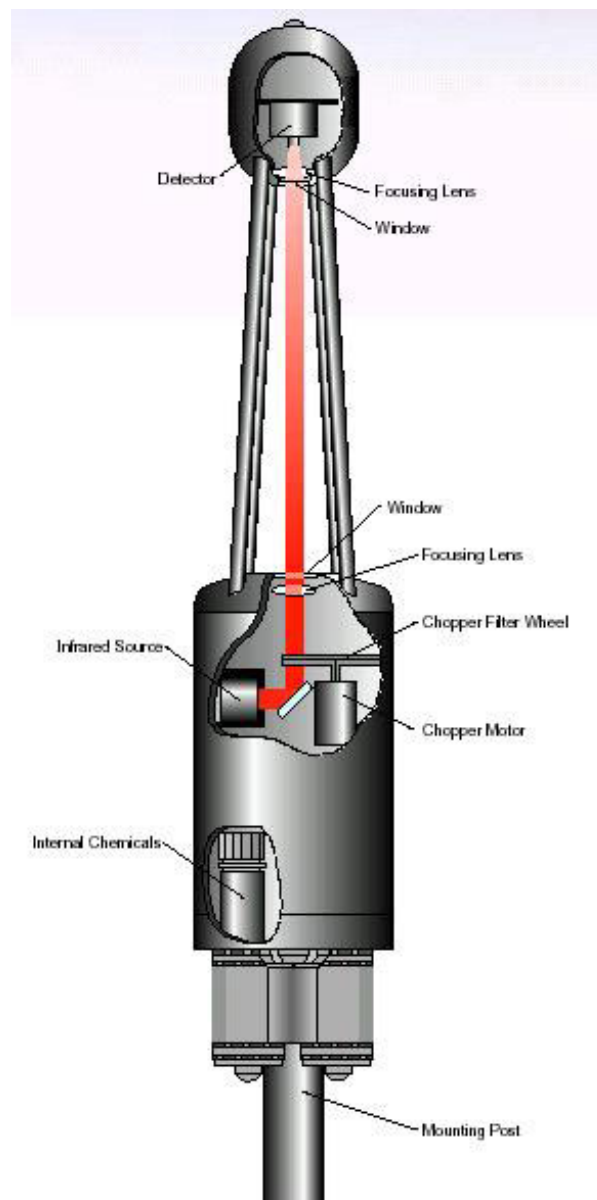


Abb. 5: Schematischer Aufbau des LI-7500 Sensors (LI-7500 Product Information).

2.2.2.2. Messprinzip

Die Bestimmung des Wasserdampfgehalts in der Luft erfolgt auf Grundlage der Jaimeson-Gesetzes, welches die Abhängigkeit der Stärke der Absorption von Infrarot-Strahlung vom

Gas-Gehalt beschreibt. Die Menge eines bestimmten Gases, u_i [mol/m²], welches als Absorber wirkt und die Stärke der Absorption einer bestimmten Wellenlänge, α_i , sind verbunden durch eine Funktion $h_i()$:

$$\frac{\alpha_i}{P_{ei}} = h_i \left(\frac{u_i}{P_{ei}} \right)$$

wobei die Fußnote i für ein bestimmtes Gas und P_{ei} der equivalente Gasdruck des Gases i ist. Der equivalente Gasdruck vom Gas i ist verschieden vom totalen Gasdruck des Gases i wenn andere Gase vorhanden sind, die die Absorptionseigenschaften des Gases i beeinflussen. Dieses Gesetz kann in Bezug auf die Dichte umgeschrieben werden, unter Beachtung der Messpfadlänge λ , wobei $u_i = \rho_i \lambda$ gilt:

$$\rho_i = \frac{P_{ei}}{\lambda} h_i^{-1} \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}} \right)$$

Schreibt man diese Gleichung speziell für Wasser auf und kombiniert außerdem λ und die Funktion h_i^{-1} zu einer neuen Funktion $f_w()$, dann ergibt sich:

$$\rho_w = P f_w \left(\frac{\alpha_w S_w}{P} \right)$$

wobei davon ausgegangen wird, dass $P_{ew} = P$ ist, da die Absorptionseigenschaften von Wasser nur unsignifikant von anderen Gasen beeinflusst werden. Werte der Funktion f_w und der sogenannten Span, S_w , müssen zuvor durch Kalibrierung bestimmt werden.

Die Absorption α_i einer bestimmten Strahlung Φ durch ein bestimmtes Gas i über eine bestimmte Messstrecke hinweg, mit der Annahme, dass keine Reflektion auftritt, kann beschrieben werden durch:

$$\alpha_i = 1 - \tau_i = 1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_o}$$

wobei τ_i das Verhältnis von übertragener Strahlung Φ_i einer bestimmten Wellenlänge bei einer bestimmten Konzentration des Gases i zur übertragenen Strahlung Φ_o derselben Wellenlänge bei einer Konzentration Null des Gases i ist. Das LI-7500 berechnet die Stärke

der Absorbierung über eine Näherung mit den gemessenen empfangenen Energien, A , der emittierten Strahlungen:

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{A_i}{A_{io}} \right)$$

Das LI-7500 misst A_i und A_{io} abwechselnd 152 mal pro Sekunde. Die entgültige Formel zu Berechnung der Absorption von Wasser α_w ist:

$$\alpha_w = \left(1 - \left[\frac{A_w}{A_{wo}} + X_{cw} \left[1 - \frac{A_c}{A_{co}} \right] \right] \right) (Z_{wo} + Z_w V_d)$$

