



**UNIVERSITÄT BAYREUTH**

**Abteilung Mikrometeorologie**

---

**Meteorologisches Instrumentenpraktikum  
an der Universität Bayreuth**

**Thomas Foken  
Johannes Lüers  
Johannes Olesch**

---

**Arbeitsergebnisse  
Nr. 60  
Bayreuth, August 2014**

---

Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie  
Work Reports, University of Bayreuth, Dept. of Micrometeorology  
Print, ISSN 1614-8916; Internet, ISSN 1614-8924

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/>  
[https://epub.uni-bayreuth.de/view/series/Arbeitsergebnisse\\_=2F\\_Universit=E4t\\_Bayreuth,\\_Abteilung\\_Mikrometeorologie.html](https://epub.uni-bayreuth.de/view/series/Arbeitsergebnisse_=2F_Universit=E4t_Bayreuth,_Abteilung_Mikrometeorologie.html)

Eigenverlag: Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie  
Vervielfältigung: Druckerei der Universität Bayreuth  
Herausgeber: Prof. Dr. Thomas Foken

Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie  
D-95440 Bayreuth

Die Verantwortung über den Inhalt liegt bei den jeweiligen Autoren.

## Einleitung

Meteorologische Instrumentenpraktika gehören zur Standardausbildung an den meisten deutschen Universitäten mit Haupt- und Nebenfachausbildung in Meteorologie. Klassische Vorbilder für derartige Praktika existierten an der Ludwig-Maximilian-Universität München dokumentiert von Prof. Dr. Gustav Hofmann (Hofmann, 1960), welches auf einem von Prof. Dr. August Schmauß und Prof. Dr. Rudolf Geiger entwickeltem Praktikum aufbaute, und an der Humboldt-Universität zu Berlin baute Prof. Dr. Sonntag ein ähnliches Praktikum auf, beeinflusst durch seine Leipziger Zeit bei Prof. Dr. Max Robitzsch (leider ohne entsprechende Dokumentationen). Gegenwärtig gibt es nur wenige Universitäten, von denen Praktikumskripte öffentlich leicht zugänglich im Internet vorhanden sind (u.a. Ludwig-Maximilian-Universität München, Brandenburgische Technische Universität Cottbus)

An der Universität Bayreuth bestand mit der Einführung des Studienganges „Umwelt- und Bioingenieurwissenschaften“ der Bedarf an einer Vorlesung „Umweltsysteme – Luft“ mit einem entsprechenden Praktikum. Nach anfänglich improvisierten Praktika wurde ab dem Wintersemester 2004/05 in den Räumen der Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften das Praktikum in der hier beschriebenen Form eingerichtet. Im Wintersemester 2008/09 Erfolgte eine Verlagerung die Räume des Gebäudekomplexes der Geowissenschaften.



Verführung des Praktikums durch Prof. Foken (2. von links) und Dr. Lüers (links) gegenüber Prof. Dr.-Ing. Fischerauer (2. von rechts, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik), Oktober 2004

Letztmalig wurde das Praktikum für die Ingenieurwissenschaften bedingt durch die Einstellung des Studienganges im Wintersemester 2012/13 durchgeführt. Es wurde aber mit der Einführung des Bachelorstudienganges Geoökologie ab dem Wintersemester 2008/09 kontinuierlich als Wahlpflichtprogramm angeboten.

Ziel des Praktikums ist die Einführung in die Messung meteorologischer Elemente (Temperatur, Feuchte, Wind, Strahlung) mit den gegenwärtig üblichen Messmethoden. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Untersuchung typischer Fehler und Gerätecharakteristika. Neu gegenüber vergleichbaren Praktika sind auch einfache Turbulenzmessungen. Derartige Messungen werden seit dem Sommersemester 1998 in einem speziellen Mikrometeorologischen Praktikum vertieft. Dieses ist jedoch nicht in Versuchen aufgebaut sondern wird als Messexperiment für Masterstudenten und Doktoranden realisiert.

Die folgende Druckschrift enthält die Versuchsbeschreibungen der sieben Versuche, für deren Durchführung jeweils zwei Stunden zur Verfügung stehen. Es im 14-tägigen Rhythmus semesterbegleitend oder als Blockpraktikum durchgeführt. Eine gewisse Einführung in das Praktikum wurde in der Vorlesung „Umweltmesstechnik“ für Geoökologen (ab Wintersemester 1997/98) gegeben, die in wesentlichen Teilen auf Kapitel 6 des Buches „Angewandte Meteorologie“ beruhte (Foken, 2006). Die Weiterführung des Praktikums bedarf zumindest im Bereich der Datenerfassung nach mehr als 10 Jahren gewisse Verbesserungen, die Grundlagen der Versuche können unverändert bleiben bzw. auch gerne an anderen Einrichtungen übernommen werden.

Bayreuth, August 2014

Prof. Dr. Thomas Foken

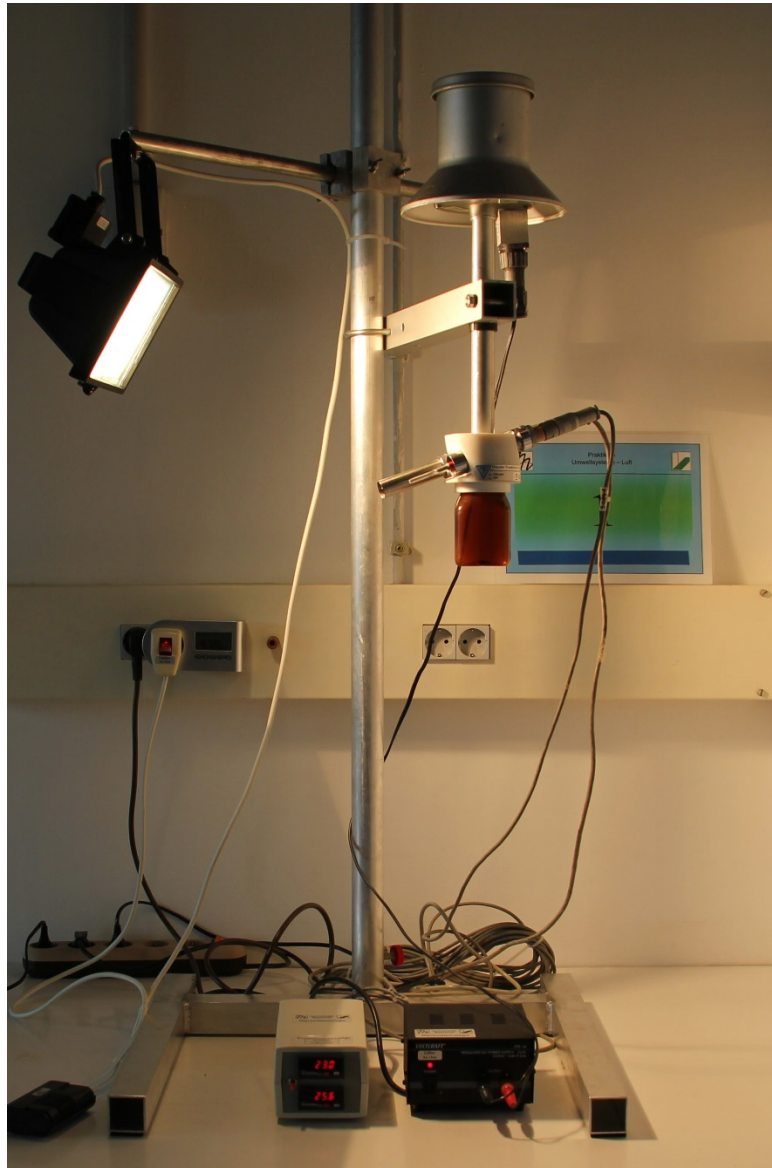
#### Literatur:

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.

Hofmann, G. (1960): Meteorologisches Instrumentenpraktikum, Universität München – Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 5.

## Versuch 1

### Bestimmung des Strahlungsfehlers bei der Temperaturmessung



Psychrometer mit einem Thermometer mit Strahlungsschutz und einem Thermometer, welches des Strahlung ausgesetzt ist

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie den Strahlungsfehler für ein nicht ventiliertes und ein nicht strahlungsgeschütztes Thermometer.

## 2. Theoretische Grundlagen

Die Temperaturmessung in der Atmosphäre ist keinesfalls trivial. Die starken Temperaturgradienten nahe der Unterlage erfordern die Festlegung einer einheitlichen Messhöhe, um eine Vergleichbarkeit der Messungen zu erreichen. Weltweit gilt dafür eine Messhöhe von 2 m. Des Weiteren dürfen Thermometer nicht der Sonnenstrahlung (direkte und diffuse) ausgesetzt werden. Diese würde durch die Wärmeabsorption zu einer zusätzlichen Erwärmung führen und einen um mehrere Grad höheren Temperaturwert ergeben. Diese Messung würde folglich nicht mehr die wahre Lufttemperatur, sondern das Absorptionsvermögen des Messelementes widerspiegeln. Um einen guten Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre und dem Messelement zu erzielen, sollte dieser belüftet sein. Dies kann auf natürliche Weise durch den Wind erfolgen oder technisch durch Zwangsbelüftung.



Abb. 1: Strahlungsschutzhütte für Temperaturmessungen (Foto: R.M. Young Company / GWU-Umwelttechnik GmbH)



Abb. 2: Elektrisches Aspirationspsychrometer nach Frankenberger (Foto: Th. Friedrichs & Co.)

Aus diesen Gründen werden gemäß dem meteorologischen Standard die Thermometer in Strahlungsschutzhütten eingebaut (Abb. 1). Diese gewähren einen Schutz gegen direkte Sonnenstrahlung und reduzieren die diffuse Strahlung auf ein Minimum. Zusätzlich werden sie durch den Wind auf natürlicher Weise belüftet. In der Nacht und in windschwachen Situationen reicht diese Belüftung oft nicht aus, so dass ein so genannter Hüttenfehler in der Größenordnung von bis zu 1 K auftreten kann. Für höhere Genauigkeitsanforderungen muss das Messelement durch einen Ventilator mit einer Strömungsgeschwindigkeit von ca.  $3 \text{ m s}^{-1}$  belüftet werden. Das klassische Messgerät ist das Aßmann'sche Aspirationspsychrometer (s. Versuch 2). Im Praktikum wird außerdem ein Psychrometer nach Frankenberger eingesetzt (Abb. 2). Es ist ein mit Widerstandsthermometern (Platin PT100) ausgerüstetes Messgerät auf der Basis des Aßmann'schen Aspirationspsychrometers.

Die Schwierigkeiten bei der Lufttemperaturmessung sind Ursache dafür, dass außerhalb geschlossener Räume nur Messgenauigkeiten bis ca. 0.1 K und bei sehr gut gepflegten Geräten

bis ca. 0.05 K erreicht werden können. Diese Anpassungsfehler sind somit wesentlich größer als der Fehler durch die Möglichkeiten der heutigen elektrischen Messtechnik (< 0.001 K).

Der Strahlungseinfluss auf die Temperaturmessung wird als Strahlungsfehler bezeichnet und kann durch Bestimmung der Absorption von Strahlung durch das Messelement als zusätzliche Erwärmung ermittelt werden. Diese hängt von wichtigen Kennzahlen ab; von der Prandtl-Zahl

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha_T} \quad (1)$$

als Verhältnis aus kinematischer Zähigkeit  $\nu$  und molekularer Temperaturleitfähigkeit  $\alpha_T$ , die für Luft etwa  $\text{Pr} = 0.71$  beträgt, von der Reynolds-Zahl

$$\text{Re} = \frac{L \cdot V}{\nu} \quad (2)$$

als Verhältnis aus Trägheitskraft und molekularer Reibungskraft ( $L$ : charakteristische Länge,  $V$ : charakteristische Geschwindigkeit) und von der Nusselt-Zahl

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (3)$$

als Kennzahl für das Wärmeleitungsvermögen in Abhängigkeit von den molekularen Kennzahlen und den Strömungsverhältnissen. Der Strahlungsfehler  $S_f$  ergibt sich somit als Funktion der Strahlungsbilanz an der Sensoroberfläche  $Q_s$ , der Sensoroberfläche  $F$  und dem Wärmeübergangsverhalten  $\sigma$ :

$$S_f = \frac{Q_s}{\sigma \cdot F} \quad (4)$$

mit

$$\sigma = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d} \quad (5)$$

$$Q_s = \varepsilon \cdot K \downarrow \cdot F_R \quad (6)$$

und mit dem Absorptionsvermögen der Oberfläche  $\varepsilon$  (für Platin gilt 0.5), mit der molekularen Wärmeübergangszahl  $\lambda$ , der Sensorlänge  $d$ , der Einstrahlung  $K \downarrow$  und der der direkten Strahlung ausgesetzten Fläche  $F_R$ . Für erzwungene Konvektion ( $0.01 < \text{Re} < 10000$ ) gilt:

$$\text{Nu} = 0.42 \text{Pr}^{0.2} + 0.57 \text{Pr}^{0.33} \cdot \text{Re}^{0.5} \quad (7)$$

$$\text{Nu}_{\text{Luft}} = 0.39 + 0.51 \text{Re}^{0.5}$$

An Sommertagen mit ungehinderter Sonneneinstrahlung lassen sich Strahlungsfehler unter 0.1 K erst bei Drahtdurchmessern des Temperaturfühlers < 20  $\mu\text{m}$  erreichen. Strahlungsfehler können somit nur bei sehr dünnen frei ausgespannten Widerstandsdrähten oder Thermoelementen gleicher Dimensionierung ausgeschlossen werden.

Der Hüttenfehler kann durch ausreichende Belüftung weitgehend beseitigt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Reynolds-Zahlen oberhalb der kritischen Reynolds-Zahl liegen sollten, um eine turbulente Strömung zu erzielen:

$$\text{Re} = \frac{L \cdot V}{\nu} \geq \text{Re}_{\text{krit}} = \begin{pmatrix} 2300 & \text{Rohr} \\ 2800 & \text{Platte} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl bilden sich laminare Strömungsverhältnisse am Sensor aus, so dass der Messwert zeitlich verzögert werden kann.

Wird von Thermoelementen abgesehen, so haben sich Platindrähte wegen ihrer stabilen Temperatur-Widerstands-Abhängigkeit zur Messung der Temperatur durchgesetzt. Der Widerstand ergibt sich nach der Beziehung

$$R(T) = R(0^\circ\text{C}) \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (9)$$

mit einem von der Reinheit des Platins abhängigen Temperaturkoeffizienten von  $\alpha = 0.00385\text{K}^{-1}$  bis  $0.00392\text{K}^{-1}$ . Durch die Beimengung von Iridium wird die Sprödigkeit des Drahtes häufig vermindert, mit der Folge eines niedrigeren Temperaturkoeffizienten. Unter diesen Bedingungen ist dann  $\beta \sim -5.85 \cdot 10^{-7}\text{K}^{-2}$ . Im meteorologischen Messbereich von  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $50\text{ }^\circ\text{C}$  ist eine weitgehend lineare Temperaturabhängigkeit gegeben. Typischerweise werden Platinthermometer mit einem Nennwiderstand von  $R(0\text{ }^\circ\text{C}) = 100\ \Omega$  hergestellt. Die Güte dieser Widerstandsthermometer ist in Deutschland in der DIN 43760 festgelegt. Es werden die Klassen A und B (Tabelle 1) unterschieden, wobei ausgesuchte Widerstandsthermometer auch mit Grenzabweichungen von nur  $\frac{1}{3}$  oder  $\frac{1}{10}$  der DIN-Klassen angeboten werden. In der Regel werden Thermometer mit  $\frac{1}{3}$  DIN Kl. B eingesetzt, die besser als Klasse A sind.

Tabelle 1: Grenzabweichungen für  $100\ \Omega$  Platin-Widerstandsthermometer (DIN 43760)<sup>\*)</sup>

| Temperatur<br>$^\circ\text{C}$ | Grenzabweichungen |            |           |            |
|--------------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|
|                                | Klasse A          |            | Klasse B  |            |
|                                | K                 | $\Omega$   | K         | $\Omega$   |
| -100                           | $\pm 0.35$        | $\pm 0.14$ | $\pm 0.8$ | $\pm 0.32$ |
| 0                              | $\pm 0.15$        | $\pm 0.06$ | $\pm 0.3$ | $\pm 0.12$ |
| 100                            | $\pm 0.35$        | $\pm 0.13$ | $\pm 0.8$ | $\pm 0.30$ |

<sup>\*)</sup> Heute wird üblicherweise  $\frac{1}{3}$  Klasse B, bezeichnet als Klasse AA, verwendet. Dabei ist bei  $0\text{ }^\circ\text{C}$  der Fehler  $\pm 0.1\text{ K}$ .

Die elektrische Messung des Widerstandes erfolgt mit Brückenschaltungen. Dabei findet die klassische Wheatstone-Brücke (Abb. 3) in Zwei- und Dreileiterschaltung kaum noch Anwendung, da sie nicht linear ist und die Temperaturabhängigkeit der Kabelwiderstände nicht voll kompensiert werden kann. Üblich sind heute u. a. Thompson-Messbrücken in Vierleiterschaltung (Abb. 4).

