

## Einfache Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Torfen im Labor und Gelände – Entwicklung einer neuen Infrarot-Meßküvette

Horst Tremp, Markus Röhl, Annette Reiber & Reinhard Böcker

### Synopsis

Determination of CO<sub>2</sub>-emissions from peat-soils under laboratory and field conditions. Development of a new infrared-cuvette system.

Besides titrimetrical carbon dioxide absorption methods and expensive infrared gas analyzer techniques new small sized infrared-diode-sensors for the determination of air quality in rooms allow fast and low cost determination of CO<sub>2</sub>-flux measurements in the field and laboratory. In a closed 10 l ventilated perspex cuvette 15 minutes intervals are sufficient to produce reliable flux-measurements of CO<sub>2</sub> which are compareable with infrared gas analyzer techniques. Further advantages of the method are it's low cost and the possibility to regard influences of sources of error (breath air, leakages) immediately.

Preliminary measurements show that short term CO<sub>2</sub>-flux of peat in situ depends on different site parameters as temperature and water saturation. Vegetation indicates CO<sub>2</sub>-emission characteristics of stands in degraded raised bogs relatively. Our measurements of ambient air in peatland show, that CO<sub>2</sub>-concentrations reach up to 1000 ppm near ground during windstill nights.

Keywords: carbon dioxide emission, infrared cuvette system, degraded raised bog, peat, carbon budget, CO<sub>2</sub>, Schwenninger Moos

Schlüsselwörter: Kohlendioxidemission, Infrarot-Meßküvette, Degradiertes Hochmoor, Torfe, Kohlenstoffbilanz, CO<sub>2</sub>, Schwenninger Moos

### 1 Einleitung

Funktionsfähige Moore haben als effiziente CO<sub>2</sub>- Senken eine wichtige Funktion im globalen Kohlenstoff-Kreislauf (SUCCOW 1988, AUGUSTIN & al. 1996), worauf sich die Notwendigkeit zur Abschätzung der Mineralisierung ihrer Torfe begründet. Neben der Bestimmung von Zersetzungsstufen der Torfe gewinnt zunehmend der dynamische Parameter Kohlendioxidfreisetzung an Bedeutung, da aktuelle Entwicklungen wie z.B. die verstärkte Mineralisierung

infolge von Grundwasserabsenkungen durch alleinige Ansprache der Torfart und deren Zersetzungsgrad nicht unmittelbar erkennbar sind.

Neben chemischen Verfahren der CO<sub>2</sub>-Absorption und titrimetrischer Bestimmung werden Gaschromatographen und Infrarotgasanalytoren zur CO<sub>2</sub>-Messung verwendet (DUNGER & FIEDLER 1997). Jede dieser Techniken weist Anwendungsbeschränkungen auf, wobei die Infrarot-Meßtechnik aufgrund ihrer Sensitivität und der Möglichkeit, diskrete Zeitschritte über längere Zeiträume zu messen, wohl das größte Anwendungsspektrum besitzt (EDWARDS 1974).

Während der Einsatzbereich von Gaschromatographen vorwiegend im Labor liegt und Infrarotgasanalytoren herkömmlicher Bauart in der Regel stationär an einem Meßort eingesetzt werden – da zumindest von einem nicht unerheblichen Installationsaufwand ausgegangen werden muß –, erlauben kleine und leichte Sonden, wie sie heute zur Bestimmung von Raumluftqualität eingesetzt werden, in Verbindung mit geeigneten Küvetten neben dem Laboreinsatz eine flexiblere Anwendung im Gelände.

Ausführlich soll diese neu entwickelte Meßmethode und ausgewählte Aspekte ihrer Anwendung bei Labor- und Freilandmessungen der CO<sub>2</sub>-Emission verschiedener Standorte im Schwenninger Moos vorgestellt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf dem methodischen Gesichtspunkt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen einige Aspekte der Einsatzmöglichkeiten dieser Meßeinrichtung.

### 2 Material und Methoden

Kernstück der verwendeten CO<sub>2</sub>-Meßeinrichtung (Abb. 1) ist eine Infrarot-Meßsonde, wie sie zur Beurteilung von Raumluftqualität eingesetzt wird, und das zugehörige Anzeigegerät (Q-Check™-Modell 8730, TSI INCORPORATED). Der Meßbereich beträgt 0–5000 ppm CO<sub>2</sub> bei einer Auflösung von 1 ppm. Die vom Hersteller zertifizierte Meßgenauigkeit von < 3% des wahren Endwertes erlaubt unter bestimmten Rahmenbedingungen die Verwendung bei CO<sub>2</sub>-Emissionsmessungen von Böden, verschiedenen organischen Substraten oder auch Gaswechsellmessungen an ganzen Pflanzen.