Dabei werden zwei Faktoren verwendet, die durch Kalibrierung bestimmt werden müssen, da sie von Gerät zu Gerät verschieden sind. Die sogenannte cross sensitivity, X_{cw} , beschreibt die Abhängigkeit der Fähigkeit von Wasser [w] Strahlung bestimmter Wellenlänge zu absorbieren vom Vorhandensein von Kohlendioxid [c]. Zweitens beschreibt der Term $Z_w = Z_{wo} + Z_w V_d$, der sogenannte zero-drift, die Abhängigkeit der Funktionsweise des Detektors von leichten Temperaturschwankungen.

2.2.3. Tutorial

2.2.3.1. Erstellen und Abspeichern von Datensätzen

Zur voll funktionsfähigen Eddy-Flux-Anlage gehören ein installiertes Anemometer USA-1 und ein Hygrometer LI-7500. Die Abstand zwischen beiden Messanlagen sollte möglichst minimal sein (<20 cm Entfernung). Der Untergrund sollte eben und ohne große Hindernisse sein. Diese Voraussetzungen sind am Messfeld an der TU Bergakademie Freiberg gegeben so dass keine Korrektur der berechneten reellen Verdunstungen nötig ist. Abbildung 6 zeigt die von der Firma "ecotech" fertig installierte Eddy-Flux-Anlage an der TU Bergakademie Freiberg.

Die Erstellung einer Verbindung zum Anemometer erfolgt mittels "**HYPER TERMINAL**". Vor Start einer Messreihe müssen Messfrequenz und Mittlungsintervall eingestellt werden. Das Setzen der Messfrequenz erfolgt im **HYPER TERMINAL** mit dem Befehl "**SF={Messfrequenz}**". Im Falle der Messanlage an der TUBAF wurde dementsprechend die Messfrequenz auf 10 Hz mit folgender Eingabe: "**SF=10000**" gestellt. Zweitens kann das Mittlungsintervall mittels des Befehles "**AT={Mittlungsintervall in Sekunden}**" eingestellt

werden. Am Beispiel der installierten Anlage in Freiberg wurde ein Mittlungsintervall von 10 Minuten mittels **“AT=600“** eingestellt. Um nun Daten mittels Datenlogger zu speichern muss vor Beginn der Messreihe der Datenlogger selbst mittels dem Befehl **“LD=1“** gestartet werden.

Zweitens muss zur Erleichterung der Datenauswertung darauf geachtet werden, dass der Datenausgang der Luftfeuchte vom Hygrometers direkt mit einem der 8 analogen Input-Kanäle des Anemometers verbunden ist. Dann berechnet der Prozessor des Anemometers selbständig sofort die zur Verdunstungsberechnung gesuchte Kovarianz zwischen gemessener vertikaler Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte (Input-Kanal). An der Eddy-Flux-Anlage der TUBAF wurde von Firma *“ecotech“* der Datenausgang der gemessenen Luftfeuchte vom Hygrometers mit dem analogen Inputkanal **“6“** des Anemometers verbunden.

Der jeweils älteste noch nicht übertragene Messdatensatz kann jederzeit im HYPER TERMINAL mittels **“RL“** Befehl runtergeladen werden. Abbildung 7 zeigt das Aussehen eines solchen Datensatzes nach Übertragung auf das HYPER TERMINAL. Von dort aus kann der Datensatz einfach mittels „Kopieren“ und „Einfügen“ nach EXCEL oder in jedes andere beliebige Datenverarbeitungsprogramm kopiert werden.

Wie zuvor erwähnt kann der Datenlogger des Anemometers 2047 komplette Datensätze speichern. Bei zuvor eingestellten Mittlungsintervall von 10 Minuten würde der Datenlogger somit Daten für etwas mehr als 14 Tage speichern können. Danach würde er, bei vollen Speicher, beginnen den jeweils ältesten Datensatz zu überschreiben. Es ist somit sinnvoll die gespeicherten Daten mindestens einmal in zwei Wochen komplett vom Datenlogger runterzuladen.

Dazu muss zuvor das mit dem Anemometer mitgelieferte DOS-Programm **“Icopy“** installiert werden. Dieses kann danach vom Installationsordner aus in der MS-DOS

Eingabeaufforderung mittels folgender Befehlsfolge gestartet werden:

“Icopy {/b baudrate} {/d dial} {/s} outfile line“. An der TUBAF werden die Daten mit einer Übertragungsrate von 9600 über die Übertragungsverbindung com8 übertragen und hier beim folgenden Beispiel im Outputfile **“nov_wo48.txt“** mit folgendem Befehl gespeichert:

“Icopy /b 9600 “C:/Programme/EddyFlux/nov_wo48.txt“ com8“. Dieser Schritt ist zusätzlich in Abbildung 8 dargestellt. Die Daten werden in ein txt – File gespeichert, welches später weiterverarbeitet werden kann. Die Datensätze enthalten wie vorher erwähnt bereits die berechnete Kovarianz von vertikaler Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte.



Abb. 6: Installierte Eddy-Flux-Anlage der TU Bergakademie Freiberg (links: Hygrometer, rechts: Anemometer).