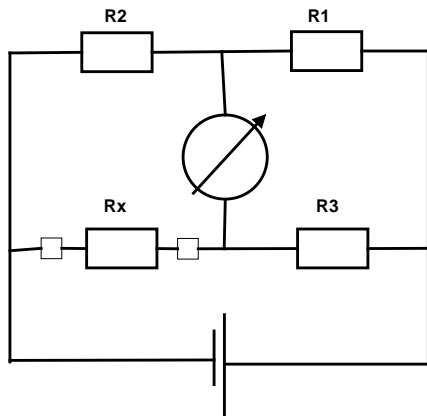


Abb. 3: Wheatstone-Brücke in 2-Leiter-Schaltung

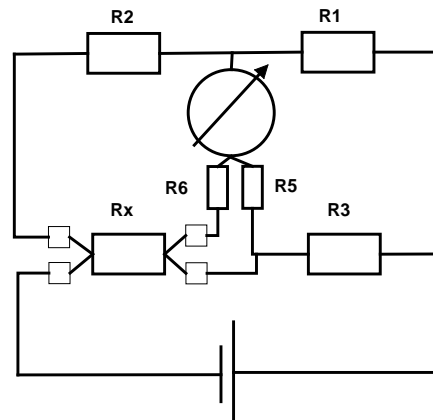


Abb. 4: Thompson-Brücke in 4-Leiter-Schaltung

### 3. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Er besteht aus einem Frankenberger Psychrometer, welches mit zwei Temperaturmeselementen ausgestattet ist. Die Messwerte können an einer Temperaturanzeige abgelesen werden. Die abschaltbare Belüftungseinrichtung erzeugt eine Belüftungsgeschwindigkeit von ca.  $3\text{ m s}^{-1}$ . Für den Versuch bleibt ein Thermometer strahlungsgeschützt und dient als Referenzmessung, während bei dem zweiten der Strahlungsschutz abgeschraubt wurde. Als eine weitere Referenzmessung befindet sich ein zusätzlicher Temperatursensor in einer strahlungsgeschützten Hütte (zwischen Versuchen 1 und 2). Eine Halogenleuchte dient als Strahlungsquelle, die stufenlos über den



Dimmer in ihrer Leistung verändert werden kann. Diese Leistung kann an der Leistungsanzeige an der Steckdosenleiste abgelesen werden.

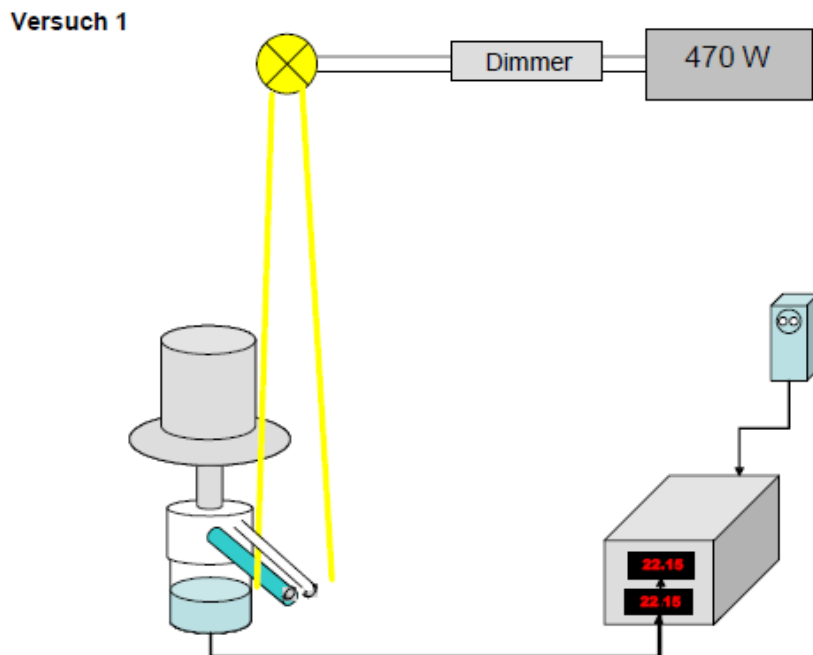


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

#### 4. Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuches sind die Temperaturanzeige, die Leuchte und das Netzteil für die Psychrometerbelüftung einzuschalten. Zum Schutz der Augen sollte die Leuchte nur bei Notwendigkeit betrieben werden, ansonsten ist der Regler in die niedrigste Stellung zu bringen.



Schalten Sie die Leuchte nur an, wenn sie benötigt wird und schauen Sie nicht direkt in die Halogenleuchte (Blendungsgefahr). Spannungsführende Systeme dürfen nicht geöffnet werden. Melden Sie bitte umgehend erkennbare Schäden an den Geräten.

Bestimmen Sie die Verstrahlung (Strahlungsfehler) eines Platinthermometers. Dazu bleibt ein Thermometer mit Strahlungsschutz unverändert und dient als Referenzthermometer, beim zweiten Thermometer ist der Strahlungsschutz abgeschraubt (Vorsicht! Glasschutz des Thermometers nicht beschädigen). Als weiteres Referenzthermometer (mit möglichem Hüttenfehler) dient der Temperatur-Feuchte Sensor HMP45a in der weißen Strahlungsschutzhütte.

Führen sie den Versuch zuerst bei laufender Belüftung durch: Verändern Sie die Leistung der Lampe in 2 Stufen gemäß Tabelle 2. Die Leistung ist an der Leistungsanzeige an der Steckdosenleiste ablesbar. Stellen Sie mit Hilfe des Dimmers die entsprechenden Werte für Stufe 1 und anschließend für Stufe 2 ein (Wartezeit bis zum Ablesen jeweils gut 5 Minuten) und wiederholen Sie die Messung für beide Stufen.

Wiederholen Sie den ganzen Versuch nochmals, diesmal bei **ausgeschalteter** Belüftung. Ihre Daten tragen Sie bitte in eine Tabelle ein (Muster s. Tabelle 3).

Tabelle 2: Einstellung des Schieberegler für den Versuch

| Stufe | Auslenkung Schieberegler | Strahlungsstromdichte |
|-------|--------------------------|-----------------------|
|       | W                        | W m <sup>-2</sup>     |
| 1     | 300                      | ca. 550               |
| 2     | 470                      | ca. 750               |

## 5. Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie die Mittelwerte aus den zwei Einzelmessungen für die weitere Auswertung. Verwerfen Sie dabei offensichtliche Ausreißer. Eine Fehlerrechnung ist nicht notwendig.
2. Stellen Sie den gemessenen Strahlungsfehler (Differenz Referenzthermometer minus Prüfthermometer) graphisch in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke (Strahlungsstromdichte) sowohl für den belüfteten Fall als auch den unbelüfteten Fall dar.
3. Bestimmen Sie das Wärmeübergangsverhalten  $\sigma$  bei maximaler Bestrahlung für belüftetes und unbelüftetes Prüfthermometer. Die Dimensionen des Temperaturfühlers sind Sensorlänge  $d = 50$  mm und Sensorquerschnitt  $L = 5$  mm ( $=8.25$  cm<sup>2</sup>). Benutzen Sie dabei den ermittelten Strahlungsfehler unter Verwendung von Gleichungen (4) und (6)
4. Bestimmen Sie als Mittelwert mit Streuung aus allen verfügbaren Messungen den Hüttenfehler.

Tabelle 3: Mustertabelle für die Auswertung (jeweils für belüfteten und unbelüfteten Fall)

| Belüftung und Bestrahlungsstufe | Strahlung         | Datum<br>.....<br>Zeit | Referenztemperatur (geschütztes Thermometer) | Prüftemperatur (ungeschütztes Thermometer) | Referenztemperatur Hütte (HMP45a) |
|---------------------------------|-------------------|------------------------|--|--|-----------------------------------|
|                                 | W m <sup>-2</sup> |                        | °C   | °C   | °C                                |
| belüftet Stufe 1                | ca. 550           | a                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | b                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | Mittel                 |  |  |                                   |
| belüftet Stufe 2                | ca. 750           | a                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | b                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | Mittel                 |  |  |                                   |
| unbelüftet Stufe 1              | ca. 550           | a                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | b                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | Mittel                 |  |  |                                   |
| unbelüftet Stufe 2              | ca. 750           | a                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | b                      |  |  |                                   |
|                                 |                   | Mittel                 |  |  |                                   |

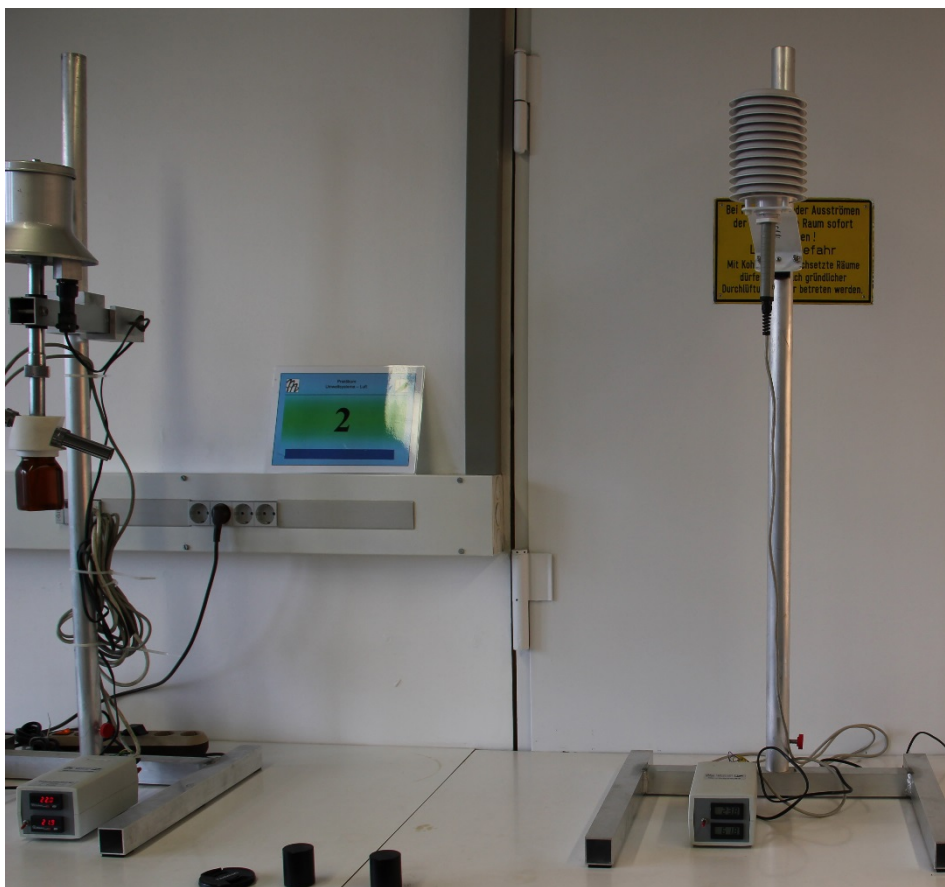
## 6. Literatur

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.

WMO (2008): Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO, Note, 8: 7th edition.

## Versuch 2

### Bestimmung der Psychrometerkonstanten bei der Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit einem Aspirationspsychrometer



Psychrometer mit regelbarer Ventilationsgeschwindigkeit (links) und Wetterhütte mit Temperatur-Feuchte-Sensor zum Vergleich (rechts)

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die Psychrometerkonstante für das Frankenberger'sche Psychrometer in Abhängigkeit von der Belüftungsgeschwindigkeit.

## 2. Theoretische Grundlagen

Das zuverlässigste Messgerät zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit, welches auch für Vergleichsmessungen herangezogen werden kann, ist das Aspirationspsychrometer nach Assmann (Abb. 1, links). Eine Konstruktion mit elektrischen Messsensoren ist das Psychrometer nach Frankenberger (Abb. 1, Mitte). Dieses besitzt zwei Platin Pt100 Thermometer, davon eines mit einem befeuchteten Mullstrumpf zur der Messung der Feuchttemperatur. Es nutzt dazu die Abkühlungswärme beim Verdunstungsprozess aus. Aus der Temperaturdifferenz zwischen trockener ( $t$ ) und feuchter ( $t'$ ) Temperatur wird mittels der Sprung'schen Psychrometerformel der Dampfdruck  $e$  bestimmt (für den Luftdruck  $p_0 = 1000 \text{ hPa}$ ,  $t = 20 \text{ °C}$  ergibt sich die Psychrometerkonstante  $\gamma = 0.667 \text{ hPa K}^{-1}$ ):

$$e = E(t') - \gamma \cdot \frac{p}{p_0} \cdot (t - t') \quad (1)$$

Die Psychrometerkonstante ist weiterhin eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und oberhalb von ca.  $2.5 \text{ m s}^{-1}$  nahezu konstant. In Höhenlagen unter  $300 \text{ m}$  üb. NN wird im Allgemeinen das Verhältnis aus aktuellem Luftdruck  $p$  und  $p_0$  gleich 1 gesetzt. Der Sättigungsdampfdruck wird mittels der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung bestimmt, für die häufig die Magnus'sche Näherungsformel verwendet wird (für  $E(t')$  ersetze  $t$  durch  $t'$ ):

$$E(t) = 6.122 \cdot e^{\frac{17.62 \cdot t}{243.12 + t}} \quad (2)$$

Weitere Feuchtemaße können Tabelle 1 entnommen werden.

Das feuchte und das trockene Thermometer dürfen nicht der Sonnenstrahlung (direkte und diffuse) ausgesetzt werden. Die Strahlungsabsorption im Messelement würde sonst zu seiner zusätzlichen Erwärmung führen und eine um mehrere Grad höhere Temperatur ergeben. Es würde dann nicht mehr die wirkliche Lufttemperatur, sondern das Absorptionsvermögen des Messensors wiedergespiegelt werden (siehe Versuch 1). Die zusätzliche Ventilation beider Thermometer dient einem schnelleren Wärmeaustausch zwischen der umgebenen Atmosphäre und dem Messelement.

Häufig werden in Strahlungsschutzhütten (Abb. 1, rechts) kombinierte Temperatur- und Feuchtesensoren verwendet. Die Hütten gewähren einen Schutz gegen direkte Sonnenstrahlung und reduzieren die diffuse Strahlung deutlich. Die Belüftung erfolgt allerdings nur passiv durch den Wind (Versuch 1).



Abb. 1. Links: Aspirationspsychrometer nach Aßmann (Foto: Th. Friedrichs & Co.). Mitte: Elektrisches Aspirationspsychrometer nach Frankenberger (Foto: Th. Friedrichs & Co.). Rechts: Strahlungsschutzhütte für Temperaturmessungen (Foto: R.M. Young Company/GWU-Umwelttechnik GmbH).

Tabelle 1: Übersicht zu häufig genutzten Feuchtemaßen

| Feuchtemaß  | Formel                                  |
|---|---|
| Relative Feuchte: Verhältnis aus Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck in %   | $R = \frac{e}{E(t)} \cdot 100\%$        |
| Absolute Feuchte: Masse Wasserdampf pro Volumen feuchter Luft in $\text{kg m}^{-3}$   | $a = \frac{0.21667 \cdot e}{T}$         |
| Spezifische Feuchte: Masse Wasserdampf pro Masse feuchter Luft in $\text{kg kg}^{-1}$ , kann mit hinreichender Genauigkeit dem Mischungsverhältnis gleichgesetzt werden | $q = 0.622 \frac{e}{p - 0.378 \cdot e}$ |
| Mischungsverhältnis: Masse Wasserdampf pro Masse trockener Luft in $\text{kg kg}^{-1}$  | $m = 0.622 \frac{e}{p}$                 |

### 3. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Er besteht aus einem Psychrometer nach Frankenberger, welches mit zwei strahlungsgeschützten Temperatursensoren (PT100) ausgestattet ist, wobei einer durch einen Mullstrumpf befeuchtet ist. Der Mullstrumpf führt in ein Befeuchtungsgefäß mit destilliertem Wasser. Die Messwerte können an einer Temperaturanzeige abgelesen werden. Die mit einem Regelnetzteil verbundene Belüftungseinrichtung erzeugt eine Belüftungsgeschwindigkeit von  $0 \text{ m s}^{-1}$  bis ca.  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Als ein weiteres Messgerät befindet sich ein zusätzlicher Feuchte- und Temperatursensor (HMP45A) in einer strahlungsgeschützten Hütte (zwischen Versuchen 1 und 2). Für Referenzmessungen steht ein Aßmann'sches Aspirationspsychrometer zur Verfügung.

## Versuch 2

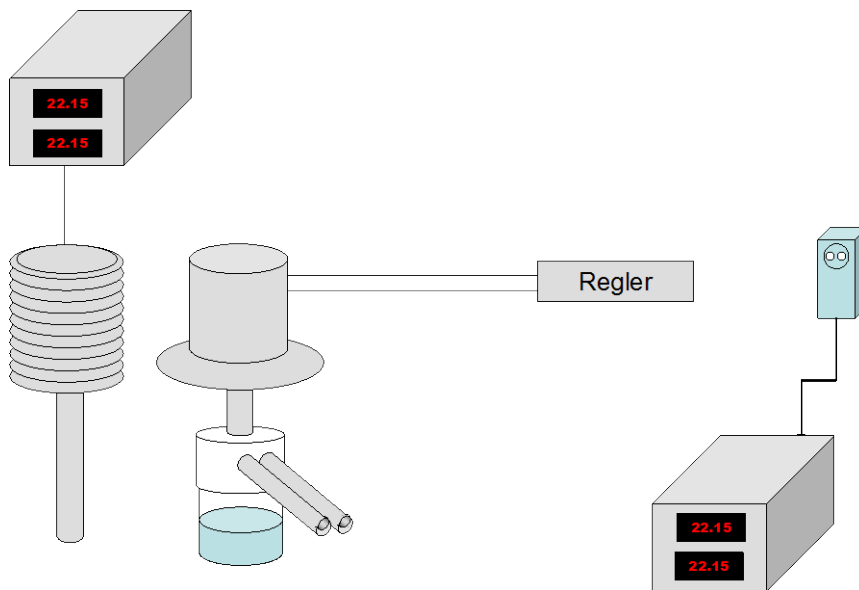


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

### 4. Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuches sind die Temperaturanzeige und die Netzteile für die Psychrometerbelüftung und den kombinierten Temperatur-Feuchte-Sensors einzuschalten.