Das Meßgerät verfügt über sinnvolle Statistikeinrichtungen. So wird ein Mittelwert frei wählbar alle 2–60 Sekunden über ein beliebiges Meßintervall (laufender Mittelwert) gebildet. Neben dem Durchschnittswert werden die über das Meßintervall auftretenden Minimum- und Maximumwerte ausgegeben.

Zur Gasanreicherung wurde eine rechteckige Haube aus 5 mm starkem Plexiglas der Abmessung (L x B x H) 26,5 cm x 19,5 cm x 19,5 cm mit einem In-

nenvolumen von 10 l verwendet (Abb. 1). Diese besitzt stirnseitig eine kreisrunde ( $\varnothing = 3$  cm), mit geschlossenporigem Moosgummi eingefasste Bohrung, durch die die Meßsonde eingeführt wird. Ähnliche Kammern zur Gaswechselfmessung, wie sie von RUSSEL & BOTHA (1988) oder SHAVER & al. (1998) verwendet wurden, sind über einen Gaskreislauf mit einem Infrarot-Gasanalysator verbunden.

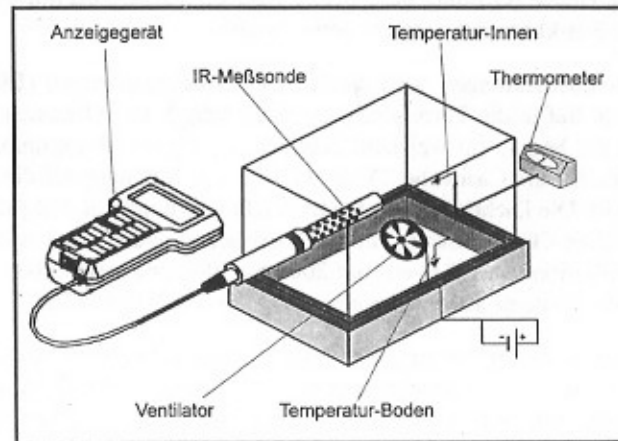


Abb. 1: Einfache Meßeinrichtung für CO<sub>2</sub>-Emissionen. Vereinfachungen im Vergleich zu anderen Meßverfahren ergeben sich dadurch, daß sich der IR-CO<sub>2</sub>-Sensor in der Gasanreicherungshaube befindet.

Fig. 1: Simple chamber design for CO<sub>2</sub>-emission measurements. The main difference compared to other IR-principles is the direct CO<sub>2</sub>-measurement in the enclosure.

Ein in der Küvette angebrachter, von einer Batterie gespeister Computerlüfter (12 V/0,1 A, ADDA CORP.) sorgt für die küvetteninterne Luftzirkulation, wodurch die sondenspezifische Ansprechzeit bis zum Erreichen des Endwertes nur noch wenige Sekunden beträgt. Außerdem wird einer Schichtung des Kohlendioxids an der Grenzschicht Boden (Pflanzenoberfläche)/Luftraum vorgebeugt. Eine entsprechende Umwälzung wird auch bei ähnlich dimensionierten Küvetten in geschlossenen Kreislaufsystemen von IR-Gasanalysatoren erzeugt (CHAPMAN & THURLOW 1996).

Bei Bodensubstraten die größere Gasräume beinhalten – und das ist bei Torfen im besonderen der Fall – muß die Annahme, daß ausschließlich Diffusionsprozesse den Gastransport bewerkstelligen, kritisch betrachtet werden. So besteht die Möglichkeit, daß über konvektive Wärmeströme oder über mechanischen

Druck kohlendioxidreiche Gasblasen aus dem Substrat freigesetzt werden. Eine Ventilation (Abb. 1) schließt die genannten Einflüsse zwar nicht aus, vermag sie aber zu glätten. Über zwei Widerstandsthermometer (Summit SDT 40 - Digitalthermometer) werden Küvettenlufttemperatur und die Temperatur des von der Küvette überdeckten Bodens erfaßt.