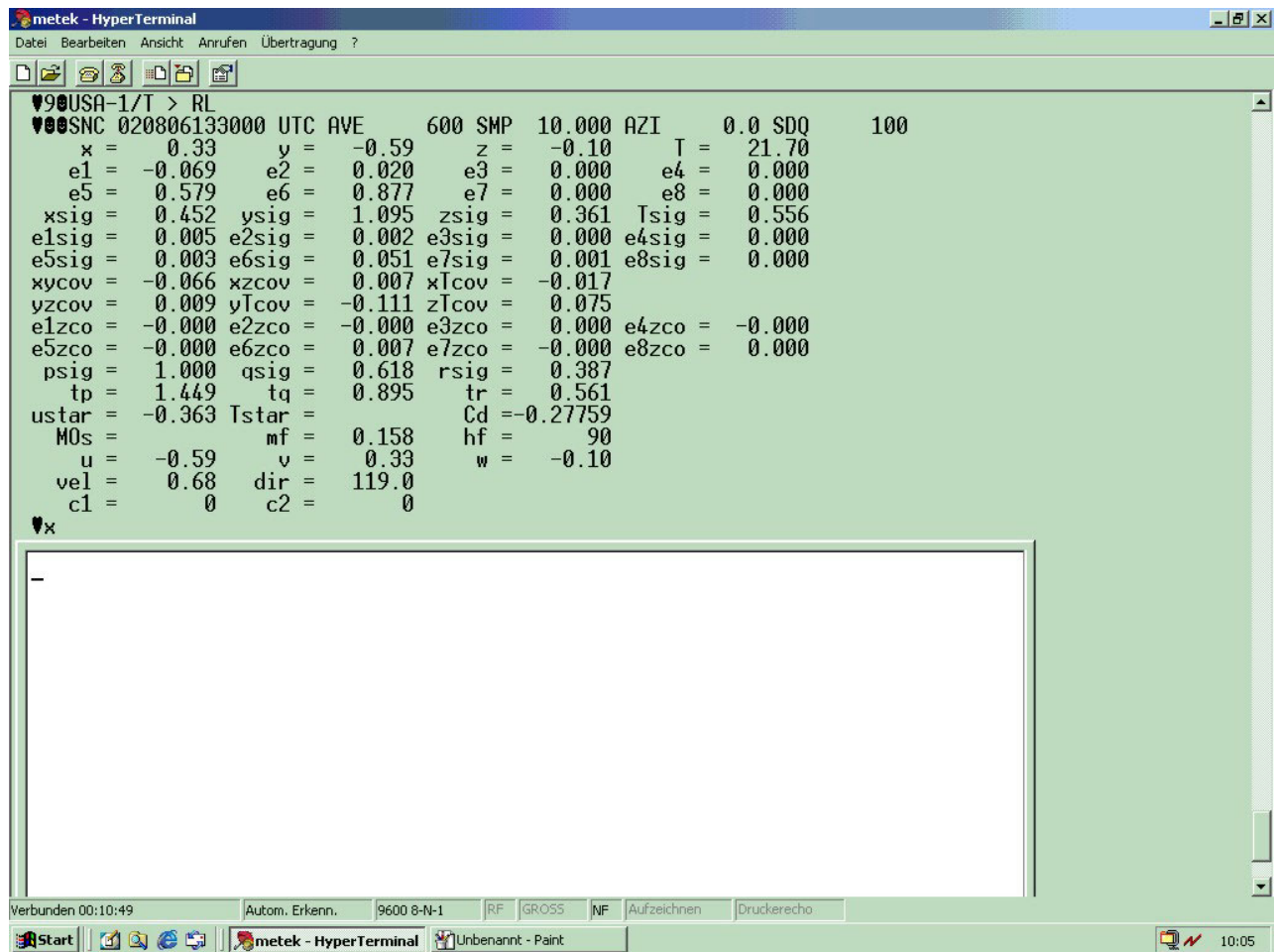


Abb. 7: Downloaden eines einzelnen Datensatzes vom Anemometer mittels RL – Befehl im HYPER TERMINAL .

Zusätzlich können jedoch auch Online-Daten vom Hygrometer abgerufen werden. Dazu muss das zuvor zum LI-7500 mitgelieferte Programm “**LI-7500 v2.0**” installiert und gestartet werden. Danach muss, um Online-Daten abzurufen, auf der “**CONNECT**” Karteikarte der “**COM Port**” eingestellt werden, hier am Beispiel der TUBAF auf die analoge Verbindung “**9**”. Danach kann der *Knopf* “**CONNECT**” geklickt werden um die Verbindung aufzubauen. War dies erfolgreich, so erscheinen im oberen Fensterbereich die aktuellen Werte der Konzentrationen von Wasser und Kohlendioxid in der Luft. Dies ist in Abbildung 9 dargestellt.

2.3.3.2. Auswertung der Datensätze

Abbildung 10 zeigt einen einzelnen Beispiel - Datensatz für ein Mittlungsintervall von 10 Minuten wie er mit der zuvor beschriebenen Prozedur erstellt wurde. In der obersten Zeile erkennt man das Datum und die Uhrzeit des Messwertes, wobei “**020826132000**” für 13:20 am 26.8.2002 steht. Außerdem sind in der ersten Zeile nochmals das Mittlungsintervall von 10 Minuten mit “**AVE 600**” und die Messfrequenz von 10 Hz mit “**SMP 10.000**” aufgeführt.