**Achten Sie darauf, dass der Spannungsregler zur Einstellung der Belüftungsgeschwindigkeit auf Null steht, die Belüftung vor Versuchsbeginn also unbedingt AUSGESCHALTET ist.**



Spannungsführende Systeme dürfen nicht geöffnet werden. Melden Sie bitte umgehend erkennbare Schäden an den Geräten.

#### 4.1 Bestimmung der aktuellen Luftfeuchtigkeit

**ACHTUNG: Belüftung des Frankenger Psychrometers bis zum eigentlichen Versuchsbeginn ausgeschaltet lassen!**

Bestimmen Sie vor Beginn des eigentlichen Versuches und nach dessen Abschluss jeweils die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte. Benutzen Sie dazu das Aßmann'schen Aspirationspsychrometer (Messung der trockenen und feuchten Temperatur) und den kombinierten Temperatur-Feuchte-Sensor (HMP45A) in der Strahlungsschutzhütte (Umrechnung der Messwerte s. Tabelle 2). Überprüfen Sie bei den Psychrometern, ob der Mullstrumpf ausreichend befeuchtet ist. Die notwendigen Messungen sind gemäß der Vorlage (Tabelle 3) aufzuzeichnen. Die Thermometer haben eine Einstellzeit von ca. drei bis vier Minuten.

Tabelle 2: Umrechnung der Messwerte des kombinierten Temperatur-Feuchte-Sensors.

| Messgröße            | Ausgangssignalebereich | Messbereich       |
|----------------------|------------------------|-------------------|
| Temperatur           | 0 V bis 1 V            | -40 °C bis +60 °C |
| Relative Luftfeuchte | 0 V bis 1 V            | 0 % bis 100 %     |

Das Åßmann'sche Aspirationspsychrometer dient der Bestimmung der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Es besteht aus zwei nebeneinander montierten Quecksilber- oder Alkoholthermometern.

Beide Thermometer sind aus Gründen des Strahlungsschutzes in einer blank polierten Metallhülse montiert und werden durch einen durch ein mechanisches Uhrwerk betriebenen Ventilatorkopf belüftet (Ventilationsgeschwindigkeit ca.  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ ). Der Quecksilber- oder Alkoholvorratsbehlter eines der Thermometer wird durch einen wassergetrnkten Strumpf stetig befeuchtet (Feuchtthermometer), das andere Thermometer wird trocken gehalten (Trockenthermometer).

Zur Verdunstung des Wassers wird Verdunstungswärme  $L$  ( $\sim 2500 \text{ kJ}\cdot\text{kg K}^{-1}$  bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) benötigt. Diese zur Verdunstung notwendige Energie wird zum Teil dem Vorratsbehälter des Feuchtthermometers entzogen.

Vor der Messung wird der Strumpf des Åßmann'schen Aspirationspsychrometers befeuchtet und der Aspirator vorsichtig bis zum Anschlag aufgezogen. Das Gerät wird zur Messung in ca. 2 m Höhe an einem bereitstehenden Stativ im Labor aufgehängt. Die Temperaturen werden zum Zeitpunkt ihres tiefsten Wertes nach 3 bis 5 Minuten abgelesen. Die Messwerte werden in Tabelle 3 eingetragen.

Tabelle 3: Mustertabelle für aufzunehmende Messwerte für Vergleichsmessungen.

| Luftdruck im Labor in hPa (Gruppe 4): |   |  |       |       |     |        |     |
|---------------------------------------|---|--|-------|-------|-----|--------|-----|
|                                       | Frankenberger Psychrometer (Trockenthermo.) | Åßmann'sches Psychrometer (ventiliert) |       |       |     | HMP45A |     |
|                                       | t °C  | t °C                                   | t' °C | e hPa | R % | t °C   | R % |
| Versuchs-anfang                       |   |  |       |       |     |        |     |
| Versuchs-ende                         |   |  |       |       |     |        |     |

#### 4.2 Bestimmung der Psychrometerkonstante

Bestimmen Sie die Psychrometerkonstante in Abhängigkeit von der Belüftungsgeschwindigkeit. Tragen Sie zuerst die Trocken- und Fechttemperatur bei ausgeschalteter Belüftung in Tabelle 4 (Null Volt) ein. Anschließend verändern Sie die Belüftungsgeschwindigkeit in mehreren Stufen indem Sie zuerst mit der kleinsten Spannung den Motor betreiben (**Motor startet erst bei ca. 4 V**) und dann jeweils in 1.0 Volt Schritten die Spannung erhöhen (bis zur max. Volt-Zahl bzw. Belüftungsgeschwindigkeit bei ca.  $3 \text{ m s}^{-1}$ ). Beachten Sie, dass die Thermometer eine Einstellzeit von ca. 3 bis 5 Minuten benötigen.

Notieren Sie jeweils die trockene und feuchte Temperatur  $t$  und  $t'$  des Psychrometers nach Frankenberger und zusätzlich als Referenz jeweils die Temperatur und Feuchte des Temperatur-Feuchte-Sensors (HMP45A) in Tabelle 4.

Wenn sich während des Versuches die Luftfeuchte und Lufttemperatur der Vergleichsmessung im Laborraum ändern sollte, können die Messwerte durch den Abzug des linearen Trends der Temperaturänderung im Laborraum korrigiert werden.

Ermitteln Sie zuerst den Dampfdruck  $e$  nach Formel (1) und (2) für alle Messpaare  $t$  und  $t'$  bei konstanten Bedingungen ( $\gamma=0.667$ ) und bestimmen Sie daraus den mittleren Dampfdruck  $e$  in hPa. **Die Messung bei ausgeschalteter Belüftung (Null Volt) darf dabei NICHT bei der Mittelwertberechnung herangezogen werden!**

Dieser Mittelwert dient als Bezugswert, um wiederum nach Umstellung der Formel (1) die Psychrometerkonstante in Abhängigkeit von der Belüftungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Die jeweiligen Psychrometerkonstanten tragen Sie bitte in Tabelle 4 ein.

## 5. Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie aus den in Tabelle 3 und 4 eingetragene Messwerten den entsprechenden Dampfdruck  $e$  in hPa bzw. relative Luftfeuchte  $R$  in % nach Kapitel 4.2. Vergleichen Sie den Verlauf der relative Luftfeuchte vom Frankenberger Psychrometer und des HMP45a und diskutieren Sie das Ergebnis.
2. Stellen Sie graphisch die berechneten Psychrometerkonstanten  $\gamma$  in Abhängigkeit von der Belüftungsgeschwindigkeit (bzw. Volt-Stufen) dar. Ab welcher Geschwindigkeit (Volt-Zahl) nimmt die Psychrometerkonstante einen konstanten Wert ein?

Tabelle 4: Mustertabelle für die Auswertung

| Zeit | Belüftung | Frankenberger Psychrometer |       |       |     |                   | HMP45A  |        |
|------|-----------|----------------------------|-------|-------|-----|-------------------|---------|--------|
|      |           | t °C                       | t' °C | e hPa | R % | P-Konst. $\gamma$ | t in °C | R in % |
|      | Null V    |                            |       | XXX   | XXX | XXX               |         |        |
|      | 4 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 5 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 6 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 7 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 8 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 9 V       |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 10 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 11 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 12 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 13 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 14 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |
|      | 15 V      |                            |       |       |     |                   |         |        |

## 6. Literatur

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten



## Versuch 3

### Bestimmung der Ausbreitungsklasse mit einem Ultraschallanemometer



Ultraschallanemometer mit Auswerterechner

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die zur Zeit des Praktikums in Bayreuth herrschende Ausbreitungsklasse mit einem Ultraschallanemometer.

## 2. Theoretische Grundlagen

Es können folgende typische Ausbreitungssituationen beobachtet werden, die stabilitäts- und windgeschwindigkeitsabhängig sind (Abb. 1):

- Bei hohen Windgeschwindigkeiten sind die Turbulenzwirbel klein und die Wolke der Luftverunreinigungen expandiert schnell. Zu beachten ist, dass bei Windgeschwindigkeiten über  $6 \text{ m s}^{-1}$  immer von nahezu neutraler Schichtung ausgegangen werden kann.
- Bei etwas geringeren Windgeschwindigkeiten und geringerer Einstrahlung und noch kleinen Turbulenzwirbeln entsteht eine schlangenförmige Abwärtsbewegung (coning).
- Entsprechen die Turbulenzwirbel ungefähr den typischen Ausdehnungen der Rauchwolke, so kommt es zu Seitwärts- und Auf- und Abwärtsbewegungen. Dies tritt bei schwachwindigen und sonnigen Situationen auf (looping).
- Eine völlig horizontale Ausbreitung wird bei schwacher Luftbewegung in klaren Nächten festgestellt (fanning), wobei bei Absinkinversionen die Rauchwolke zum Boden gedrückt wird (fumigation).

Die Bestimmung der Stabilität erfolgt in Stabilitätsklassen, deren Definition sich aus meteorologischen Beobachtungen oder aus der stabilitätsabhängigen Schwankung der Windrichtung ableiten lässt. Eine Bestimmung ist auch aus der Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  der lateralen Windkomponente  $\sigma_v$  normiert mit dem mittleren Wind  $\bar{u}$  möglich (bei Mittelung ist der Nordsprung zwischen  $360^\circ$  und  $0^\circ$  zu beachten!).

$$\sigma_\varphi \approx \frac{\sigma_v}{\bar{u}} \quad (1)$$

Damit lassen sich die in Tabelle 1 angegebenen Stabilitätsklassen nach Pasquill bilden. Zu beachten ist, dass im heterogenen Gelände eine höhere Standardabweichung der Windrichtung und damit labilere Schichtung vorgetäuscht werden kann. Eine zusätzliche Erhöhung kann durch Messungen in Gebäudenähe, wie während des Versuches auf dem Gebäudedach, erfolgen.

Eine Bestimmung der Stabilität ist ebenfalls aus der Windgeschwindigkeit, der Strahlung und der Bewölkung möglich (Tabelle 2).

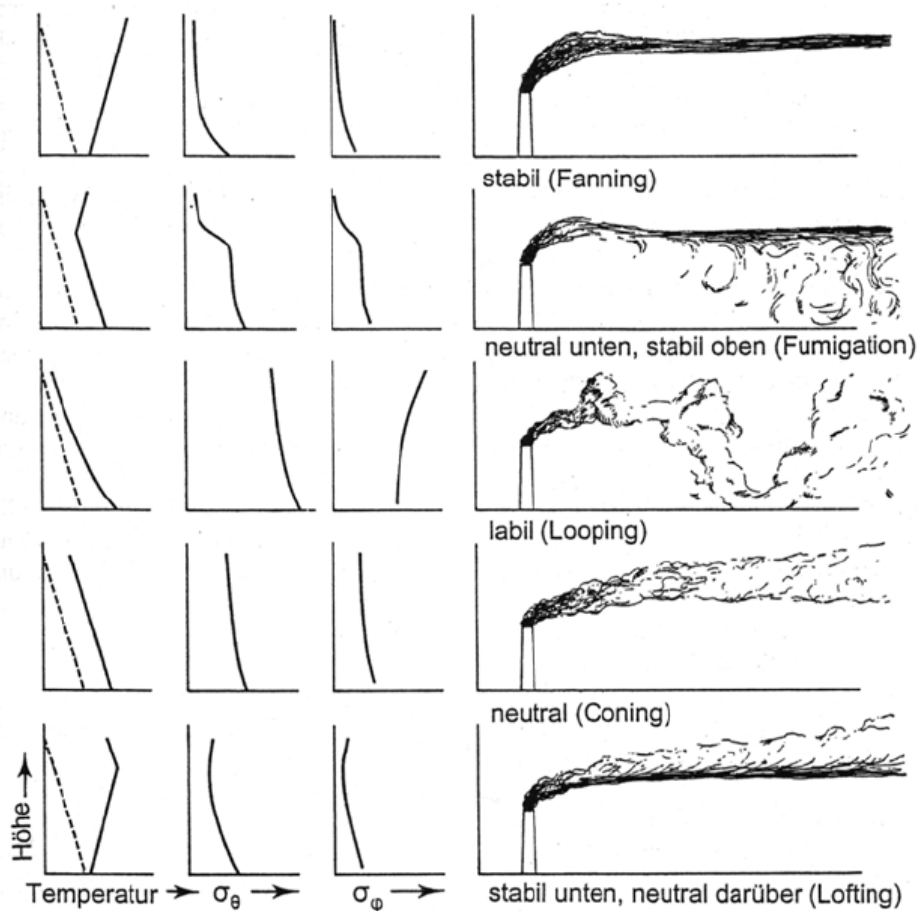


Abb. 1: Rauchfahnenentwicklung in Abhängigkeit von der Stabilität (Kraus, 2000); auf der linken Seite sind die zugeordneten Temperaturprofile (gestrichelt: trockenadiabatischer Temperaturgradient), Profile der Standardabweichung der Windrichtung und Profile der Standardabweichung der vertikalen Schwankungen der Windrichtung dargestellt.

Tabelle 1: Definition der Pasquill-Klassen anhand der Standardabweichung der Windrichtung.

| Pasquill-Klasse | Beschreibung  | $\sigma_\varphi$ |
|-----------------|---------------|------------------|
| A               | extrem labil  | 25               |
| B               | labil         | 20               |
| C               | leicht labil  | 15               |
| D               | neutral       | 10               |
| E               | leicht stabil | 05               |
| F               | stabil        | 2.5              |

Tabelle 2: Bestimmung der Stabilitätsklasse aus meteorologischen Parametern.

| Bodenwind<br>$\text{m s}^{-1}$ | mittlere Einstrahlung am Tag |       |         | Bewölkung in der Nacht          |            |
|--------------------------------|------------------------------|-------|---------|---------------------------------|------------|
|                                | stark                        | mäßig | schwach | dünne Wolken<br>oder $\geq 4/8$ | $\leq 3/8$ |
| < 2                            | A                            | A-B   | B       | E                               | F          |
| 2                              | A-B                          | B     | C       | D                               | E          |
| 4                              | B                            | B-C   | C       | D                               | D          |
| 6                              | C                            | C-D   | D       | D                               | D          |
| > 6                            | C                            | D     | D       | D                               | D          |

Um Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsschwankungen bis etwa 10 Hz auflösen zu können reichen übliche Schalensternanemometer und Windfahnen (Versuch 5) nicht aus. Heute stehen dafür nahezu trägheitslose Ultraschallanemometer zur Verfügung. Ultraschallanemometer arbeiten nahezu ausschließlich nach dem Laufzeitverfahren mit direkter Zeitbestimmung. Dabei wird entlang einer Messstrecke von beiden Seiten ein Ultraschallsignal (ca. 100 kHz) ausgesandt und auf der anderen Seite wieder empfangen. Bedingt durch den Wind wird das Ultraschallsignal in eine Richtung schneller und in die andere langsamer ausgestrahlt. Die genauen Laufzeiten für beide Richtungen des Ultraschallsignals dienen der Bestimmung der Windgeschwindigkeit:

$$t_{1,2} = \frac{\sqrt{c^2 - u_n^2} \pm u_d}{c^2 - u_n^2} \cdot d \quad (2)$$

Dabei ist  $d$  die Messstreckenlänge und  $u_d$  die Windkomponente in Richtung der Messstrecke, während  $u_n$  die dazu normale laterale Komponente ist ( $c$ : Schallgeschwindigkeit). Die Windgeschwindigkeit in Messstreckenrichtung und die Schallgeschwindigkeit werden aus den reziproken Laufzeiten bestimmt:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} \cdot u_d \quad (3)$$

$$\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} \cdot c \quad (4)$$

Die Schallgeschwindigkeit ist temperatur- und feuchteabhängig ( $e$ : Partialdruck des Wasserdampfes,  $p$ : Luftdruck):

$$c^2 = 403 T \left( 1 + 0.32 \frac{e}{p} \right) \quad (5)$$

Aus ihr lässt sich die so genannte Schalltemperatur ermitteln, die etwa der virtuellen Temperatur (siehe Vorlesung) entspricht und sich nur um wenige Grade von der wahren Lufttemperatur unterscheidet:

$$T_s = T \left( 1 + 0.32 \frac{e}{p} \right) = \frac{d^2}{1612} \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 \quad (6)$$

Eine Umrechnung in die wahre Temperatur ist möglich, wobei geometrische Parameter des Anemometers und die Luftfeuchte berücksichtigt werden müssen.



Abb. 2. Ultraschallanemometer der Firma Young mit schrägen Messstrecken in omni-directional Bauform (Foto: R.M. Young Company / GWU-Umwelttechnik GmbH).

Die Koordinaten der Ultraschallanemometer waren in der Anfangszeit überwiegend kartesisch angeordnet. In den letzten Jahren werden zunehmend Anemometer mit um 120° schräg versetzten Messstrecken (Abb. 2) gebaut, womit eine geringere Störung des Strömungsflusses erreicht wurde. Dabei wurden Messwertgeber entwickelt, die aus allen Richtungen angeströmt werden können (omni-directional).

### 3. Versuchsaufbau

Das zur Messung genutzte Ultraschallanemometer befindet sich auf dem Flachdach des Gebäudes GEO I. Um die Arbeitsweise des Gerätes demonstrieren zu können, ist ein weiteres Gerät am Messplatz im Laborraum aufgebaut. Die Daten werden auf dem Computer FAN-V5 im Labor online angezeigt und können als Datendateien abgespeichert werden. Zur Auswertung steht auf dem Rechner das Programm Microsoft EXCEL zur Verfügung.