Im Laborbetrieb werden die Torfe in einem Plastischälchen (21 cm x 11 cm x 3 cm) in die Haube (Öffnung nach oben) gegeben. Diese wird mit einer Glasscheibe und Exsikkatorfett gasdicht verschlossen.

Für die Geländemessungen wird zunächst ein Edelstahlrahmen (Blechstärke 1 mm) 10 cm tief in die Torfe getrieben. Ebenerdig hat der Rahmen eine umlaufende, 2 cm breite, mit weichem geschlossenporigem Moosgummi belegte Auflagefläche für die Gashaube. Diese wird bei der Messung auf die Auflagefläche gestellt. Die Dichtigkeit des Systems läßt sich durch die Möglichkeit der kontinuierlichen CO<sub>2</sub>-Erfassung einfach überwachen, indem über Atemluft die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Küvette auf 2000 bis 3000 ppm angehoben und nach Verschluß des Systems auf abnehmende CO<sub>2</sub>-Werte geachtet wird.

Die Messungen wurden bis zu einer Gasanreicherung von maximal 1000 ppm CO<sub>2</sub> durchgeführt. Der Anreicherungszeitraum betrug 16 Minuten. Der Konzentrationsanstieg wurde mit zwei Messungen als 5-sekündig laufender Mittelwert erfaßt. Gemessen wurde über die erste (0–1) und sechzehnte (15–16) Minute. Der so gemessene Emissionswert ging als 15-Minutenwert in die weiteren Auswertungen ein. Grund für diese Meßwerterfassung sind die bisweilen in Sekundenabständen auftretenden Schwankungen des aktuellen Anzeigewertes.

Die Küvetten waren im Regelfall mit selbstklebender Aluminiumfolie abgedunkelt, um die Photosynthese der Pflanzendecke zu unterbinden. Außerdem läßt eintretende Strahlung die Küvetteninnentemperatur (Wärmefalle) stark ansteigen und daher liegen keine konstanten Meßbedingungen vor. Nur in einem Versuch wurde mit lichtdurchlässiger Haube gearbeitet, da es die Witterungsbedingungen (21.4.1998) erlaubten. Allgemein wurden Messungen nicht in die Auswertung einbezogen, bei denen die Innentemperatur über den Meßzeitraum um mehr als 2 K anstieg. Nach jeder Meßperiode wurden die Hauben von der Meßstelle abgehoben, um Kammereffekte wie übermäßige Erwärmung und CO<sub>2</sub>-Anstieg weitgehend zu vermeiden.

Wiederholt wurde die Linearität des CO<sub>2</sub>-Anstiegs überprüft. Rückkopplungseffekte durch die Veränderung des Diffusionsgradienten wurden dabei nur bei fehlender Luftzirkulation festgestellt. Die Auswertung der Meßdaten erfolgte nach folgender Formel:

$$\Delta \text{CO}_2 - \text{C} = \frac{c_1 - c_0}{\Delta t} \cdot \frac{V_{\text{KV}} \cdot M}{A \cdot V_{\text{CO}_2}}$$

$\Delta \text{CO}_2 - \text{C}$ (Flußrate)	=	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
$V_{\text{KV}}$ (Küvettenvolumen)	=	$0,01 \text{ m}^3$ (bei eingeführter Sonde)
$M$ (Molmasse $\text{CO}_2 - \text{C}$ )	=	$12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
$A$ (Küvettengrundfläche)	=	$0,052 \text{ m}^2$ (Geländemessung)
$V_{\text{CO}_2}$ (Molvoll. $\text{CO}_2$ , $25^\circ\text{C}$ )	=	$0,024 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$

Da der aktuelle Luftdruck nicht mitgemessen wurde, konnte keine Reduktion des Gasvolumens auf den Normalzustand vorgenommen werden.

Prinzipiell kann eine im Gelände installierte Meßanlage von 5 Hauben von einer Person sequentiell mit einer Meßsonde beprobt werden. Zwischen der ersten und zweiten Messung wird die Sondenöffnung der Küvette mit einem Gummistopfen verschlossen. Bei dieser Methode entfällt die Anlage von gasdichten Zu- und Ableitungen zu den Anreicherungshauben oder der Transport von Gasproben in ein Labor.