Am Ende der ersten Zeile steht "SDQ 100" für eine Datengenauigkeit von 100 Prozent verglichen zum erwarteten Wert.

```

Eingabeaufforderung DOS
Microsoft Windows 2000 [Version 5.00.2195]
(C) Copyright 1985-2000 Microsoft Corp.

C:\>cd Programme
C:\Programme>cd EddyFlux
C:\Programme\EddyFlux>lcopy /b 9600 "C:/Programme/EddyFlux/nov_wo48.txt" com8
SNC 021121113000 UTC AVE 600 SMP 10.000 AZI 0.0 SDQ 100
  x = 0.39 y = -2.04 z = 0.03 T = 8.76
  e1 = -0.069 e2 = 0.024 e3 = 0.000 e4 = 0.000
  e5 = 0.661 e6 = 0.531 e7 = 0.000 e8 = 0.000
  xsig = 0.970 ysig = 0.864 zsig = 0.558 Tsig = 0.130
  e1sig = 0.006 e2sig = 0.003 e3sig = 0.000 e4sig = 0.000
  e5sig = 0.010 e6sig = 0.059 e7sig = 0.000 e8sig = 0.000
  xycov = 0.049 xzco = -0.166 xTcov = -0.023
  yzco = -0.037 yTcov = 0.012 zTcov = 0.007
  e1zco = 0.000 e2zco = -0.000 e3zco = 0.000 e4zco = -0.000
  e5zco = -0.000 e6zco = 0.000 e7zco = 0.000 e8zco = 0.000
  psig = 0.857 qsig = 0.975 rsig = 0.558
  tp = 0.412 tq = 0.469 tr = 0.268
  ustar = 0.045 Tstar = 0.156 Cd = 0.00046
  M0s = -0.992 mf = -0.002 hf = 8
  u = -2.04 v = 0.39 w = 0.03
  vel = 2.08 dir = 100.8
  c1 = 0 c2 = 0

statistics:
  chars read : 1051
  frames got : 1
  duplicates : 0
  timeouts : 0
  checksum errs: 0
  chars written: 20
  errors : 0

C:\Programme\EddyFlux>_

```

Abb. 8: Datenübertragung vom eingeschalteten Datenlogger zum HYPER TERMINAL mittels des Programms lcopy.

In den nächsten Zeilen folgen die eigentlichen Messwerte. Eine genaue Aufschlüsselung der Abkürzungen und ihrer Bedeutung kann der Bedienungsanleitung des "USA-1" entnommen werden. In diesem Tutorial sollen nur die Messwerte dargelegt werden, welche zur Berechnung der realen Verdunstung von Bedeutung sind. "x", "y" und "z" stehen im Datensatz für die Windgeschwindigkeiten in x, y und z-Richtung in m/s. Der Wert hinter "T" gibt die Lufttemperatur in °C wieder. Im angegebenen Beispiel steht "e6" für Daten aus dem analogen Eingang Nummer 6, welche wie zuvor beschrieben hier Luftfeuchte - Werte vom Hygrometer in V sind. Unter "e6zco" findet man direkt den berechneten Werte der Kovarianz von vertikaler Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte in Vm/s. Diese Werte können durch folgende Umrechnungsformel in (mmol/m³)*(m/sec) umgerechnet werden:

$$e6co [(mmol/m^3)(m/sec)] = e6co [Vm/sec] * 2300/5.$$

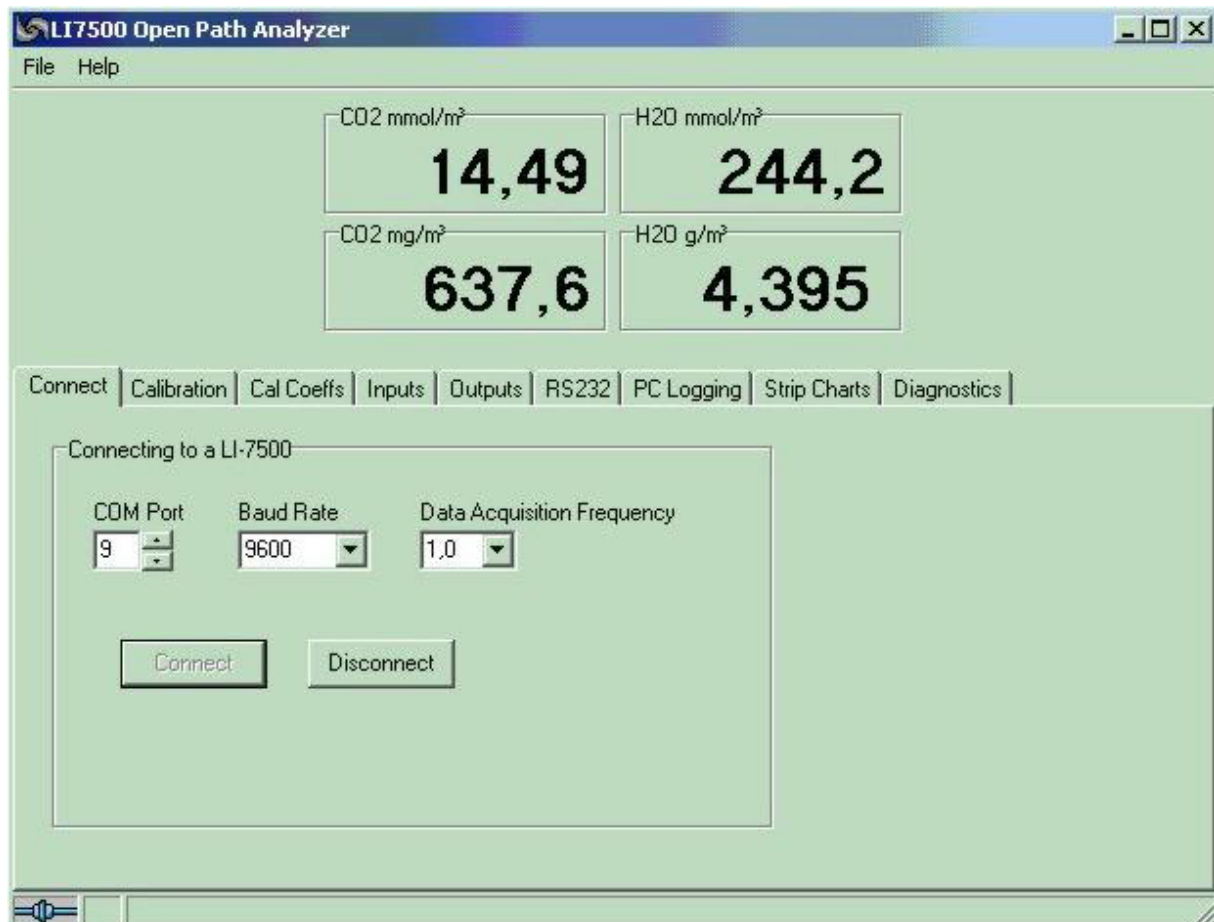


Abb. 9: Aufbau einer Online-Verbindung zum Hygrometer mittels LI7500 v2.0 Software.

Der Wert von $2300/5$ ist abhängig vom Gerät und besagt, dass 0 V gleich 0 mmol und 5 V gleich 2300 mmol sind. Er ist der Bedienungsanleitung des Hygrometers zu entnehmen. Danach kann davon die reelle Verdunstung durch Einheitenumrechnung und Multiplikation mit der molaren Masse von Wasser (18 g/mol) mit folgender Formel berechnet werden:

$$\text{ETP [mm/10min]} = e6co [(\text{mmol/m}^3)(\text{m/sec})] * 18/1000 * 0.6.$$

Abbildung 11 zeigt die finalen berechneten 10-minütigen Werte der realen Verdunstung am Beispiel eines Tagesganges vom 26.8.2002 auf dem Messfeld der TUBAF.

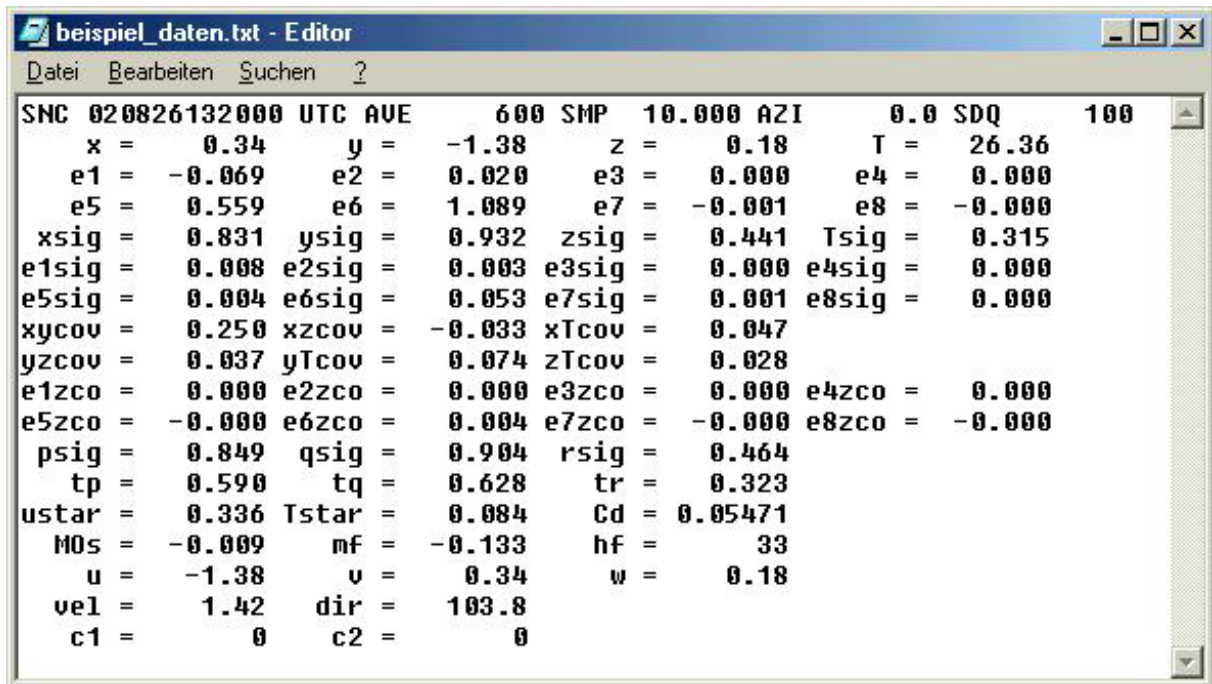


Abb. 10: Beispiel – Datensatz vom Messfeld der TU Bergakademie Freiberg.