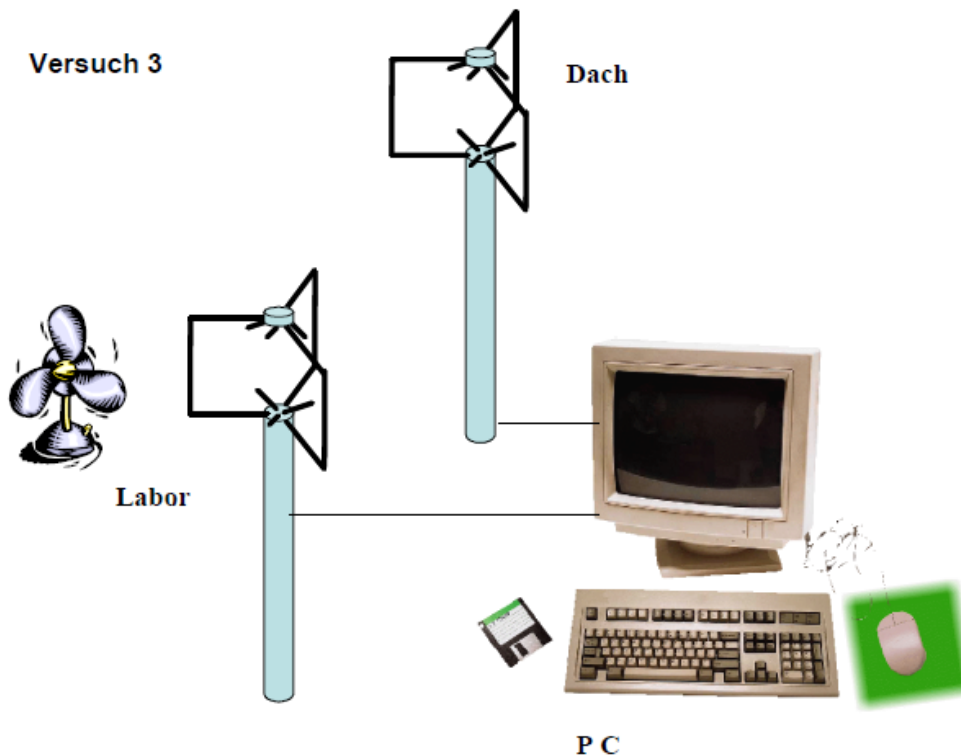


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung.

### 4. Versuchsdurchführung



Zu Beginn ist zuerst der Computer FAN-V5 einzuschalten, hochzufahren und die Anmeldung durch den Nutzer "FAN" (ohne Passwort) durchzuführen. **Erst dann** die Stromversorgung für die Ultraschallanemometer einschalten!

Spannungsführende Systeme dürfen nicht geöffnet werden. Melden Sie umgehend erkennbare Schäden an den Geräten.

Beim Umgang mit Ultraschallanemometern ist Vorsicht geboten, damit die Konstruktion nicht mechanisch beschädigt wird.

Starten Sie das Programme „YoungCOM1\_Labor“ und wählen Sie mit einem Doppelklick das Verzeichnis 'Daten Labor' als Speicherverzeichnis aus. Anschließend starten die das Programm „YoungCOM2\_Dach“ (Datenverzeichnis 'Daten Dach'). Verschieben Sie die beiden Fenster so, dass sich diese übereinander auf dem Bildschirm befinden (Abb. 4). Das zweite Programm zeichnet die Daten, die auf dem Dach gemessen werden, und das andere die Daten des Ultraschallanemometers im Laborraum auf.

Machen Sie sich zu Beginn des Versuches mit der Arbeitsweise des Ultraschallanemometers vertraut indem Sie es von verschiedenen Richtungen anblasen (Föhn) und das sofortige Reagieren des Sensors an der Bildschirmanzeige für die drei Windkomponenten und die Temperatur verfolgen. Danach starten Sie eine 30minütige Messserie des Anemometers auf dem Dach und speichern diese auf dem Rechner ab. Der Start muss kurz vor Minute 30 oder 00 erfolgen. Das Stopp-Signal geben Sie kurz nach Minute 30 oder 00. Dazwischen wird eine 30minütige Zeitreihe mit ca. 10 Hz Abtastung aufgezeichnet.

Um die Zeit zu nutzen, bestimmen Sie zwischenzeitlich aus visuellen Beobachtungen an Rauchfahnen (soweit vorhanden) und nach Tabelle 2 die Stabilitätsklassen. Gegeben Sie sich dazu ins Halbgeschoss 3, Gebäude GEO I und öffnen Sie die linke Tür zum Dach des Gebäudes. Von dort haben sie eine gute Übersicht über Bayreuth.

**BITTE NICHT auf das Dach hinaustreten!!**

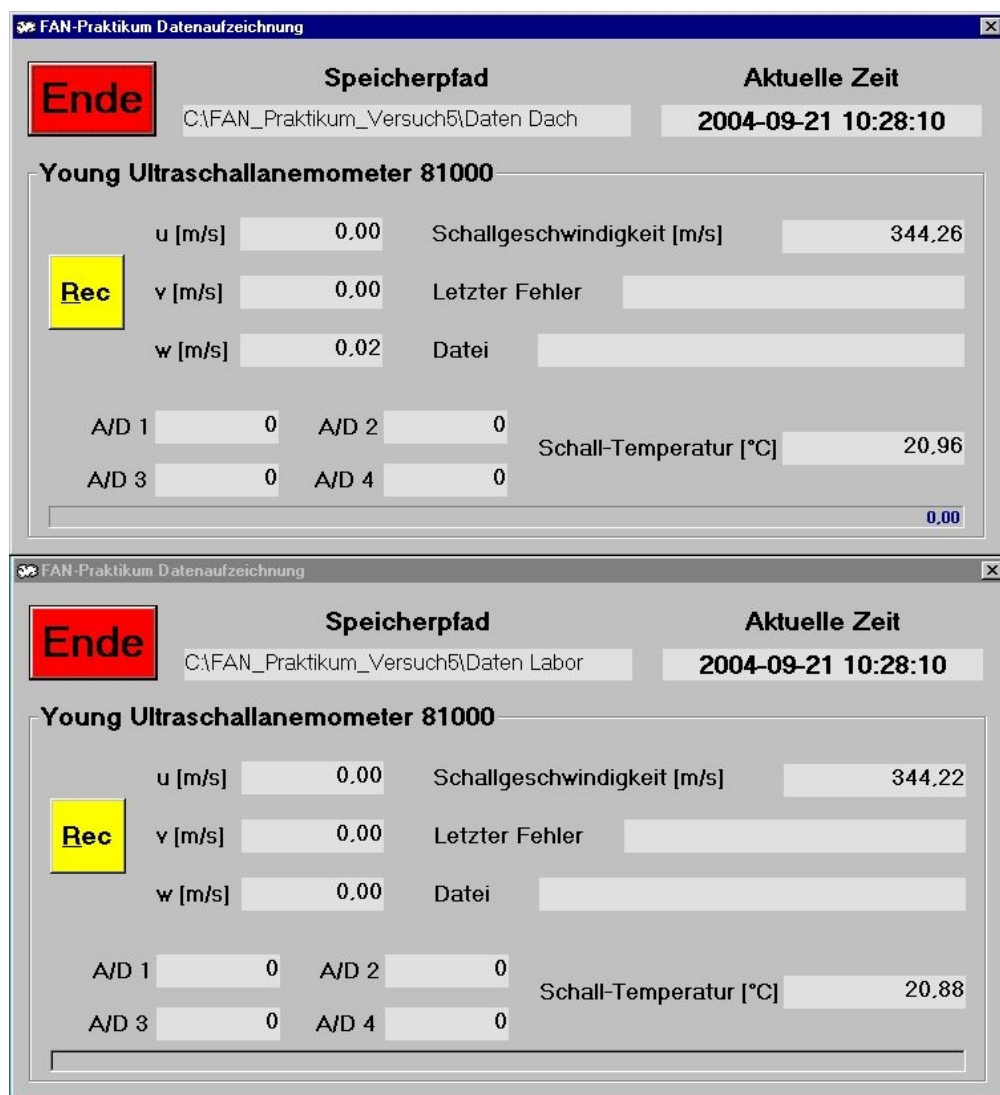


Abb. 4: Software zur Messwerterfassung der Ultraschallanemometer.

Die im entsprechenden Unterverzeichnis gesicherten Datendateien enthalten im Dateinamen die Messzeit in MEZ. Die Datei hat eine Größe von ca. 1 MB. Die Weiterbearbeitung erfolgt mit EXCEL. Die Datei können Sie auf eine Diskette speichern (spätere Weiterbearbeitung z. B. zu Hause).

Nach dem Zeitkanal enthalten die Kanäle 1 bis 4 die Messsignale (Kanal 1 entspricht der  $u$ -Komponente des Windes, Kanal 2 der  $v$ -Komponente, Kanal 3 entspricht dem Vertikalwind  $w$ ;

Kanal 4 der Schalltemperatur in °C). die Kanäle 5 bis 8 sind ungenutzt und der Kanal 9 ist eine Qualitätsziffer. Wenn diese verschieden von Null ist muss die Datenzeile gelöscht werden.  
**ACHTUNG: Löschen Sie zudem alle unsinnigen Datenpaare  $u$  und  $v$  (gültiger Wertebereich für  $u$  und  $v$ :  $-20$  bis  $+20$  m s<sup>-1</sup> aus der ganzen Zeitreihe.**

## 5. Versuchsauswertung

- Bestimmen Sie visuell aus Beobachtung der Strahlung und der Bewölkung die Stabilitätsklasse (Tabellen 2 und 3).

Tabelle 3: Mustertabelle für die visuelle Bestimmung der Stabilitätsklasse.

| Datum | Zeit | geschätzte Einstrahlung | Bewölkung in Achtern | Pasquill-Klasse |
|-------|------|-------------------------|----------------------|-----------------|
|       |      |                         |                      |                 |

- Bestimmen Sie visuell aus Beobachtung der Rauchfahnen die Stabilitätsklasse (Angabe der Zeit der Beobachtung und der Lage der Schornsteine, siehe Abb. 1).
- Ermitteln Sie aus dem aufgezeichneten und korrigierten Messdaten des Ultraschallanemometers für alle Messzeitpunkte aus den beiden horizontalen Windkomponenten  $u$  (Kanal 1, WE-Komponente, positiv für Westwind) und  $v$  (Kanal 2, SN-Richtung, positiv für Südwind) die entsprechenden Windgeschwindigkeiten (Satz des Pythagoras) und mit Hilfe trigonometrischer Gesetze (siehe Muster-Excel-Tabelle) die Windrichtungen nach **meteorologischer Konvention** und Mitteln Sie alle Geschwindigkeiten und Richtungen anschließend arithmetisch (**skalares Mittel**).
  - Ermitteln Sie aus dem aufgezeichneten und korrigierten Messdaten des Ultraschallanemometers aus allen Messwerten der jeweiligen  $u$ - und  $v$ -Komponente arithmetisch die mittlere  $\bar{u}$ - und  $\bar{v}$ -Komponente und aus diesen beiden Werten 1. die mittlere Windgeschwindigkeit (Pythagoras) und 2. trigonometrisch die mittlere Windrichtung (**vektorielles Mittel**).  
Vergleichen Sie die jeweiligen Mittelungsmethoden 3a) und 3b) und deuten Sie das Ergebnis (Hinweis: Nordsprung der Windrichtung).
- Bestimmen Sie zusätzlich zum vektoriellen Mittelwert  $\bar{\varphi}$  (3b) die Standardabweichung  $\sigma_{\varphi}$  für die in 3a berechneten Windrichtungen laut Gleichung 8 und anschließend die Pasquill-Klassen laut Tabelle 1. Diskutieren Sie die Ergebnisse der drei Stabilitätsklassenbestimmung (Aufgaben 1 und 2 und 4).

$$\bar{\varphi} = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (7)$$

bzw.  $\bar{\varphi}$  vektoriell bestimmt

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{\varphi} - \varphi_i)^2} \quad (8)$$

## **6. Literatur**

Blackadar, A.K. (1987): Turbulence and Diffusion in the Atmosphere. Springer, Berlin, Heidelberg, 185 pp.

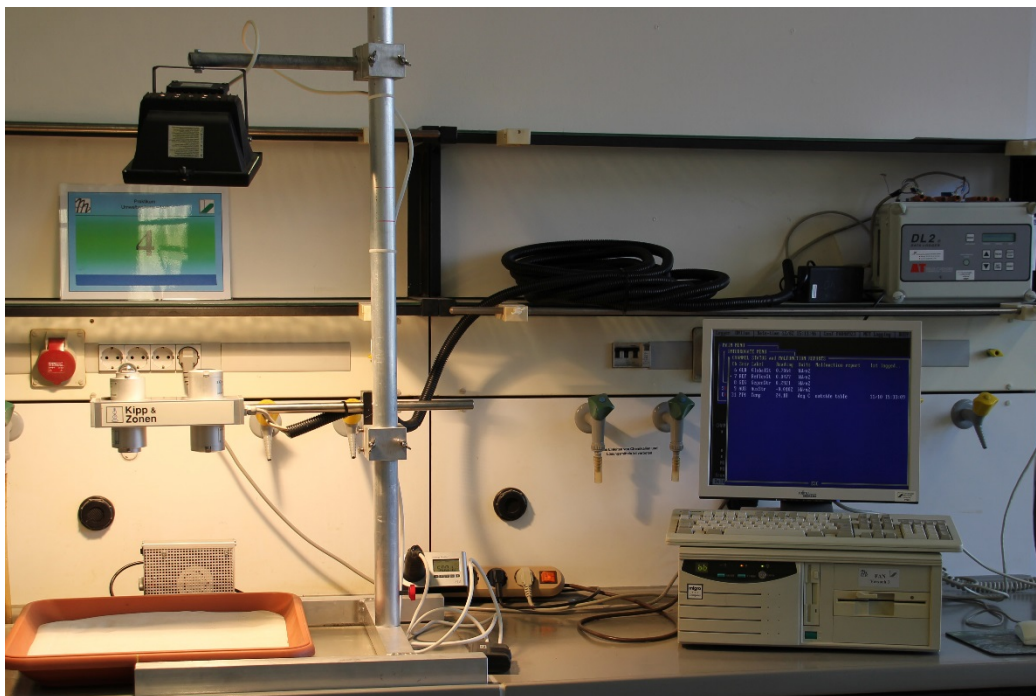
Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.

Kraus, H. (2000): Die Atmosphäre der Erde. Springer, Berlin, Heidelberg, 470 pp.



## Versuch 4

### Bestimmung der kurzwelligen und langwelligen Strahlungsströme und der Albedo für verschiedene Unterlagen



Strahlungsbilanzmesser über Sandunterlage (links)  
und Auswerterechner mit Logger (rechts)

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die vier Komponenten der Strahlungsbilanz und ermitteln Sie die Albedo für verschiedene Unterlagen.

## 2. Theoretische Grundlagen

Die Strahlung in der Atmosphäre wird in die kurzwellige (Sonnen-) Strahlung und die langwellige (Wärme-) Strahlung (Wellenlänge  $> 3 \mu\text{m}$ ) eingeteilt (Abb. 1). Damit ergibt sich die Strahlungsbilanz ( $Q_s^*$ ) als Summe aus der kurzwelligen abwärts gerichteten Einstrahlung vorwiegend von der Sonne ( $K\downarrow$ , Globalstrahlung, zusammensetzt aus der diffusen Himmelsstrahlung und der direkten Sonnenstrahlung), der kurzwelligen aufwärts gerichteten reflektierten Strahlung ( $K\uparrow$ , Reflexstrahlung), der langwelligen aufwärts gerichteten emittierten infraroten Strahlung ( $I\uparrow$ : Ausstrahlung) und der langwelligen abwärts gerichteten von Gasen, Wolken, Aerosole emittierten infraroten Strahlung ( $I\downarrow$ , Gegenstrahlung):

$$Q_s^* = K\uparrow + K\downarrow + I\uparrow + I\downarrow \quad (1)$$

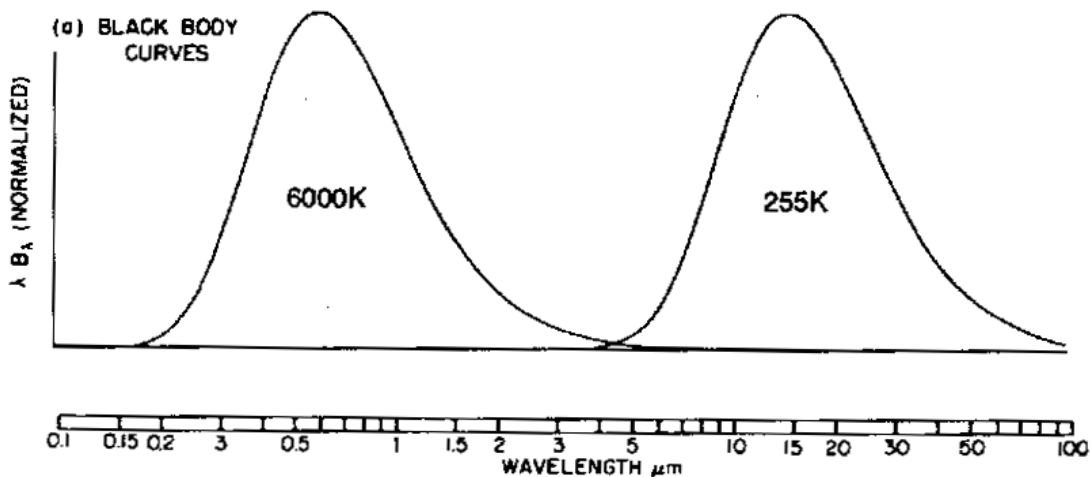


Abb. 1: Energieverteilung der kurzwelligen und langwelligen Strahlung (schematisch).