### 3 Untersuchungsgebiet

Die exemplarischen Untersuchungen wurden an Standorten und Torfen des Schwenninger Moores durchgeführt. Das Schwenninger Moos ist ein degradiertes, heute fast vollständig abgetorfes Hochmoor (DIERSSEN & DIERSSEN 1984) und liegt in einer Senke der Baar-Hochmulde. Das 97 ha große Naturschutzgebiet umfaßt extensiv genutzte Schafweiden im Anmoorbereich, randliche, trockene Moorbirkenwälder, Niedermoore und Röhrichte. Die Hochmoorvegetation regeneriert in zentralen Bereichen, nachdem Anfang der achtziger Jahre Wiedervernässungsmaßnahmen ergriffen wurden. Aufgrund des stellenweise sehr kleinräumigen Wechsels der hydrologischen Bedingungen und den unterschiedlichen anthropogenen Nutzungen ist das Schwenninger Moos sehr artenreich (GÖRS 1968). Die Standorte der  $\text{CO}_2$ -Messungen liegen im Übergangsbereich alter, offener Torfstichrücken und der wiedervernässigten Zone im Zentralteil des Moores. Die nach dem Torfabbau erhaltene gebliebenen basalen Schilf- und Seggentorfe sind zwischen zwei und drei Meter mächtig und auf den abgetrockneten Torfrücken oberflächlich vererdet. In den vernässigten Bereichen bilden *Sphagnum nemoreum* und *Sphagnum palustre* Bulte und Decken. *Sphagnum fallax* dominiert die Schlenken und Torfstichgräben.

### 4 Ergebnisse und Diskussion

Selbst bei Untersuchungen die auf C-Flüsse ausgerichtet sind, findet man selten Angaben über die am Standort herrschenden Absolutkonzentrationen oder tageszeitliche Schwankungen der Kohlendioxidkonzentration der bodennahen Luftschicht. WALTER (1949) nimmt an natürlichen Standorten Tagesschwankungen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 25% an. Bei neueren Untersuchungen vor allem in Wäldern (MICHAELIS et al. 1988, JUDD et al. 1993, XUHUI LEE et al. 1996) wurden allerdings wesentlich stärker schwankende Tageswerte festgestellt. Eine maximale Anreicherung des Kohlendioxids fällt dabei oft mit Windstille zusammen (ROSENBERG 1974).

Beispielhaft kann dies am Anstieg des Kohlendioxids in einer zunächst windstillen Nacht im Schwenninger Moos verdeutlicht werden (Abb. 2).

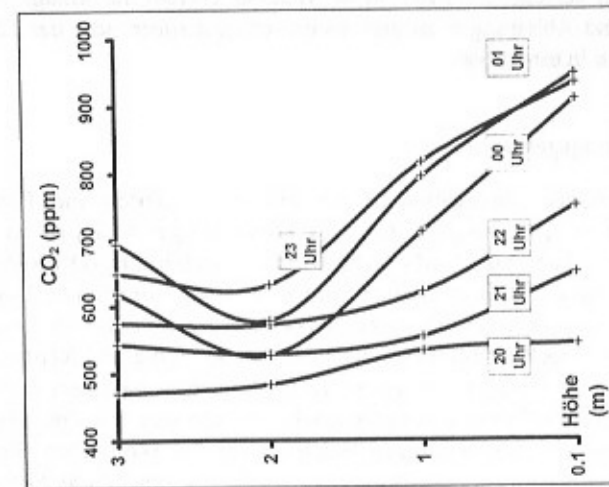


Abb. 2: Kohlendioxid-Profil über dem Schwenninger Moos in der anfänglich windstillen Nacht (5.6.1998). Gegen 0 Uhr aufkommender Wind zerstörte die Einschichtung schließlich.

Fig. 2: Carbon-dioxide profile at the Schwenninger Moos in a calm night (5<sup>th</sup> June 1998). Rising wind destroyed the profile at midnight.