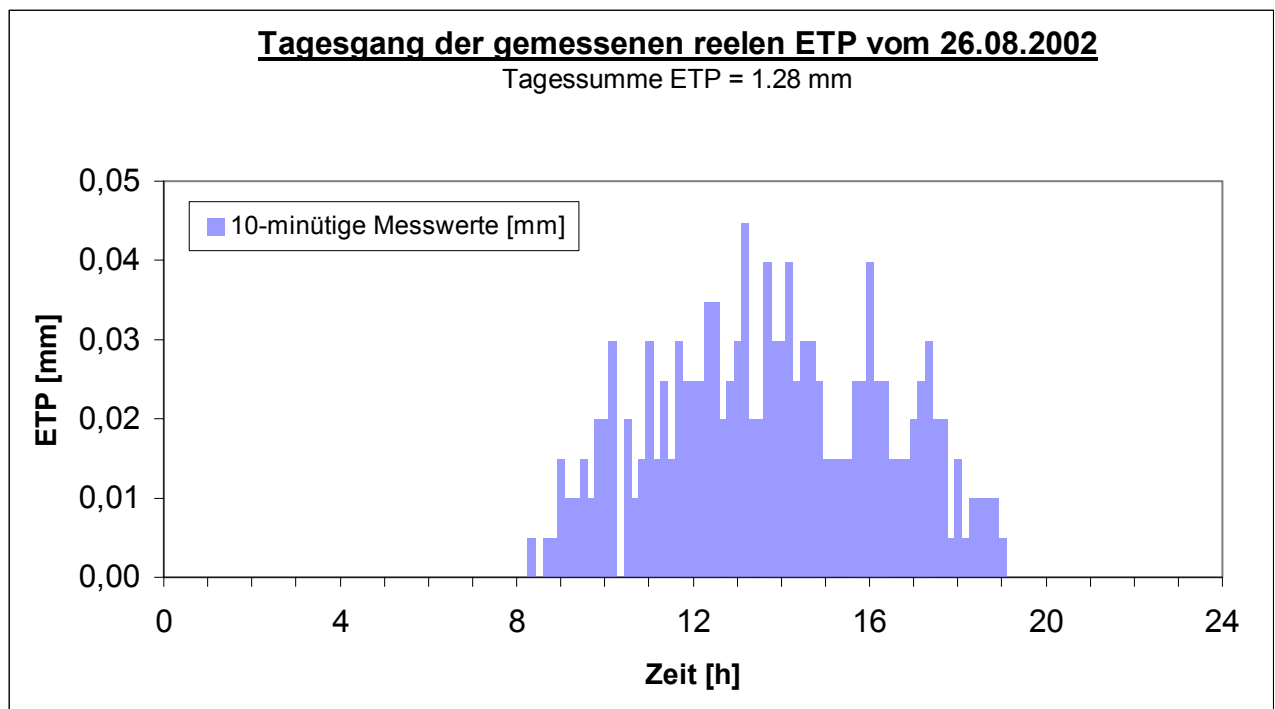


Abb. 11: Gemessene Werte der realen Verdunstung vom 26.8.2002 auf dem Messfeld der TU Bergakademie Freiberg.

2.3.3.3. Kalibrierung und Wartung

Grundsätzliche Kalibrierung und Wartung ist nur am Hygrometer LI-7500 möglich. In wöchentlicher bis monatlicher Häufigkeit müssen die unter 2.2.2.2. beschriebenen "zero" und "span" neu bestimmt werden. Dazu muss zuerst erneut das Programm "LI7500 vs2.0" gestartet werden. Danach muss die in Abbildung 12 gezeigte **Kalibrierungs-Röhre** unter dem Sensorkopf wie abgebildet angebracht werden.