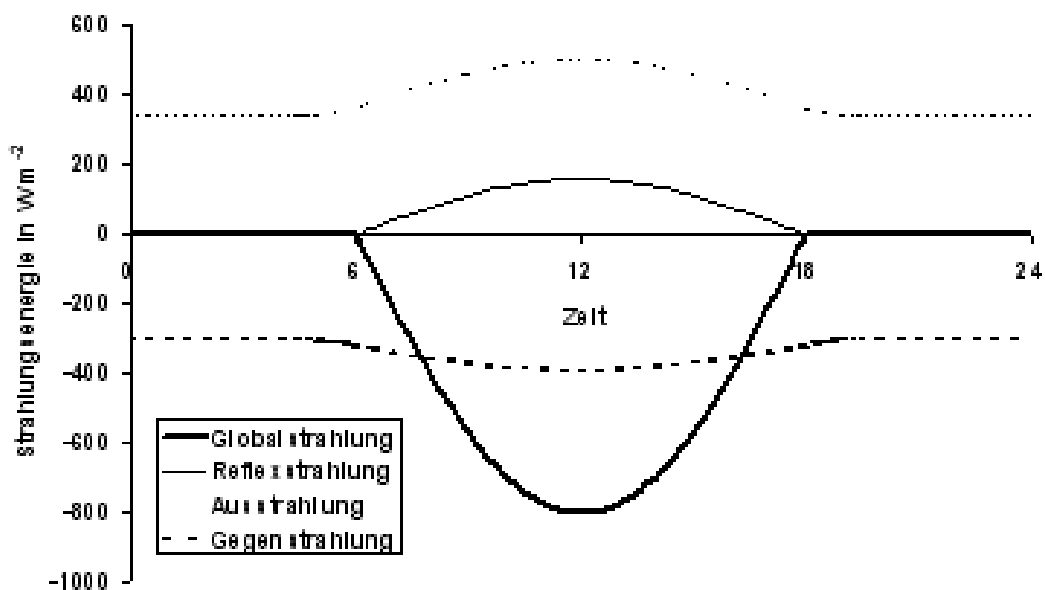


Abb. 2: Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanz (schematisch).

Dabei werden die von der Oberfläche weg gerichteten Komponenten in der Regel positiv angesetzt. Die Einstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre wird als Solarkonstante bezeichnet. Nach Messungen beträgt die mittlere Solarkonstante für die kurzwellige Einstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre im Jahresmittel  $S = 1368 \text{ W m}^{-2}$ . Der nach Durchstrahlung der Erdatmosphäre an der Erdoberfläche ankommende Anteil der Strahlung ist durch zahlreiche Prozesse (Absorption, Reflektion, Streuung), durch Wolken, Gase und Aerosole um mindestens 15 % bis 30 % reduziert. Den typischen Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanzgleichung zeigt Abb. 2, wobei nach mikrometeorologischer Vereinbarung die Bilanzterme mit umgedrehten Vorzeichen eingehen.

Das Verhältnis aus reflektierter und einfallender kurzwelliger Strahlung wird als Albedo bezeichnet

$$\alpha = -\frac{K \uparrow}{K \downarrow} \quad (2)$$

und ist in Tabelle 1 für verschiedene Unterlagen angegeben.

Tabelle 1: Albedo  $\alpha$  verschiedener Unterlagen

| Unterlage                  | Albedo $\alpha$ |
|----------------------------|-----------------|
| sauberer Schnee            | 0.75 bis 0.98   |
| grauer Boden, trocken      | 0.25 bis 0.30   |
| grauer Boden, feucht       | 0.10 bis 0.12   |
| weißer Sand                | 0.34 bis 0.40   |
| Getreide                   | 0.10 bis 0.25   |
| Gras                       | 0.18 bis 0.20   |
| Eichen                     | 0.18            |
| Kiefern                    | 0.14            |
| Wasser, rau, Sonnehöhe     | 0.13            |
| Wasser, rau, Sonnehöhe 30° | 0.025           |

Die langwelligigen Strahlungsströme werden nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz bestimmt (Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma_{SB}$ :  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ , infrarotes Emissionsvermögen siehe Tabelle 2):

$$I = \varepsilon_{IR} \cdot \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad (3)$$

Aufgrund der Tatsache, dass der Erdboden häufig wärmer als Wolken und Aerosole ist, ist die Ausstrahlung in der Regel größer als die Gegenstrahlung (Ausgeglichen bei Nebel). Eine höhere Gegenstrahlung kann durch Aufzug tiefer Wolken nach vorheriger Strahlungsabkühlung des Erdbodens auftreten. Bei klarem Himmel entspricht die Gegenstrahlung etwa einer Temperatur von  $-55 \text{ °C}$ .

Tabelle 2: Infrarotes Emissionsvermögen verschiedener Unterlagen

| Unterlage            | Emissionsvermögen |
|----------------------|-------------------|
| Wasser               | 0.960             |
| frischer Schnee      | 0.986             |
| Nadeln               | 0.971             |
| trockner feiner Sand | 0.949             |
| feuchter feiner Sand | 0.962             |
| dichtes grünes Gras  | 0.986             |

Strahlungsflüsse werden in der Meteorologie als Energieflussdichten dargestellt. Während die Maßeinheit für die Energie Joule (J) und für die Leistung Watt ( $W = \text{J s}^{-1}$ ) ist, wird die Energie-

flussdichte in  $W\ m^{-2}$  angegebenen. Folglich hat die Energieflussdichte ‚scheinbar‘ keinen Zeitbezug. Die exakte Einheit wäre  $J\ s^{-1}\ m^{-2}$ . Soll die Energie bestimmt werden, die ein Quadratmeter in einer Stunde erhält, muss die Energieflussdichte mit 3600 s multipliziert werden. Angaben des Energieflusses ( $J\ m^{-2}$ ) sind mit Ausnahme der Tagessummen in  $MJ\ m^{-2}$  in der Meteorologie unüblich. Gelegentlich wird jedoch in kWh umgerechnet.

Strahlungsmessgeräte beruhen auf dem Prinzip der strahlungsbedingten Erwärmung und somit einer Temperaturerhöhung einer Empfängerfläche. Bei Absolutgeräten (als Kalibriergeräte verwendet) wird die Temperatur einer durch die Sonne direkt bestrahlten (keine Filter u. ä. im Strahlengang) schwarzen Empfängerfläche gemessen. Durch die selektive Messung der direkten Sonnenstrahlung kann die langwellige Strahlung vernachlässigt werden, so dass mit Absolutgeräten nur die kurzwellige Strahlung gemessen wird. Relativgeräte messen die Differenz zwischen zwei unterschiedlich bestrahlten oder geschwärzten (schwarze und weiße) Flächen. Weiterhin werden die Strahlungsmessgeräte danach unterschieden, ob sie aus dem Halbraum oder gerichtet (von der Sonne) messen und ob sie kurz- oder langwellige Strahlung erfassen. Bei der Messung der kurzwelligen diffusen Strahlung wird die Sonnenscheibe abgedeckt. Bilanzmesser messen den unteren und oberen Halbraum.

Der mögliche zu erfassende Spektralbereich wird durch das Material der Haube oder Kalotte, welche die Empfängerfläche zusätzlich vor äußeren Einflüssen schützt, bestimmt. Kalotten aus Quarzglas sind nur für kurzwellige Strahlung ( $0.29\ \mu m$  bis  $3.0\ \mu m$ ) durchlässig. Zur Messung der kurz- und langwelligen ( $0.9\ \mu m$  bis  $100\ \mu m$ ) Strahlung verwendet man Lupolenhauben (spezielles Polyethylen), für die langwellige Strahlung Abdeckungen aus Silikon ( $4.0... 5.0$  (!) bis  $100\ \mu m$ ).

Die Messung der Oberflächentemperatur erfolgt durch Strahlungsmessgeräte im kleinen oder großen atmosphärischen Fenster des langwelligen Bereiches, die meist nur einen relativ kleinen Öffnungswinkel haben. Ein Überblick wird in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Einteilung der Strahlungsmessgeräte

| Messgerät                 | Gerätetyp |         | Wellenlänge |            | Öffnungswinkel |           |
|---------------------------|-----------|---------|-------------|------------|----------------|-----------|
|                           | absolut   | relativ | kurzwellig. | langwellig | Halbraum       | gerichtet |
| Pyrheliometer             | x         |         | x           |            |                | x         |
| Aktinometer               |           | x       | x           |            |                | x         |
| Pyranometer               |           | x       | x           |            | x              |           |
| Albedometer               |           | x       | x           |            | x*             |           |
| Pyrgeometer               |           | x       |             | x          | x              |           |
| Strahlungsbilanzmesser    |           | x       | x           | x          | x*             |           |
| IR-Strahlungs-thermometer |           | x       |             | x          |                | x         |

\* oberer und unterer Halbraum

Bei Pyrgeometern ist zu beachten, dass die Strahlungsdifferenz aus der einfallenden langwelligen Strahlung und der Eigenstrahlung des Messgerätes auf Grund der jeweiligen Messgerätemperatur gemessen wird. Deshalb muss die Gerätetemperatur ( $T_M$  in K, Umrechnung der gemessenen Temperaturen in  $^{\circ}C$  durch Addition von 273.15 K) zusätzlich erfasst werden, um die langwelligen Strahlung  $I_M$  ( $\epsilon_{IR} = 0.98$ ) korrigieren zu können.

$$I = I_M + \varepsilon_{IR} \cdot \sigma_{SB} \cdot T_M^4 \quad (4)$$



Abb. 3: Strahlungsbilanzmesser CNR1 (Foto: Th. Friedrichs & Co.)

Der im Praktikum zum Einsatz kommende Strahlungsbilanzmesser CNR1 (Abb. 3) besteht aus zwei Pyranometern und zwei Pyrgeometern, von denen jeweils ein Geber nach oben und unten gerichtet ist. Des Weiteren ist ein Platindraht-Temperatursensor in das Gerät eingebaut. Da die Ausgangsspannung der Strahlungssensoren im Mikro- und Millivolt-Bereich liegt, sind spezielle Verstärker notwendig. Für den Praktikumsversuch wird ein Datenerfassungslogger eingesetzt.

### 3. Versuchsaufbau

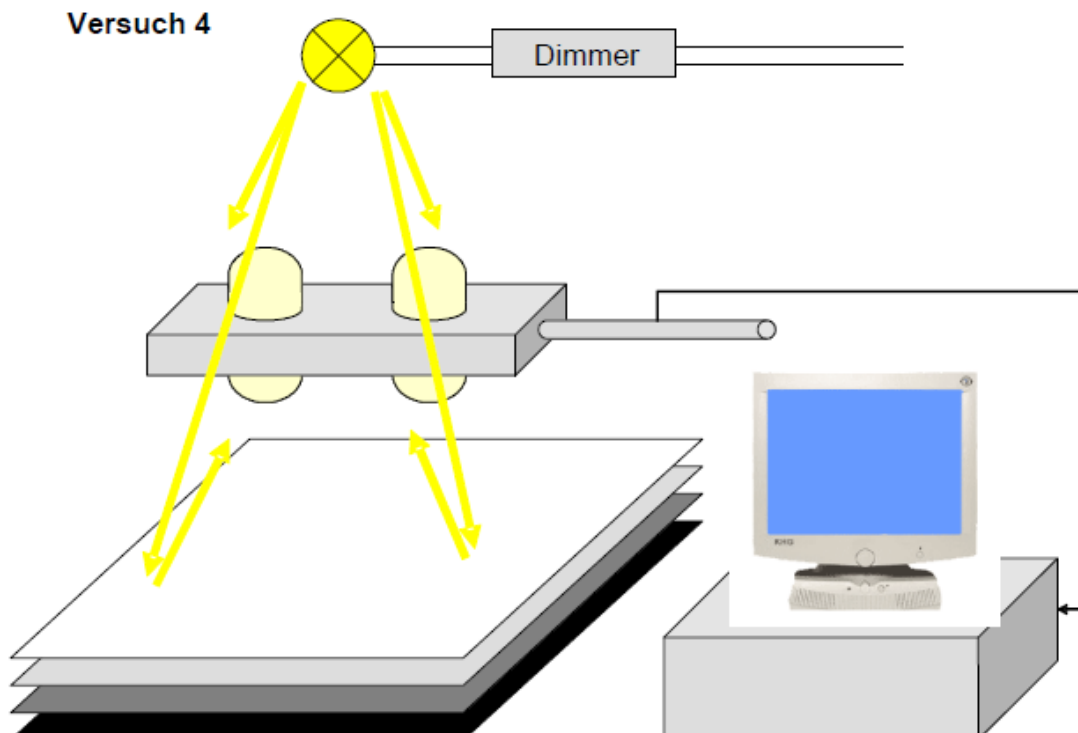


Abb. 4: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Er besteht aus einer Strahlungsquelle und dem Strahlungsbilanzmesser CNR1, deren Abstand nicht verändert werden darf. Durch den geringen Abstand werden Strahlungsstromdichten in vergleichbarer Größenordnung wie in der Natur erreicht, allerdings mit unterschiedlicher Spektralverteilung. Durch verschiedene Unterlagen werden natürliche Oberflächen simuliert.

#### 4. Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuches sind die Leuchte und der Computer einzuschalten (der Logger ist und bleibt eingeschaltet!). Um Augenschäden zu vermeiden sollte die Leuchte nur bei Notwendigkeit betrieben werden, ansonsten ist der Regler in die niedrigste Stellung zu bringen.

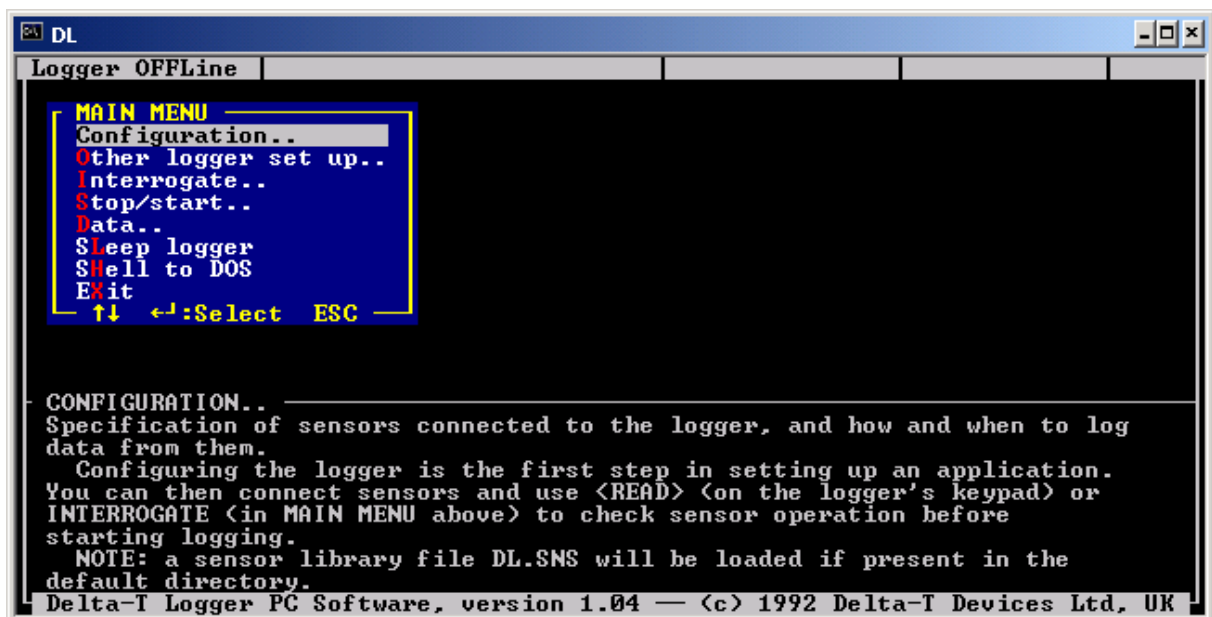


Schalten Sie die Leuchte nur an, wenn sie benötigt wird und schauen Sie nicht direkt in die Halogenleuchte (Blendungsgefahr). Spannungsführende Systeme dürfen nicht geöffnet werden. Melden Sie bitte umgehend erkennbare Schäden an den Geräten.