Die Lufttemperaturen nahmen über den Meßzeitraum in 10 cm Höhe (Vegetationsschicht) von  $20,5^\circ\text{C}$  auf  $9,8^\circ\text{C}$  ab, während die relative Luftfeuchte von 40% bis nahe des Sättigungspunktes anstieg. Die kontinuierlich in einem nahegelegenen Torfrücken in 5 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen waren

gegen 1 Uhr nicht unter 16,8°C gesunken. Die in 2 m Höhe um die Mittagszeit gemessenen Lufttemperaturhöchstwerte betragen an diesem Tag 30°C. Die Einminutenmittelwerte erreichten gegen 1 Uhr in unmittelbarer Bodennähe 984 ppm CO<sub>2</sub>! Gegen 23 Uhr wurde die Schichtung der oberen Luftschicht gestört. Die exemplarisch gezeigten Messungen kennzeichnen die integrale Atmungsaktivität des Standorts infolge der noch hohen Temperaturen der Torfe. Über die räumliche Erstreckung des 'Kohlendioxidsees' kann aufgrund der nur punktuellen Messung keine Aussage gemacht werden. Um Aussagen zur ökologischen Relevanz derart hoher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Mooren zu treffen, müßten systematischere Untersuchungen zu diesem Phänomen erfolgen.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis eines Laborversuchs. Dabei wurden eine im Winter beprobte Schluffmudde und ein Niedermoorortorf nach 2 Tagen Adaptationszeit bei 5°C sukzessive in jeweils einer Stunde um 5 K bis zur Temperaturkonstanz im Klimaschrank erwärmt.

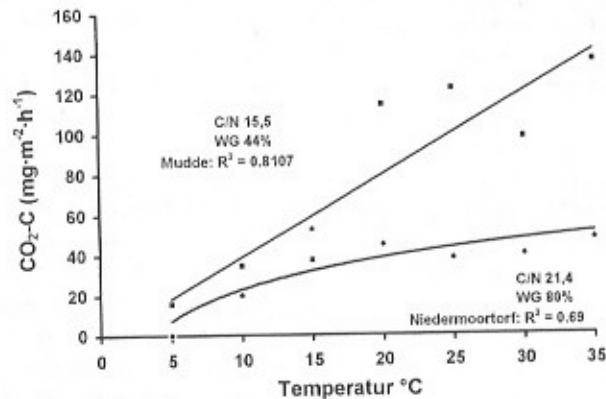


Abb. 3: CO<sub>2</sub>-Emission unterschiedlicher Moorsubstrate in Abhängigkeit von der Temperatur. WG = Wassergehalt der Proben in Gew.-%.

Fig. 3: Different temperature-dependent CO<sub>2</sub>-emission rates of two different peat-substrates. WG = water-content of samples in weight-%.

Die Temperaturreihen der beiden in ihren chemischen Eigenschaften und Wassergehalten unterschiedlichen Substrate zeigen dabei ein unterschiedliches Verhalten. Während tendenziell bei der Mudde die CO<sub>2</sub>-Emission mit der Temperatur linear zunimmt, zeigt eine entsprechend starke Temperaturerhöhung keinen Einfluß auf die CO<sub>2</sub>-Emission des Niedermoorortorfs.

Da mit Volumenproben gearbeitet wurde, ist dieses Ergebnis durchaus realitätsnah, obwohl nicht entschieden werden kann, welche der Substrateigenschaften das Mineralisationsverhalten maßgeblich bestimmen. Zu nennen ist hier lediglich die Möglichkeit, daß das engere C/N-Verhältnis der Mudde sowie die Beschaffenheit der organischen Substanz bessere Voraussetzungen für deren Mineralisierung bieten, als dies bei dem verwendeten Niedermoorortorf der Fall ist.

Abbildung 4 zeigt den Tagesverlauf der CO<sub>2</sub>-C-Emissionen vom 21.4.1998 an drei Standorten. Die feuchte Witterung an den Tagen zuvor (Wassersättigung bei allen Standorten), die Bewölkung und kühle Temperaturen bei mäßig starkem Wind erlaubten es, mit durchlichteter Küvette zu messen, ohne daß es zu einem kritischen Temperaturanstieg während der Meßintervalle kam.