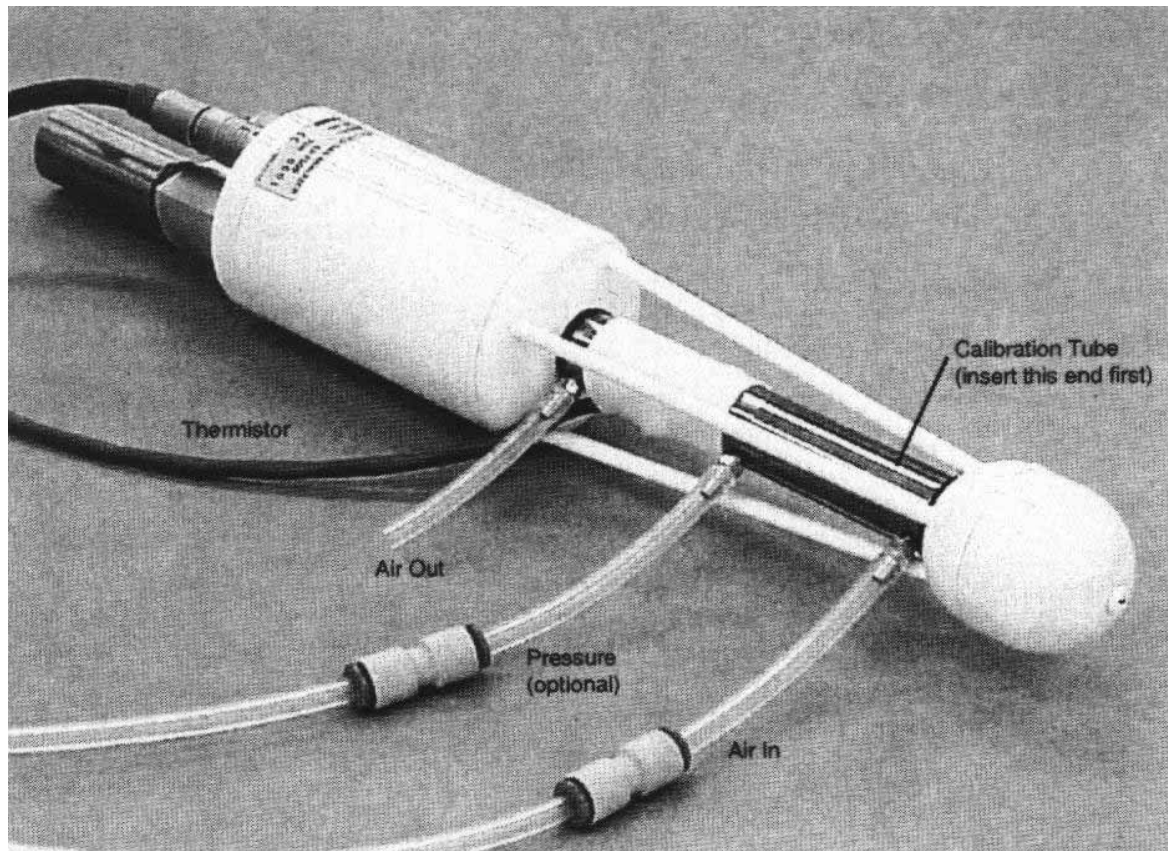


Abb. 12: Kalibrierung des LI 7500 Hygrometers (aus LI-7500 Instruction Manual)..

Ist die Kalibrierungsröhre ordnungsgemäß installiert wird zuerst Kohlendioxid - freie Luft eingeströmt, um den "Zero CO₂" und den "Zero H₂O" in der "CALIBRATE" Karteikarte zu setzen. Sind diese Werte gesetzt wird zuerst CO₂ - haltige Luft mit konstanter und bekannter Konzentration (sollte zwischen 0.5 und 1 Liter CO₂/Minute gewählt werden) aus einem Gaszylinder eingelassen um die "Span CO₂" zu setzen. Die Konzentration von Kohlendioxid in der einströmenden Luft sollte zuvor mit einer Genauigkeit von 1 % bestimmt worden sein. Das selbe wird anschließend mit Luft mit bekannter Feuchte gemacht um die "Span H₂O" zu setzen. Zur Herstellung von Luft mit bestimmten Wasserdampfgehalt können Taupunkt - Generatoren, wie zum Beispiel der LICOR LI-610, verwendet werden. Um Kondensationsprobleme zu vermeiden sollte der Taupunkt der einströmenden Luft 3° bis 5° unter der momentanen Lufttemperatur gewählt werden. Genauere

Kalibrierungserläuterungen sind der Bedienungsanleitung zu entnehmen. Abbildung 13 zeigt die Einstellung dieser Werte in einen Beispiel.