##### 4.1 Betrieb des Rechners und des Loggers

Der Computer dient der direkten Anzeige der Messwerte. Die Messwerte werden bereits unter Berücksichtigung der Kalibrierung in  $\text{kW m}^{-2}$  angezeigt. Er ist in folgender Weise zu betreiben:

Nach Starten des Rechners startet automatisch die DOS-basierende Software DL



```
DL
Logger OFFLine

MAIN MENU
Configuration..
Other logger set up..
Interrogate..
Stop/start..
Data..
Sleep logger
Shell to DOS
Exit
↑↓ ←:Select  ESC

CONFIGURATION..
Specification of sensors connected to the logger, and how and when to log
data from them.
Configuring the logger is the first step in setting up an application.
You can then connect sensors and use <READ> (on the logger's keypad) or
INTERROGATE (in MAIN MENU above) to check sensor operation before
starting logging.
NOTE: a sensor library file DL.SNS will be loaded if present in the
default directory.
Delta-T Logger PC Software, version 1.04 — (c) 1992 Delta-T Devices Ltd, UK
```

Zum Anzeigen der Werte mittels **Pfeiltasten**  $\uparrow\downarrow$  den Menüpunkt Interrogate markieren und mit **Enter** bestätigen.

```

DL
-----
Logger OFFLine

MAIN MENU
-----
Configuration..
Other logger set up..
Interrogate..
Stop/start..
Data..
Sleep logger
Shell to DOS
Exit
↑↓ ←:Select  ESC

INTERROGATE..
-----
Display logger status, including:
  ■ battery life
  ■ memory usage and stored data
  ■ values on input channels, and status of relay channels
  ■ logging malfunctions
A useful check on logger operation before starting logging, and at any
time during logging. Combines logger keypad functions <WAKE> and <READ>

Delta-T Logger PC Software, version 1.04 — (c) 1992 Delta-T Devices Ltd, UK

```

Im Untermenü mittels **Pfeiltasten** ↑↓ den Channel report markieren und mit **Enter** bestätigen.

```

DL
-----
Logger OFFLine

MAIN MENU
-----
INTERROGATE MENU
-----
General status report
Channel report
Delete malfunction reports
Exit
↑↓ ←:Select  ESC

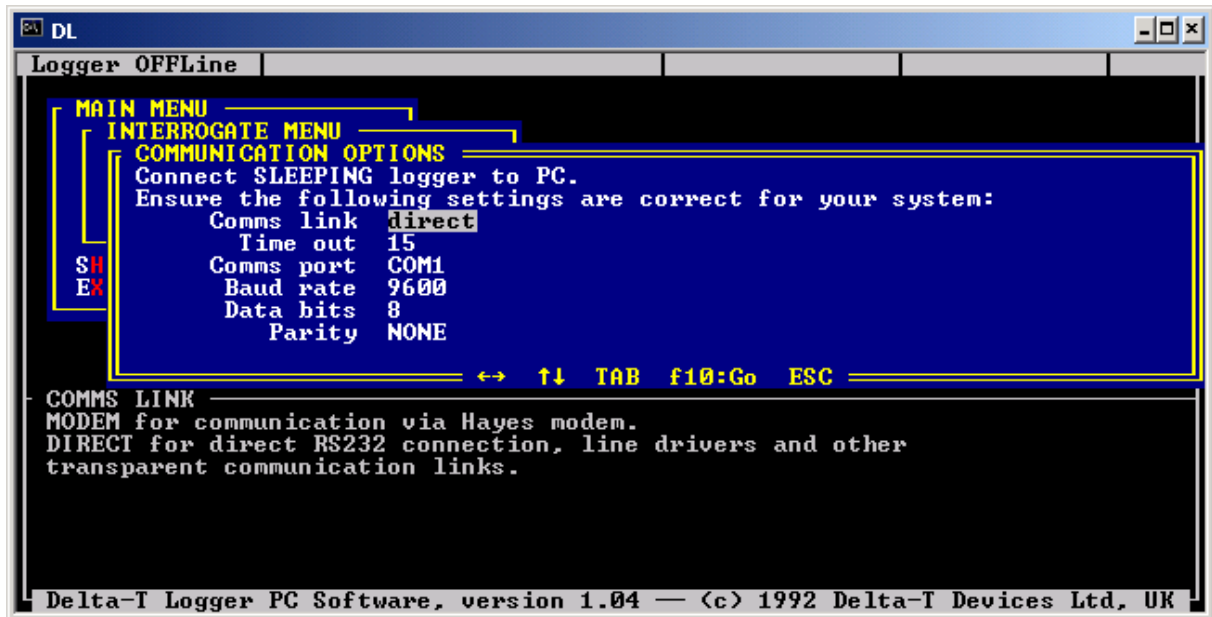
Shell to DOS
Exit

CHANNEL REPORT
-----
  ■ Input channels: current value of input signal, together with a report
    on any malfunctions occurring since starting logging (or last
    deletion of malfunction reports)
  ■ relay channels: ON/OFF status
  ■ event trigger channels: SET/CLR status (SET = active, CLR = inactive)
NOTE: counter channels will show zero if not logging.
NOTE: WARM-UP relay channels are turned on to enable sensible readings
from warmed-up channels, and are reset at the end of the report.

Delta-T Logger PC Software, version 1.04 — (c) 1992 Delta-T Devices Ltd, UK

```

Die Einstellungen in dem nun blauem Fenster COMMUNICATION OPTIONS dürfen nicht verändert werden. Mit **F10** wird die Kommunikation mit dem Logger hergestellt.

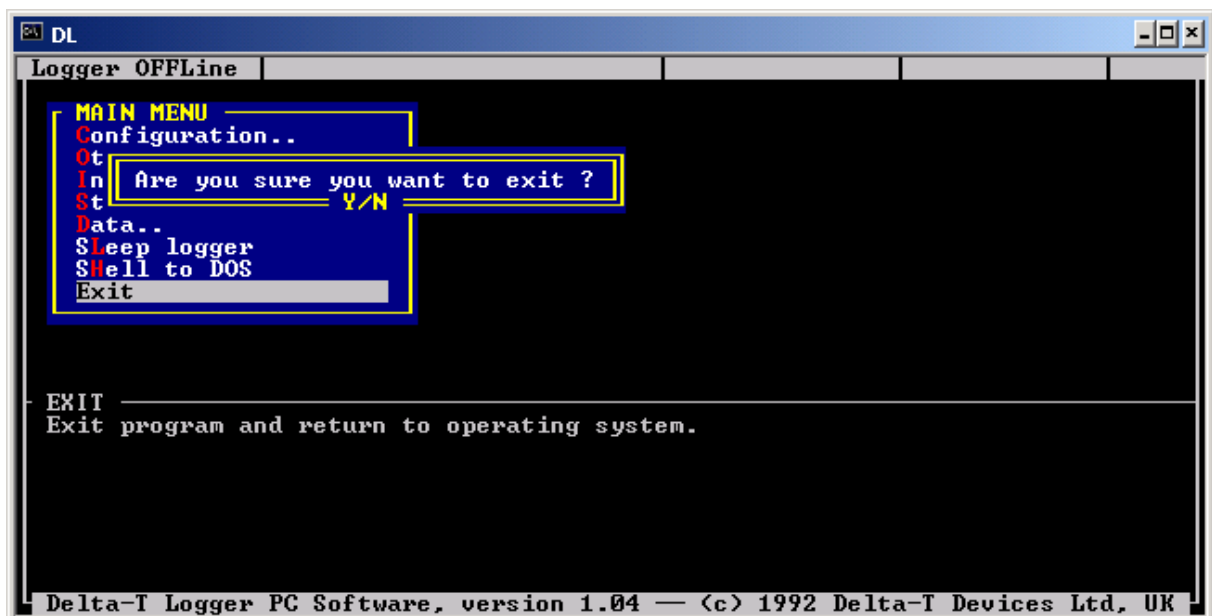


**Warten** bis die Kommunikation mit dem Logger hergestellt ist. Nun mit **F9** alle Kanäle anzeigen. Mit **Shift & F9** werden alle Kanäle durchlaufend aktualisiert.

Die Kurzbezeichnungen vor den einzelnen Kanälen bedeuten:

- GLB: Globalstrahlung
- REF: Reflexstrahlung
- GEG: Gegenstrahlung (bzw. nur Differenz zur Geräteinnentemperatur)
- AUS: Ausstrahlung (bzw. nur Differenz zur Geräteinnentemperatur)
- PT4: Geräteinnentemperatur (in Vierleiterschaltung, s. Versuch 1)

Zum Ausschalten mit **Esc** solange in den Menüs zurückgehen bis die Schlussdialogbox erscheint:



Mit **Y** das Programm verlassen.

Windows herunterfahren und Rechner am Netzschalter ausschalten.



#### 4.2 Bestimmung der Strahlungsstromdichte der Halogenleuchte

Kalibrieren Sie den Einstellungsregler, in dem Sie für 9 Stufen die Messwerte der kurzwelligen Einstrahlung (Globalstrahlung) von oben bestimmen. Beachten Sie, dass die Strahlungsgeber eine Einstellzeit von ca. 1-2 Minuten benötigen. Warten Sie daher mit der Ablesung, bis sich der Messwert nicht mehr verändert. Aufzuzeichnen sind die in Tabelle 4 angegebenen Messwerte.

Tabelle 4: Aufzunehmende Messwerte für die Pyranometerkalibrierung

| Datum | Zeit | Leistungsanzeige<br>W | Strahlungsflussdichte<br>W m <sup>-2</sup> |
|-------|------|-----------------------|--|
|       |      | Min (Lampe aus)       |  |
|       |      | 150                   |  |
|       |      | 200                   |  |
|       |      | 250                   |  |
|       |      | 300                   |  |
|       |      | 350                   |  |
|       |      | 400                   |  |
|       |      | 450                   |  |
|       |      | Max                   |  |
|       |      |                       |  |

#### 4.3 Bestimmung der Strahlungsbilanz und der Albedo für verschiedene Unterlagen

Bestimmen Sie für eine maximale und eine mittlere Bestrahlungsstärke alle Komponenten der Strahlungsbilanz für drei verschiedene Unterlagen. Stellen Sie anhand des Dimmers und der Leistungsanzeige der Lampe die Leuchtstärke entweder auf den maximalen Wert (ca. 470 W) oder für eine mittlere Leistung auf 300 W ein.

Bringen Sie weiterhin die vorbereiteten Behälter mit Wasser, Sand oder bewachsenem Boden direkt unter den Strahlungsbilanzmesser. Beachten Sie, dass die Leistungsanzeige an der Steckdosenleiste ein paar Sekunden und die Strahlungsgeber ca. 1 bis 2 Minuten Einstellzeit benötigen. Warten Sie daher mit der Ablesung, bis sich die Messwerte nicht mehr verändern. Tragen Sie die entsprechenden Messwerte in Tabelle 5 ein. **Beachten Sie, dass die beiden Messwerte  $I_{\downarrow M}$  und  $I_{\uparrow M}$  der langwelligen Komponente nur den Betrag der Abweichung zur Gerätestrahlung angeben. Zur Bestimmung der eigentlichen Gegenstrahlung  $I_{\downarrow}$  und Ausstrahlung  $I_{\uparrow}$  müssen die Werte gemäß des Stefan-Boltzmann-Gesetzes umgerechnet werden** (siehe Kapitel 2, Formel 4).

Tabelle 5: Aufzunehmende Messwerte für die Strahlungsbilanzmessung

| Datum<br>Zeit | Unterlage | $t_M$ | $K_{\downarrow}$ | $K_{\uparrow}$ | $I_{\downarrow M}$ | $I_{\uparrow M}$ | $I_{\downarrow}$ | $I_{\uparrow}$ |
|---------------|-----------|-------|------------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
|               |           | °C    | $W\ m^{-2}$      | $W\ m^{-2}$    | $W\ m^{-2}$        | $W\ m^{-2}$      | $W\ m^{-2}$      | $W\ m^{-2}$    |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |
|               |           |       |                  |                |                    |                  |                  |                |

## 5. Versuchsauswertung

5. Stellen Sie graphisch die Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte von der Lampenleistung des Strahlers dar.
6. Ermitteln Sie für drei verschiedenen Unterlagen und zwei Bestrahlungsstärken alle vier Komponenten und die Strahlungsbilanz und diskutieren Sie das Ergebnis.
7. Ermitteln Sie für drei verschiedene Unterlagen und zwei Bestrahlungsstärken die Albedo und diskutieren Sie das Ergebnis.

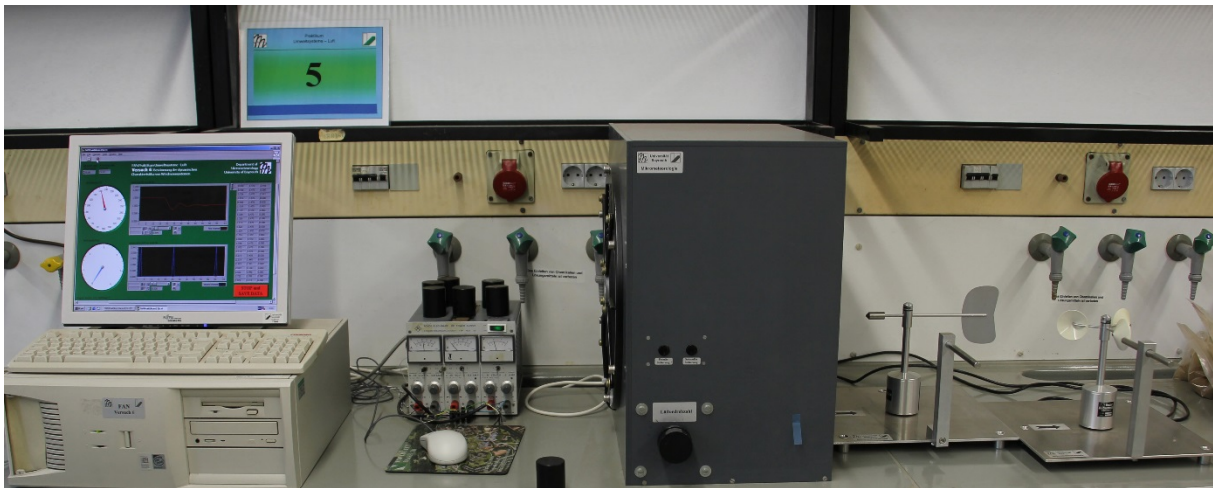
## 6. Literatur

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.

Geiger, R., Aron, R.H. and Todhunter, P. (1995): The climate near the ground. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsges. mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 528 pp.

## Versuch 5

### Bestimmung der dynamischen Charakteristika von Windmesssystemen



Auswerterechner (links), offener Windkanalventilator (Mitte)  
und wahlweise einsetzbares Anemometer bzw. Windfahne (rechts)

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die Abstandskonstante eines Schalensternanemometers und das Einschwingverhalten einer Windfahne.

## 2. Theoretische Grundlagen

Mechanische Windmesssysteme sind dynamische Systeme erster (Anemometer, Abb. 1 links) und zweiter (Windfahne, Abb. 1 rechts) Ordnung. Die Differentialgleichungen für ein Schalensternanemometer lauten:

$$\tau \cdot \frac{du(t)}{dt} + u(t) = u_0 \quad (1)$$

Dabei sind  $u_0$  die Windgeschwindigkeit der Grundströmung,  $u$  die gemessene Windgeschwindigkeit (beide in  $\text{m s}^{-1}$ ),  $t$  die Zeit seit Beginn der Einwirkung der Geschwindigkeit  $u_0$  und  $\tau$  die Zeitkonstante (beide in s). Die Lösung der Differentialgleichung ist

$$u(t) = u_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2)$$



Abb. 1. Links: Schalensternanemometer. Rechts: Windfahne (Fotos: Th. Friedrichs & Co.)

Die Zeitkonstante eines Messsystems ist jene Zeit, bei der das Messsystem sich seinem Endwert um 63 % genähert hat. Der Wert von 63 % entspricht  $(1-1/e)$ . Um wirklich den Endwert nach einer sprunghaften Änderung des Eingangssignals zu erfassen, muss man wesentlich länger als die Zeitkonstante messen. Der Wert ist abhängig von der gewünschten Genauigkeit, sollte aber mindestens bei der fünffachen Zeitkonstante liegen. Der Verlauf des Messsignals nach einer sprunghaften Pegeländerung ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

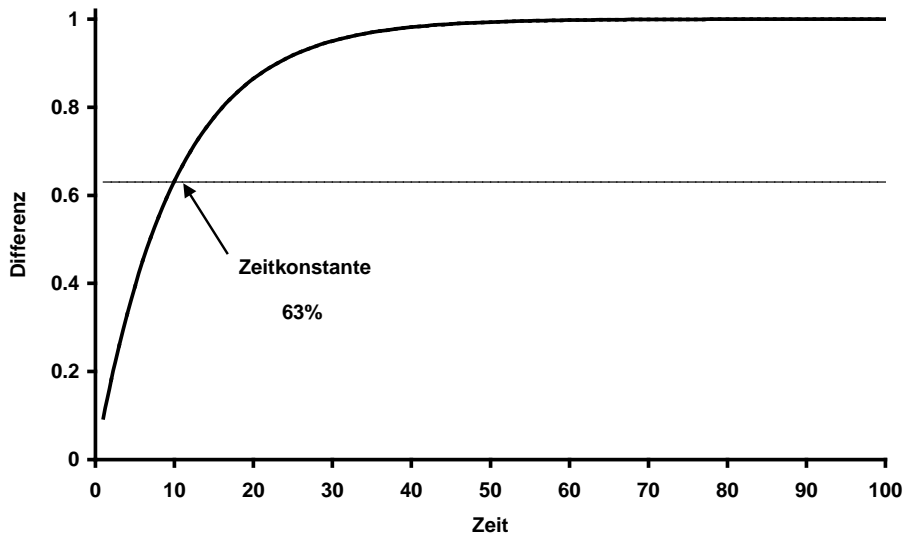


Abb. 2: Schematische Darstellung der Zeitkonstante

Anemometer haben eine windgeschwindigkeitsabhängige Zeitkonstante. Um ein für alle Anemometer und Windgeschwindigkeiten vergleichbares Maß zu erhalten, wurde die Abstandskonstante definiert: Die Abstandskonstante ist die Länge des Windweges, bis sich das Anemometer auf 63% seiner Endgeschwindigkeit genähert hat. Der Zusammenhang zwischen Zeitkonstante  $\tau$  und Abstandskonstante  $L$  lässt sich mittels der Endgeschwindigkeit  $u_\infty$  darstellen.

$$L = u_\infty \cdot \tau \quad (3)$$

Windfahnen sind dynamische Systeme 2. Ordnung. Die entsprechende Differentialgleichung lautet:

$$I \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{N \cdot r}{u} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + N\theta(t) = N\theta_0 \quad (4)$$

Dabei sind  $\theta(t)$  der Auslenkungswinkel der Windfahne und  $\theta_0$  der Auslenkungswinkel in der Endstellung (beide in Grad $^\circ$ ),  $I$  ist das Trägheitsmoment in kg m $^2$  Grad $^{\circ-2}$ ,  $N$  das aerodynamische Drehmoment in kg m $^2$  s $^{-2}$  Grad $^{\circ-1}$ , und  $r$  der Abstand zwischen Rotationsachse und Windfahne in m.

### 3. Versuchsaufbau

In den Luftstrom des vereinfachten, offenen und regelbaren Windkanals werden nacheinander ein Schalensternanemometer und eine Windfahne gebracht (Abb. 3). Beide Messgeräte sind jeweils auf einer stabilen Metallplatte montiert. Sie sind zunächst durch eine Arretiervorrichtung blockiert. Durch ziehen des jeweiligen Arretierstiftes wird die Rotationsblockade gelöst. Die Messwerte werden kontinuierlich über eine eingebaute Messkarte und passende Software (LabView) auf dem Computer aufgezeichnet. Zur Auswertung steht auf dem Rechner das Programm MS-EXCEL zur Verfügung.