Die zwei Meßstellen auf einem *Sphagnum nemoreum*-Bult lagen unmittelbar nebeneinander. In einem Fall wurde bereits 2 Monate zuvor die lebende Sphagnumdecke abgehoben, so daß an der Meßstelle 'Bult ohne Sphagnum' ausschließlich unzersetzter *Sphagnum*-Torf gemessen wurde, während sich die Vegetation auf der unmanipulierten Bulthälfte zu annähernd 100% aus *Sphagnum nemoreum* und wenig *Calluna vulgaris* und *Eriophorum angustifolium* zusammensetzt. Der abgetorfte Rücken befand sich wenige Meter von dem wachsenden Bult entfernt, so daß weitgehend gleiche klimatische Rahmenbedingungen vorherrschten (Abb. 4, Substrattemperatur). Wie zu erwarten, weist nur die intakte Bulthälfte eine zeitweise positive Kohlenstoffbilanz auf. Über den gesamten Meßzeitraum von 12 Stunden war die C-Bilanz dennoch negativ, so daß letztlich insgesamt 96 mg·m<sup>-2</sup> CO<sub>2</sub>-C an diesem Standort emittiert wurden. Offenbar waren die Witterungsbedingungen noch zu ungünstig für eine positive C-Bilanz der Vegetation (vgl. COYNE & KELLEY 1975). Ohne lebende Sphagnum wurden am gleichen Standort über die gleiche Zeit 568 mg/m<sup>2</sup> Kohlendioxid-C freigesetzt. Der vererdete Torfrücken wies mit 628 mg/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub>-C die höchsten Emissionsraten auf. Auffällig sind die kurzfristig auftretenden Schwankungen der Kohlendioxid-Meßwerte, was deutlich werden läßt, daß abgesehen von den CO<sub>2</sub>-Fixierungsprozessen am lebenden *Sphagnum*-Bult, die gut mit den Strahlungsverhältnissen korrespondieren, die Atmungsprozesse im Tagesgang sich nur in erster Näherung mit der Bodentemperatur in Einklang bringen lassen (EDWARDS & SOLLINS 1973), wengleich die 'mittlere tägliche' CO<sub>2</sub>-Emissionsrate über einen längeren Betrachtungszeitraum (Jahr) in der Regel gut mit dem Temperaturmittel der Luft übereinstimmt (BEYER 1990, MÜLLER et al. 1997).

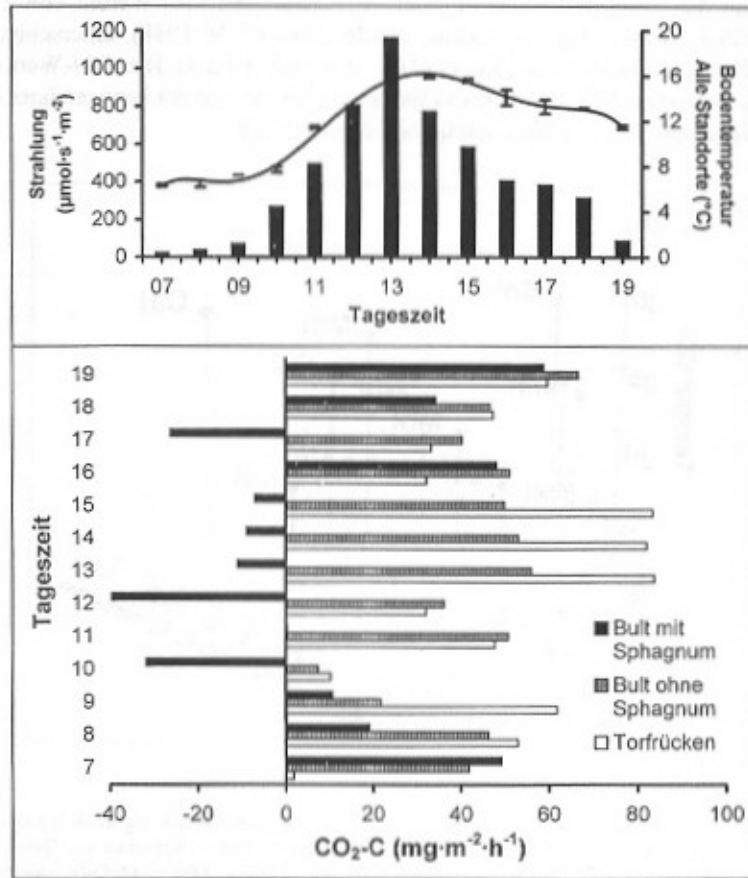


Abb. 4: Stündliche Messungen mit transparenter Küvette der CO<sub>2</sub>-Emissionen an drei Standorten: Bult mit lebendem *Sphagnum nemoreum*, Bult ohne lebende Sphagnumschicht und Torfrücken.

Fig. 4: Every hour measured CO<sub>2</sub>-emissions with a transparent cuvette at three sites: hummock with living *Sphagnum nemoreum* (black bars), hummock without living Sphagnum (line bars) and bare peat digging site (white bars).