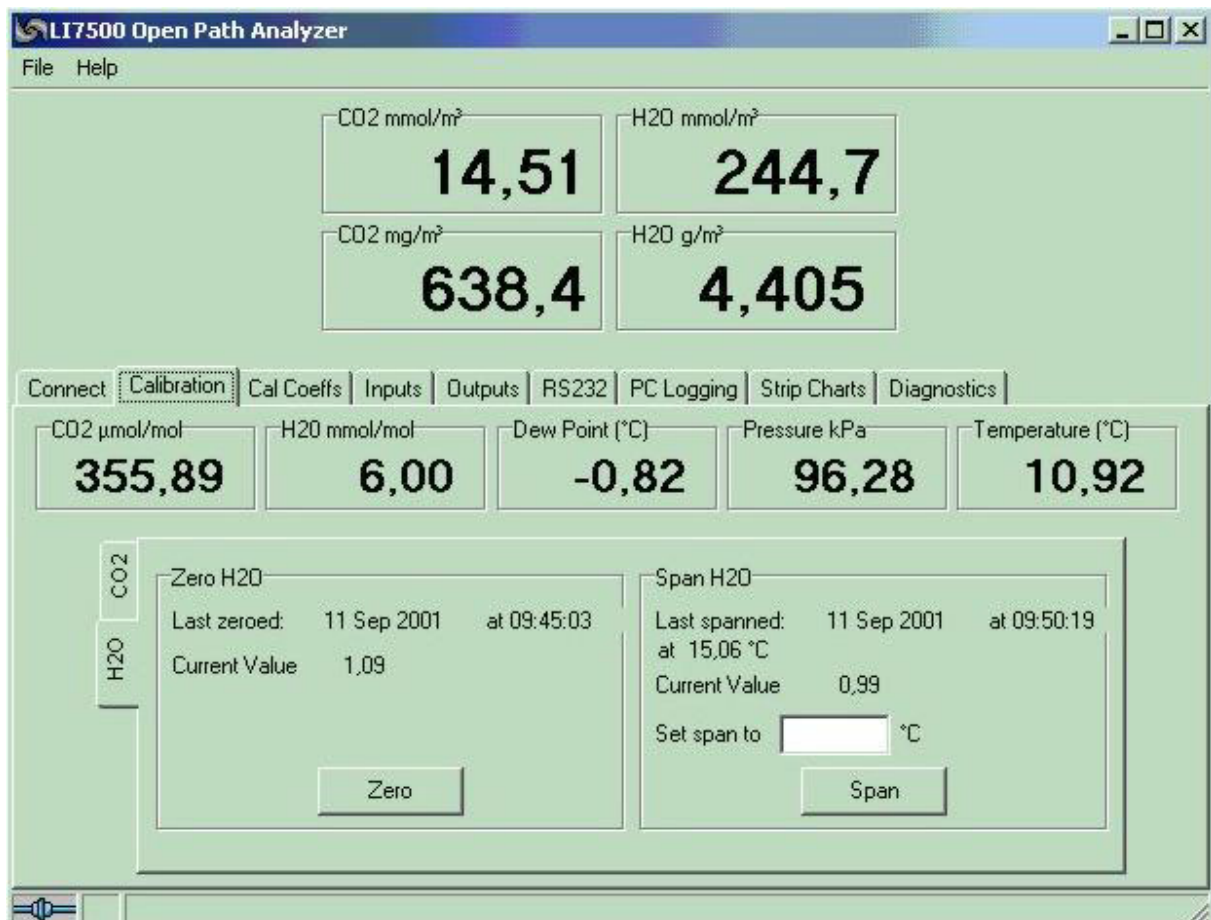


Abb. 13: Setzen von ZERO und SPAN für H2O.

Das Gerät erfordert zudem eine regelmäßige Reinigung der Sensorfenster von Schmutz und Wasser. Zweitens sollten einmal jährlich die Chemikalien des Gerätes erneuert werden welche es frei von Kohlendioxid und Wasser halten. Genauere Beschreibungen sind ebenfalls der Bedienungsanleitung zu entnehmen.

3. Zusammenfassung

Die dargestellte Eddy-Flux-Methode stellt eine genaue und wenig aufwendige Bestimmung der realen Verdunstung mit nur zwei Eingabewerten, der vertikalen Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchte, dar. Eine detaillierte Prüfung der Messzuverlässigkeit der Anlage im Vergleich zu etwaigen anderen Methoden wird im Moment an der TU Bergakademie Freiberg im Rahmen einer Diplomarbeit von Frau Anja Michalski durchgeführt. Es bleibt jedoch zu beachten, dass die erhaltenen Werte nur Punktwerte der realen Verdunstung sind und eine mögliche Korrektur für andere Standorte noch bestimmt werden muss.

Weiterführende Anwendungsmöglichkeiten der Eddy-Flux-Anlage am Standort ergeben sich bezüglich der zusätzlichen Messung des Kohlenstoffdioxidgehaltes in der Luft durch die Anlage. Dieser Wert wird wie beschrieben nicht zur Verdunstungsmessung benötigt, kann jedoch verwendet werden um den Netto-Fluss von Kohlenstoff im Ökosystem zu bestimmen. Damit könnten Kohlenstoff-Fixierung, dessen Mechanismen und die Größe von Kohlenstoff Senken und Quellen an einen bestimmten Standort untersucht werden. Momentan wird im Internet ein Netzwerk aller globaler Eddy-Flux-Anlagen aufgestellt von dem online Daten abgerufen werden können (<<http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET/index.html>>). Deutschland-weit gesehen sind bereits Messdaten der Stationen in Waldstein (Weidenbrunnen), Wetzstein, Tharandt, Grillenburg, Hainich, Gebesee, Leinefelde und Solling im Internet abrufbar.

4. Danksagung

Der Autor für die Betreuung dieses Oberseminarthemas durch Herrn Prof. Broder Merkel.
Der Autor dankt außerdem Frau Anja Michalski, welche sich im Rahmen ihrer Diplomarbeit gerade mit der Eddy-Flux-Anlage beschäftigt, für die Bereitstellung von Material und Beispieldaten.

5. Literaturverzeichnis

“FLUXNET Integrating Worldwide CO₂ Flux Measurements”. <<http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET/>>).

Frühauf, C. (1998): *Verdunstungsbestimmungen von Wäldern am Beispiel eines Fichtenbestandes im Tharandter Wald. Tharandter Klimaprotokolle*. Technische Universität Dresden.

“Eddy Covariance”. <<http://www.life.uiuc.edu/plantbio/wimovac/eddy.htm>>.

“Introduction to the Eddy Covariance Method”.
<<http://cloudbase.phy.umist.ac.uk/people/dorsey/Edco.htm>>.

LI-COR: *LI-7500 CO₂/H₂O Analyzer. Instruction Manual*.

LI-COR: “LI-7500 Product Information”.
<<http://env.licor.com/Products/GasAnalyzers/7500/7500.htm>>.

“LI-7500 Reference Page”.
<<http://env.licor.com/Products/GasAnalyzers/7500/7500refs.htm>>.

Meteorologische Messtechnik GmbH: *USA-1 User Manual*.