### 4. Versuchsdurchführung

Vor Beginn sind der Windkanal am Steckerschalter und der Computer und das Netzteil des Anemometers und der Windfahne einzuschalten. Machen Sie sich zu Beginn des Versuches mit der Wirkungsweise der Windkanalregelung und der Arretierung für das Schalensternanemometer und die Windfahne vertraut.

## Versuch 5

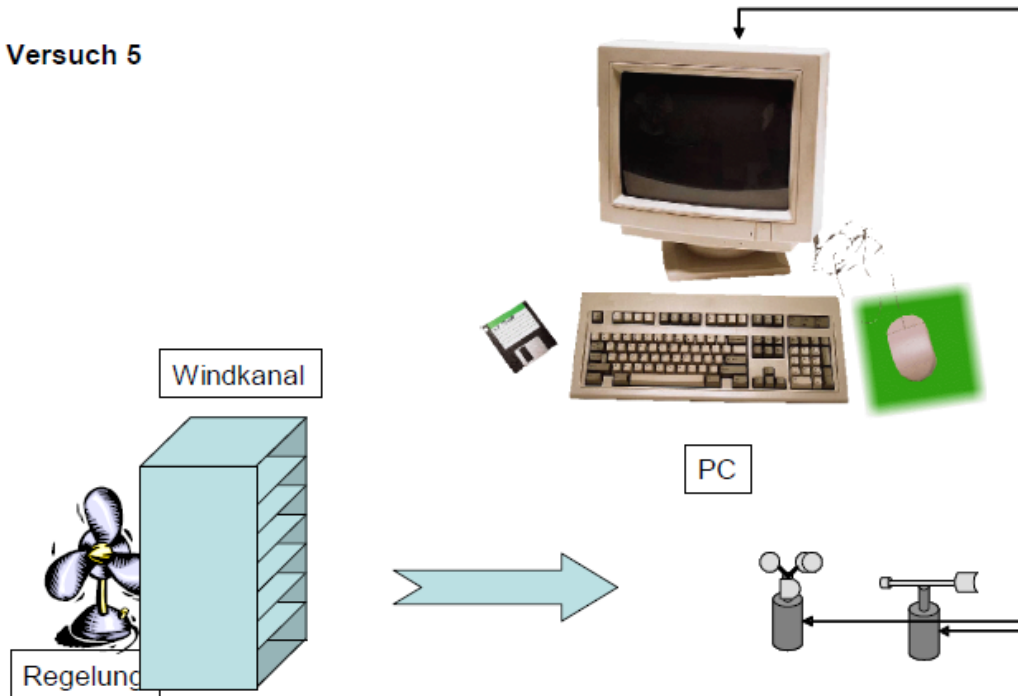


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung



Spannungsführende Systeme dürfen nicht geöffnet werden. Melden Sie umgehend erkennbare Schäden an den Geräten. In das Windkanalgehäuse darf weder gegriffen werden noch dürfen Gegenstände in den Kanal gebracht werden. Er soll nur während der Versuchsdurchführung betrieben werden, um die Lärmbelastigung in Grenzen zu halten.

Führen Sie bei zwei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (a: maximale Anströmung von ca.  $6 \text{ m s}^{-1}$  und b: schwacher Anströmung von ca.  $1 \text{ m s}^{-1}$ ) die Bestimmung der Zeit- und Abstandskonstante des Schalensternanemometers durch.

Starten Sie als erstes das Programm „*FAN Praktikum Versuch 6 v15*“ (Desktop-Icon) und finden Sie über die Kontrolle der Graphikanzeige des Programms für beide Messgeräte durch Probieren einen geeigneten Standort im Luftstrom des Windkanals und verändern Sie diesen während der Versuchsdurchführung nicht mehr.

Der Aufzeichnungsvorgang der Messdaten durch das Programm geschieht durch einen Mauszeigerklick auf den kleinen weißen Pfeil links oben (Abb. 4). Beendet wird die Aufzeichnung durch Ausführen des roten STOPP-Schalters (Abb. 4) gefolgt durch eine Popup-Aufforderung zur Eingabe des Dateinamens und zur Abspeicherung auf die Festplatte.

Speichern Sie die Datei in das vorgesehene Verzeichnis unter dem Namen „GruppeXX\_FYY“ (XX: Gruppennummer, zweistellig; YY: Versuchsnummer, zweistellig).

Die Komma separierte Datei bekommt automatisch die Kennung .csv und kann somit leicht in EXCEL eingeladen werden.

Starten Sie die Datenaufzeichnung (Klick auf weißen Pfeil), ziehen Sie den Arretierstift und geben Sie das Anemometer frei. Zeichnen Sie etwa 30 weitere Sekunden das Signal auf, beenden Sie die Aufzeichnung durch Klick auf den STOPP-Schalter und speichern die Datei ab. Der Versuch ist 3mal zu wiederholen. Für jeden Einzelversuch müssen Sie den obigen Aufzeichnungsvorgang wiederholen.

Bestimmen Sie nun bei gleicher Versuchsanordnung (bei  $6 \text{ m s}^{-1}$  bzw. bei  $1 \text{ m s}^{-1}$ ) das Einschwingverhalten der Windfahne. Dazu wird die Windfahne in ca.  $90^\circ$  Auslenkung durch den Arretierstift fixiert, der Aufzeichnungsvorgang gestartet und nach Freigabe der Windfahne wiederum für weitere 30 Sekunden das Signal aufgezeichnet und entsprechend abgespeichert. Dieser Vorgang braucht bei ordnungsgemäßer Aufzeichnung jeweils nur zweimal durchgeführt werden.

Berechnen Sie aus den Messwiederholungen die mittlere Abstandskonstante  $L$  für das Anemometer mit der Standardabweichung:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^3 L_i \quad (5)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (\bar{L} - L_i)^2} \quad (6)$$

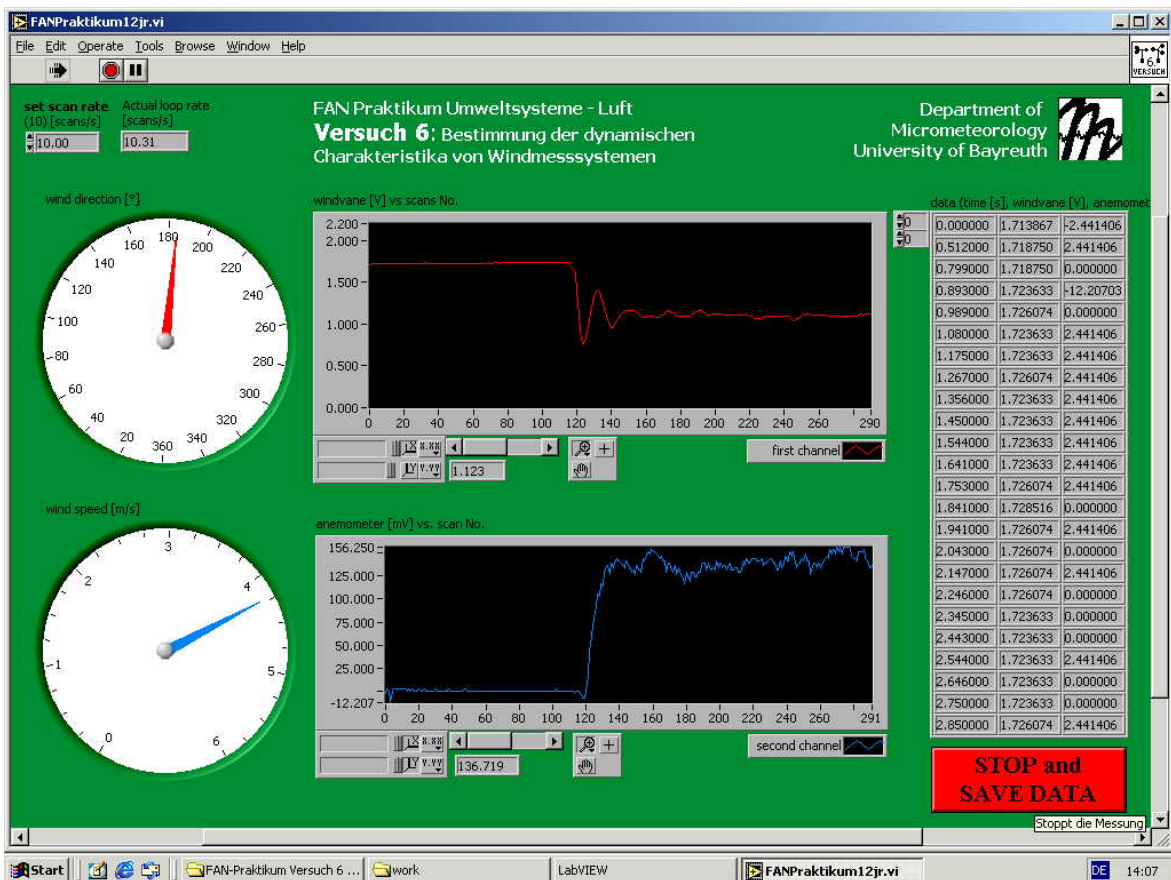


Abb. 4: Monitorbild für die Datenanzeige und -aufzeichnung. Auf der linken Seite sind die Anzeigen für die Windrichtung und -windgeschwindigkeit angebracht. Im mittleren Teil werden diese Größen zeitabhängig (dargestellt sind die Abtastungen in V und mV, ca. 10 Hz) und auf der rechten Seite sind die ersten Daten des Aufzeichnungsfiles aufgelistet.

## 5. Versuchsauswertung

1. Stellen Sie die Anlaufkurven des Schalensternanemometers (für beide Endwindgeschwindigkeiten je 3 Darstellungen) grafisch dar (EXCEL) und bestimmen Sie die jeweilige Zeit- und Abstandskonstante ( $\tau$  und  $L$ ) gemäß Abb. 2. und Gleichung 3. **Löschen Sie zuvor die unsinnigen Daten am Anfang der Zeitreihe bis zu dem Zeitpunkt, an dem Sie die Arretiervorrichtung lösen und sich das Schalenstern-Anemometer zu drehen beginnt.** In der EXCEL-Datei ist in Spalte 1 die Zeit in s angegeben. Die Windgeschwindigkeit ist in Spalte 3 in mV angegeben. Die Empfindlichkeit ist  $32.6 \text{ mV m}^{-1} \text{ s}$ . Mit der Windgeschwindigkeit wird die Abstandskonstante  $L$  berechnet. Geben Sie für die beiden Windgeschwindigkeiten Mittelwerte und Standardabweichungen an.

**Achten Sie bei der graphischen Darstellung auf einheitliche X- und Y-Achseneinteilungen, Diagrammgrößen und Achsenbeschriftungen.**

Tabelle 3: Mustertabelle für die Bestimmung der Zeit- und Abstandskonstanten

| Datum | Zeit | Windgeschwindigkeit       | Zeit- und Abstandskonstanten | Standardabweichung der Zeit- und Abstandskonstanten |
|-------|------|---------------------------|------------------------------|---|
|       |      | mV bzw. $\text{m s}^{-1}$ | s bzw. m                     | s bzw. m  |
|       |      |                           |                              |   |
|       |      |                           |                              |   |

2. Stellen Sie das Einschwingverhalten der Windfahne in Abhängigkeit von der Zeit für zwei Windgeschwindigkeiten grafisch dar. Die Windrichtung ist in Spalte 2 angegeben. Dabei entsprechen 0 V bis 2.2 V dem Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ .

3. Welche Schlussfolgerungen müssen Sie für die Dauer von Windmessungen ziehen?

## 6. Literatur

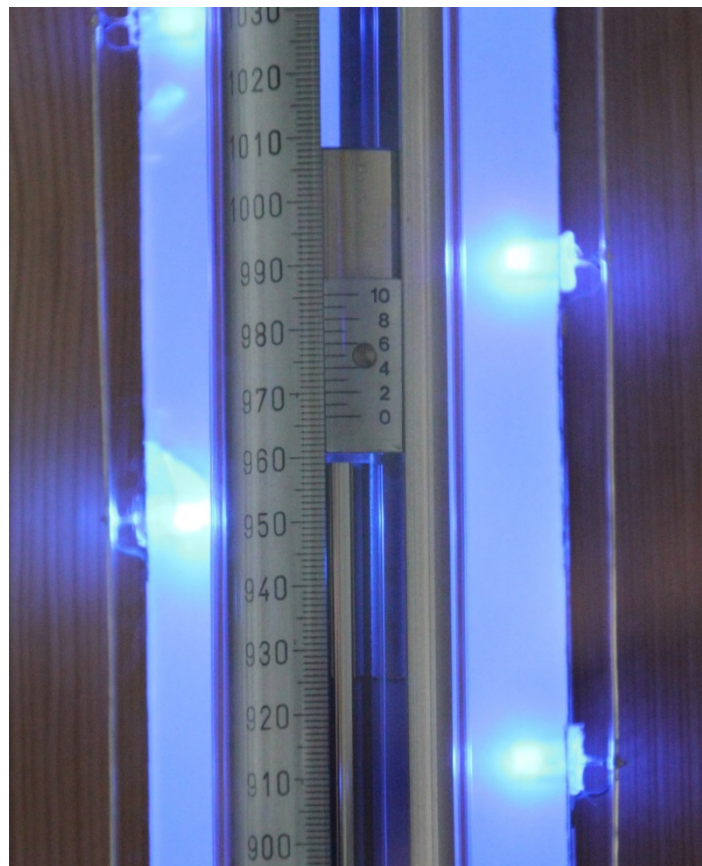
Brock, F.V., Richardson, S.J. (2001): Meteorological measurement systems. Oxford University Press, New York, 290 pp.

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.



## Versuch 6

### Bestimmung der Gebäudehöhe durch Luftdruckmessungen



Beleuchtete Anzeige am Stationsbarometer

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die Höhe des Gebäudes GEO I zwischen dem vom Kellergeschoss bis zum dritten Geschoss des Gebäudes.

## 2. Theoretische Grundlagen

Für Messzeiträume von 1 bis 2 Stunden kann in der Regel der Luftdruck als Konstanz angenommen werden (schnelle Luftdruckschwankungen durch den Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten oder bei Frontendurchgängen ausgeschlossen). Der Luftdruck ist eine Funktion von Höhe und Temperatur. Die entsprechende Gleichung, die Druck- und Höhenänderung verknüpft ist die statische Grundgleichung

$$dp = -g \cdot \rho \cdot dz \quad (1)$$

mit dem Druck  $p$  in hPa, der Höhe  $z$  in m, der Schwerebeschleunigung der Erde  $g$  in  $\text{m s}^{-2}$  und der Luftdichte  $\rho$  in  $\text{kg m}^{-3}$ . Über die Gasgleichung für trockene Luft (vereinfachend wird trockene Luft angenommen, weitere Informationen werden in der Vorlesung gegeben) ergibt sich die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte:

$$\rho = \frac{p}{R_L \cdot T} \quad (2)$$

Dabei ist  $R_L$  die massenbezogene Gaskonstante trockener Luft,  $R_L = 287.06 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ( $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ) und  $T$  die Lufttemperatur in K. Die Integration über die Höhe kann nur für kleine Schichten erfolgen, da neben der Temperatur auch die Schwerebeschleunigung von der Höhe und vom Ort auf der Erde abhängt (höhenabhängig). Zur Überwindung der Ortsabhängigkeit der Schwerebeschleunigung wird in der Meteorologie die Standardschwerebeschleunigung  $g_0 = 9.80 \text{ m s}^{-2}$  eingefügt. Dies führt zu einer Neudefinition der Höhe. In der Meteorologie wird die geopotentielle Höhe  $Z$  in m verwendet, die sich von der Höhe  $z$  nur unwesentlich unterscheidet. Danach ergibt sich die integrierte Form der statischen Grundgleichung für die Atmosphäre, die als barometrische Höhenformel bezeichnet wird:

$$Z = \frac{R_L \cdot T}{g_0} \cdot \ln \frac{p_0}{p} \quad (3)$$

Dabei ist  $p_0$  der Luftdruck in der geopotentiellen Höhe  $Z_0 = 0 \text{ m}$ .

Allgemein und umgestellt nach dem Druck lautet die Gleichung:

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{g_0 \cdot (Z_2 - Z_1)}{R_L \cdot T}} \quad (4)$$

Es ist dabei ausreichend für die Temperatur die Schichtmitteltemperatur einzusetzen:

$$T = \frac{T(Z_1) + T(Z_2)}{2} \quad (5)$$

Die Druckmessung erfolgt durch Aneroidbarometer, bei denen sich eine evakuierte Druckdose unter Einfluss des Luftdruckes verformt. Diese Verformung wird über ein Hebelsystem auf einen Zeiger übertragen und zur Anzeige gebracht (Abb. 1). Diese Geräte sind Relativinstrumente und müssen gegen Absolutinstrument kalibriert werden. Absolutinstrumente sind Quecksilberbarometer. Dabei wird aus einem Vorratsgefäß Quecksilber in eine evakuierte Glasröhre gedrückt (Abb. 2).



Abb. 1: Aneroidbarometer (Foto: Th. Friedrichs & Co.)



Abb. 2: Quecksilberbarometer (Foto: Th. Friedrichs & Co.)

Das älteste Gerät zur Messung des Luftdrucks ist das Quecksilberbarometer. In seiner Grundform besteht es aus einem mit Quecksilber gefüllten U-Rohr, dessen eine Seite verschlossen und luftleer ist. Im Gleichgewicht ist daher der Druck der überstehenden Quecksilbersäule im luftleeren Raum gleich dem Luftdruck

$$p = \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h \quad (6)$$

mit  $p$  = Luftdruck,  $\rho_{\text{Hg}}$  = Dichte Quecksilber in  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $g$  = Schwerebeschleunigung in  $\text{m s}^{-2}$  und  $h$  = Höhendifferenz der Quecksilbersäule in m.