Vier Messungen der Kohlendioxid-Emissionen an drei Standorten sind in Abbildung 5 gezeigt. Auch sie kennzeichnen die zeitliche Variabilität von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Können die Torfe der Standorte 'Cal' und 'Mol' mit C/N-Werten von 29,3 bzw. 26,5 als mesotroph bezeichnet werden (SUCCOW 1988), unterscheiden sie sich doch erheblich im Säuregrad (pH 3,6 bzw. pH 5,9). Der C/N-Wert des wenig zersetzten Schlenkentorfes (*Sphagnum fallax*) von 40 kennzeichnet ihn als oligotroph. Der pH-Wert beträgt hier ebenfalls 5,9.

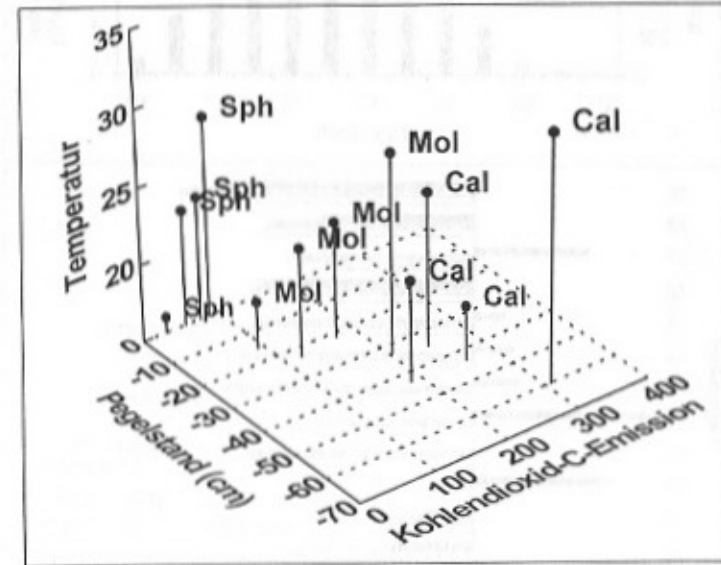


Abb. 5: Vier Messungen mit verdunkelter Küvette (CO<sub>2</sub>-C-Emission in  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) zwischen Juni - August 1998 an 3 verschiedenen Standorten (Sph = Schlenke mit *Sphagnum fallax*, Cal = abgetorfte Fläche mit *Calluna vulgaris*, Mol = *Molinia caerulea* - Bestand).

Fig. 5: Four measurements with dark cuvette (CO<sub>2</sub>-C-emissions in  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) at 3 different sites (Sph = hollow in bog with *Sphagnum fallax*, Cal = former peat digging area with *Calluna vulgaris*, Mol = *Molinia caerulea* - site) between June-August 1998.

Trotz unterschiedlicher Bodentemperaturen und veränderter Pegelstände, lassen sich die Standorte über die Größenordnung ihres CO<sub>2</sub>-C Emissionsniveaus differenzieren. Bei den gut durchwurzelten Meßorten 'Mol' und 'Cal' trägt die Wurzelrespiration sicher einen erheblichen Teil zur Gesamtemission bei. Die vergleichsweise (SVENSSON 1983, CHAPMAN & THURLOW 1996) noch um 1/3 höheren Maximalwerte von 308  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  können in Verbindung mit den ungewöhnlich hohen Temperaturen der Substrate bei noch ausreichender Feuchte gesehen werden.

## 5 Ausblick

Jede Gaswechselmeßtechnik kann nur für eine bestimmte Raum-Zeit-Ebene zulässige Aussagen machen. Eine raum-zeitliche Extrapolation der erhaltenen Meßwerte ist nahezu unmöglich. So kann auch die hier vorgestellte Meßmethode andere Verfahren, mit denen andere Fragestellungen – beispielsweise die Produktivität der Pflanzengemeinschaft zu bestimmen – bearbeitet werden, nicht ersetzen. Das vorgestellte Meßverfahren hat durch seine Einfachheit und seine Flexibilität Vorteile bei Kurzzeitmessungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kleinstandorten, welche sich sinnvoll mit im Tagesverlauf stark schwankenden Umweltfaktoren in Beziehung setzen lassen.

## 6 Danksagung

Für wichtige meßtechnische Anregungen danken wir Frau Dr. S. Fiedler. Für Anmerkungen zum Manuskript herzlichen Dank einem unbekanntem Gutachter.

## 7 Literatur

- AUGUSTIN, J., W. MERBACH, W. SCHMIDT & E. REINING (1996): Effect of changing temperature and water table on trace gas emission from minerotrophic mires. – *Angew. Bot.* 70: 45–51.
- BEYER, L. (1990): Die Standortsbewertung der biologischen Aktivität von Böden über Ermittlung der Bodenatmung und der zellulolytischen Aktivität im Feld. – *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 153: 261–269.
- CHAPMAN, S.J. & M. THURLOW (1996): The influence of climate on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from organic soils. – *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 205–217.
- COYNE, P.I. & J.J. KELLEY (1975): CO<sub>2</sub>-exchange over the alaskan arctic tundra: meteorological assessment by an aerodynamic method. – *J. Appl. Ecol.* 12: 587–611.
- DIERSSEN B. & K. DIERSSEN (1984): Vegetation und Flora der Schwarzwaldmoore. – *Beih. Veröff. Naturschutz Landschaftspflege Bad.-Württ.* 39: 512 S.
- DUNGER, W. & H. J. FIEDLER (1997): Methoden der Bodenbiologie. 2. Aufl. – Gustav Fischer Verlag: 539 S.
- EDWARDS, N. T. (1974): A moving chamber design for measuring soil respiration rates. – *Oikos* 25: 97–101.
- EDWARDS, N. T. & P. SOLLINS (1973): Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. – *Ecology* 54 (2): 406–412.
- GÖRS, S. (1968): Die Flora des Schwenninger Moores. In: *Das Schwenninger Moos. – Natur- und Landschaftsschutzgeb. Bad.-Württ.* 5: 149–189.
- JUDD, M.J., P.T. PRENDERGAST & K.J. McANENEY (1993): Carbon dioxide and latent heat flux measurements in a windbreak-sheltered orchard. – *Agricultural and Forest Meteorology* 66: 193–210.
- MICHAELIS, W., M. SCHÖNBURG & R.P. STÖBEL (1988): Trocken- und Naßdeposition von Schwermetallen und Gasen. In: BAUCH, J. & W. MICHAELIS (ed.): *Das Forschungsprogramm Waldschäden am Standort „Postturm“*, Forstamt Farchau/Ratzeburg: 19–61.
- MÜLLER, N., M. BAUCHE und N. LAMERSDORF (1997): Zeitliche und räumliche Variabilität der CO<sub>2</sub>-C-Emissionen in einem ombrotrophen Hochmoor des Hochharzes. – *Telma* 27: 131–146.
- ROSENBERG, N.J. (1974): *Microclimate: The biological environment.* – Wiley & Sons: 315 S.
- RUSSEL, S. & C.E.J. BOTHA (1988): Measurement of bryophyte growth. 2. Gas exchange techniques. In: GLIME, J.M. (ed.): *Methods in bryology.* – Hattori Botanical Laboratory, Nichinan, Miyazaki (Japan): 259–273.
- SHAVER, G. R., L. C. JOHNSON, D. H. CADES, G. MURRAY, J. A. LAUNDRE, E. B. RASTETTER, K. J. NADELHOFFER & A. E. GILBIN (1998): Biomass and CO<sub>2</sub> flux in wet sedge tundras: responses to nutrients, temperature, and light. – *Ecological Monographs* 68 (1): 75–97.
- SUCCOW, M. (1988): *Landschaftsökologische Moorkunde.* Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart: 340 S.
- SVENSSON, B.H. (1983): Carbon fluxes from acid peat of a subarctic mire with emphasis on methane. Institutionen för mikrobiologi, Rapport 20. Sveriges Lantbruksuniversitet.
- WALTER, H. 1949: *Phytologie III/1. Grundlagen der Pflanzenverbreitung - Teil Standortslehre.* – Ulmer-Verlag: 525 S.
- XUHUI, L., T. A. BLACK, G. DEN HARTOG, H. H. NEUMANN, Z. NESIC & J. OLEJNIK 1996: Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest. – *Agricultural and Forest Meteorology* 81: 13–29.

## Adresse

Dr. Horst Tremp  
Dipl.-Biol. Markus Röhl  
Annette Reiber  
Prof. Dr. Reinhard Böcker  
Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (320)  
Universität Hohenheim  
70593 Stuttgart