Die aus der Ablesung der Höhendifferenz  $h$  der beiden Quecksilbersäulen folgende Angabe des Druckes in mm ist aber nicht eindeutig, da in Formel (6) die Dichte des Quecksilbers  $\rho_{\text{Hg}}(T)$  temperaturabhängig ist und die Schwerebeschleunigung  $g(\rho, \varphi, z)$  Abhängig von der geographischen Position eingeht. Wegen der Temperaturabhängigkeit von  $\rho_{\text{Hg}}$  muss eine Temperaturkorrektur  $\Delta p_t$  bezüglich der Temperatur des Quecksilbers  $t_{\text{Hg}}$ , wegen der Abhängigkeit von  $g$  von der geographischen Breite eine Breitenkorrektur  $\Delta p_\varphi$  und wegen der Höhenabhängigkeit von  $g$  eine Höhenkorrektur  $\Delta p_z$  vorgenommen werden.

Zunächst wird die Ausgangsgleichung (6) mit Hilfe der Standardwerte für die Dichte des Quecksilbers bei  $0^\circ\text{C}$  ( $\rho_{\text{Hg}0} = 13.5951 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ), der Schwerebeschleunigung bei  $\varphi = 45^\circ$  und  $z = 0 \text{ m}$  ( $g_0 = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$ ) und dem Basisdruck  $p_b = \rho_{\text{Hg}0} \cdot g_0 \cdot h$  umgeformt:

$$p = p_b + p_b \left( \frac{\rho_{\text{Hg}} \cdot g}{\rho_{\text{Hg}0} \cdot g_0} - 1 \right) \quad (8)$$

Heutige Stationsbarometer sind so kalibriert, dass der an der Skala abgelesene Wert  $p_b$  bei Standardbedingungen dem wirklichen Luftdruck  $p$  entspricht. Weichen nun  $\rho_{\text{Hg}}(T)$  und/oder  $g(\varphi, z)$  von den Standardbedingungen ab, müssen die entsprechenden Korrekturen zur Ermittlung von  $p$  durchgeführt werden:

Korrektur bezüglich der Quecksilbertemperatur  $t_{\text{Hg}}$ :

$$\frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{Hg}0}} \approx 1 - \alpha \cdot t_{\text{Hg}} \quad (9)$$

mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  in  $\text{K}^{-1}$  und der Quecksilbertemperatur  $t_{\text{Hg}}$  in  $^\circ\text{C}$ . Für Quecksilber beträgt der kubische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_K = 1.818 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Da sich

aber bei einer Erwärmung des Barometers auch der Ablesemaßstab ausdehnt, muss auch dieser Fehler berücksichtigt werden. Es wird deshalb der lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_L$  des Maßstabs vom kubischen  $\alpha_K$  des Quecksilbers subtrahiert. Bei Messing und Neusilber beträgt  $\alpha_L = 0.184 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , so dass sich als Kombination ein  $\alpha$  von  $1.634 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  ergibt.

Beim Stationsbarometer der Abt. Mikrometeorologie muss noch der zweite Schenkel des ursprüngliche U-Rohres mit Hilfe des Verhältnisses von Quecksilbervolumen  $V$  zu dessen Oberfläche  $A$  ( $1.24 \cdot (V/A) = 22.4 \text{ hPa}$ ) berücksichtigt werden.

Damit ergibt sich der Temperaturkorrekturbetrag  $\Delta p_t$  in hPa durch

$$\Delta p_t = -1.634 \cdot 10^{-4} \left( p_b + 1.24 \cdot \frac{V}{A} \right) \cdot t_{\text{Hg}} \quad (10)$$

Der auf  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  korrigierte Druckwert  $p_t$  errechnet sich durch Addition gemäß

$$p_t = p_b + \Delta p_t \quad (11)$$

und findet für die anschließenden Schwerekorrekturschritte Verwendung.

Schwerekorrektur aufgrund der Abhängigkeit von der geografischen Breite und Höhe ü. NN (Bayreuth:  $\varphi \sim 50^\circ\text{N}$ ;  $370 \text{ m ü. NN}$ ).

Die Erdbeschleunigung hängt von der geografischen Breite und der Höhe ü. NN ab und beeinflusst die Länge der Quecksilbersäule. Deshalb werden die Barometerstände auf Normal-schwere umgerechnet. Für den Korrekturwert  $\Delta p_\varphi$  gilt nach der WMO:

$$\Delta p_\varphi = p_t \cdot \left[ -5.0 \cdot 10^{-5} - 2.6372 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\varphi) + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot \cos^2(2\varphi) \right] \quad (12)$$

Für den Korrekturwert  $\Delta p_z$  gilt:

$$\Delta p_z = -3.147 \cdot 10^{-7} \cdot h \cdot p_t \quad (13)$$

mit  $h$  = ausgedehnte (150 km Radius) Höhe in m des Beobachtungsortes über dem Meeresspiegel (im Praktikum vereinfacht  $370 \text{ m ü. NN}$ ).

Die vollständige Korrektur der am Stationsbarometer abgelesenen Werte erfolgt durch Addition der einzelnen Korrekturbeträge:

$$p = p_t + \Delta p_\varphi + \Delta p_z \quad (14)$$

Die so korrigierten Luftdruckwerte stellen den Luftdruck am Ort dar und werden für den Abgleich des Aneroidbarometers verwendet.

### 3. Versuchsaufbau

Für den Versuch stehen ein Aneroidbarometer und ein Stationsbarometer zur Verfügung. Des Weiteren kann zur Bestimmung der Lufttemperatur das Aßmann'sche Aspirationspsychrometer aus Versuch 2 (nur trockene Temperatur) genutzt werden.

### 4. Versuchsdurchführung

Beginnen Sie den Versuch mit der Korrektur der am Stationsbarometer abgelesenen Werte gemäß der zuvor beschriebenen Weise (Hilfestellung gibt auch das Tabellenwerk ausliegend am Versuchsstandort im Labor). Die Quecksilbertemperatur zur Korrektur der Quecksilberdichte kann direkt am Barometer abgelesen werden.

Machen sie sich zudem mit der Funktionsweise des Aneroidbarometers vertraut.



Quecksilber ist giftig! Es ist daher äußerste Vorsicht beim Umgang mit dem Barometer und mit Quecksilberthermometern geboten. Im Falle von Glas- bzw. Behälterbruch sind umgehend ein Betreuer zu informieren und der vorhandene Notfallkasten anzuwenden (Aufsammeln des Quecksilbers und Lagern unter Wasserabschluss, kleine Mengen mit Eisenspänen binden).

Führen Sie 4 Messungen (Ableseung durch jedes Gruppenmitglied) wechselseitig im Kellergeschoss (Geschoss U, Gebäude GEO I) und im oberen Halbgeschoss 3 (Treppenaufgang zur Dachtür) des Gebäudes GEO I durch und ermitteln Sie für jedes Messpaar die Höhendifferenz  $\Delta Z$ . Aus den 4 Werten der Höhendifferenz bestimmen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung:

$$\overline{\Delta Z} = \sum_{i=1}^5 (\Delta Z)_i \quad (15)$$

$$s_{\Delta Z} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 [\overline{\Delta Z} - (\Delta Z)_i]^2} \quad (16)$$

## 5. Versuchsauswertung

- Bestimmen Sie den korrigierten Luftdruck mit dem Quecksilberbarometer:

Tabelle 1: Mustertabelle für die Korrektur des Quecksilberbarometers

| Datum, Zeit | Hg-Temperatur | $p_b$ | $\Delta p_t$ | $p_t$ | $\Delta p_\phi$ | $\Delta p_z$ | $p$ |
|-------------|---------------|-------|--------------|-------|-----------------|--------------|-----|
|             | °C            | hPa   | hPa          | hPa   | hPa             | hPa          | hPa |
|             |               |       |              |       |                 |              |     |

- Bestimmen Sie mit dem Aßmann'schen Aspirationspsychrometer jeweils die Schichtmitteltemperatur aus den 4 Messungen (Ableseung durch jedes Gruppenmitglied) im Kellergeschoss (Geschoss U) und im oberen Geschoss 3 (Treppenaufgang zur Dachtür) des Gebäudes GEO I.
- Bestimmen Sie die Höhendifferenz in Metern zwischen dem Kellergeschoss (Geschoss U) und dem oberen Geschoss 3 (Treppenaufgang zur Dachtür) des Gebäudes GEO I.

Tabelle 2: Mustertabelle für die Auswertung der Druckmessungen

| Datum | Zeit | Schicht-mittel-temp. | Druck oben | Druck unten | Höhen-dif-ferenz | Standard-abweichung |
|-------|------|----------------------|------------|-------------|------------------|---------------------|
|       |      | °C                   | hPa        | hPa         | m                | m                   |
|       |      |                      |            |             |                  |                     |
|       |      |                      |            |             |                  |                     |
|       |      |                      |            |             |                  |                     |
|       |      |                      |            |             |                  |                     |
|       |      |                      |            |             |                  |                     |
|       |      |                      |            | Mittel:     |                  |                     |

## 6. Literatur

DeFelice, T.P. (1998): An introduction to meteorological instrumentation and measurement. Prentice Hall, Upper Saddle River, 229 pp.

Stull, R.B. (2000): Meteorology today. Brooks / Cole, Pacific Grove, 502 pp.

## Versuch 7

### Durchführung meteorologischer Standardmessungen



Wetterstation im Ökologisch-Botanischen Garten

## 1. Aufgabenstellung

Führen Sie eine meteorologische (synoptische) Messung von Standardgrößen und visuellen Beobachtungen durch und ordnen Sie diese der entsprechenden Wetterlage zu.

## 2. Theoretische Grundlagen

Die Messung meteorologischer Elemente, wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Richtung ist international standardisiert und muss zu bestimmten Zeitpunkten und in bestimmten Höhen erfolgen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Synoptische Messung meteorologischer Elemente

| Meteorologische Elemente | Messhöhe in m                    | spezielle Anforderungen  |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| Lufttemperatur           | 2                                | Wetterhütte  |
| Maximumtemperatur        | 2                                | Wetterhütte (7-19 Uhr)   |
| Minimumtemperatur        | 2                                | Wetterhütte (19-7 Uhr)   |
| Bodentemperatur          | -0.05; -0.1; -0.2;<br>-0.5; -1.0 |  |
| Minimum am Erdboden      | 0.05                             | (19-7 Uhr)   |
| Luftfeuchte (relative)   | 2                                | Wetterhütte  |
| Niederschlag             | 1                                | 200 cm <sup>2</sup> Auffangfläche (D)<br>7 Uhr, dem Vortag zurechnen |
| Luftdruck                | Genauere Höhe über NN            | Innenraum, Reduktion auf NN<br>und 0 °C                              |
| Windgeschwindigkeit      | 10                               | freier Standort  |
| Windrichtung             | 10                               | freier Standort  |

Diese Größen werden heute vorwiegend mit elektrischen Messsystemen und modernen Datenerfassungsanlagen erfasst. Tageswerte können sowohl aus den üblicherweise erfassten 10minütigen Mitteln oder Summen aber auch aus stündlichen oder 3stündlichen Terminwerten ermittelt werden. Daneben gibt es eine Reihe von Elementen, die nur durch visuelle Beobachtungen bestimmt werden können bzw. nur schwer über Messgrößen indirekt zu ermitteln sind. Dazu gehören der Wetterzustand und die Bewölkungsbeobachtung. Der Wetterzustand wird häufig verschlüsselt in Stufen von 00 bis 99 (Kennung im meteorologischen Schlüssel: ww). Bei der Bewölkungsbeobachtung wird sowohl der Bedeckungsgrad in Achteln (oberhalb 5° bis 10° über dem Horizont, 1/8 auch bei einziger Wolke und 7/8 auch bei einzigem kleinen Anteil blauen Himmels) als auch die Wolkengattung angegeben (Tabelle 2).



Tabelle 2: Einteilung der Wolken entsprechend ihrer Gattung und typischen Höhenstufe. Dabei sind in den mittleren Breiten hohe Wolken in 5 km bis 13 km, mittelhohe Wolken in 2 km bis 7 km und tiefe Wolken in 0 km bis 2 km Höhe anzutreffen. In den Polargebieten sind die Wolkenhöhen niedriger und in den Tropen höher (bis etwa 18 km).

| Wolkengattung      | Höhenbereich | Beschreibung                        |
|--------------------|--------------|-------------------------------------|
| Cirrus (Ci)        | hoch         | weiße, faserige Eisolke, Federwolke |
| Cirrocumulus (Cc)  | hoch         | kleine Schäfchenwolke, Eisolke      |
| Cirrostratus (Cs)  | hoch         | weiße Schleierwolke, Eisolke, Halo  |
| Alto cumulus (Ac)  | mittel       | grobe Schäfchenwolke                |
| Altostratus (As)   | mittel       | einheitliche weiß-graue Wolke, Hof  |
| Nimbostratus (Ns)  | tief         | dichte dunkle Regen/Schneewolke     |
| Stratocumulus (Sc) | tief         | regelmäßig gegliederte graue Wolke  |
| Stratus (St)       | tief         | graue einheitliche Wolke, Hochnebel |
| Cumulus (Cu)       | tief*–mittel | Quellwolken, Haufenwolke            |
| Cumulonimbus (Cb)  | tief*–hoch   | Gewitterwolke, Ambosswolke          |

### 3. Versuchsaufbau

Für den Versuch wird zur Feuchteberechnung das Aßmann'sche Aspirationspsychrometer benutzt (s. Versuch 2). Des Weiteren steht ein Handanemometer zur Verfügung und Tabellen und Abbildungen zur Wetterzustands- und Wolkenbestimmung.

### 4. Versuchsdurchführung

Machen Sie sich vor Beginn des Versuches mit der Arbeitsweise des Aßmann'schen Aspirationspsychrometers, dem Anemometer und den Unterlagen für die visuellen Beobachtungen vertraut und konsultieren Sie falls notwendig Ihren Betreuer.

Führen Sie in Absprache mit einem Betreuer eine meteorologische Beobachtung auf der Wiesenfläche zwischen bzw. neben den Gebäuden GEO I und GEO III (möglichst größtmöglicher Abstand von den Gebäuden) in 2 m Höhe durch, indem Sie die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit messen und den Wetterzustand (ww-Kodierung), den Bedeckungsgrad und die Wolkengattung bestimmen.

Vergleichen Sie ihre momentane Beobachtung mit dem Verlauf der meteorologischen Elemente an der Wetterstation Ökologisch-Botanischer Garten:

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/de/klima/5407/BotGar/index.php>

Ordnen Sie Ihre Beobachtungen der aktuellen Wetterlage zu, wie sie in der Berliner Wetterkarte (Login und Passwort bitte beim Betreuer erfragen) verzeichnet ist:

<http://wkserv.met.fu-berlin.de/>

Wolkenbilder finden Sie auch im Karlsruher Wolkenatlas:

<http://www.weltderwolken.de/>

## 5. Versuchsauswertung

1. Tragen Sie Ihre Messdaten in die Tabelle 3 ein und bestimmen Sie den Dampfdruck und die relative Luftfeuchte (s. Versuch 2).

Tabelle 3: Mustertabelle für die meteorologische Beobachtung

| Datum | Zeit | trockene Temperatur | feuchte Temperatur | Dampfdruck    | relative Luftfeuchte |
|-------|------|---------------------|--------------------|---------------|----------------------|
|       |      | °C                  | °C                 | hPa           | %                    |
|       |      |                     |                    |               |                      |
|       |      | Wetterzustand       | Bedeckungsgrad     | Wolkengattung | Bemerkungen          |
|       |      |                     |                    |               |                      |

2. Übernehmen Sie aus dem Internet (Wetterstation im Ökologisch Botanischen Garten) den Temperatur- und Feuchteverlauf des Beobachtungstages (1 Tag später herunterladen) und diskutieren Sie Ihre eigenen Beobachtungen im Vergleich zum Tagesgang der Wetterstation.
3. Entnehmen Sie der Berliner Wetterkarte (1 bis 2 Tage später herunterladen) die Wetterkarte und Wetterlage und diskutieren Sie Ihre Beobachtungen in diesem Zusammenhang.

## 6. Literatur

Foken, T. (2006): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, (2. überarb. u. erw. Aufl.), 326 Seiten.

WMO (1996): Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO, Note, 8: 6th Edition.

## Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie

| Nr | Author(s)              | Title  | Year    |
|----|------------------------|--|---------|
| 01 | Foken                  | Der Bayreuther Turbulenzknecht   | 01/1999 |
| 02 | Foken                  | Methode zur Bestimmung der trockenen Deposition von Bor  | 02/1999 |
| 03 | Liu                    | Error analysis of the modified Bowen ratio method  | 02/1999 |
| 04 | Foken et al.           | Nachfrostgefährdung des ÖBG  | 03/1999 |
| 05 | Hierteis               | Dokumentation des Experimentes Dlouhá Louka  | 03/1999 |
| 06 | Mangold                | Dokumentation des Experimentes am Standort Weidenbrunnen, Juli/August 1998   | 07/1999 |
| 07 | Heinz et al.           | Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis                     | 07/1999 |
| 08 | Foken                  | Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99  | 10/1999 |
| 09 | Foken et al.           | Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Zwischenbericht 1999   | 11/1999 |
| 10 | Sodemann               | Stationsdatenbank zum BStMLU-Projekt Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales  | 03/2000 |
| 11 | Neuner                 | Dokumentation zur Erstellung der meteorologischen Eingabedaten für das Modell BEKLIMA  | 10/2000 |
| 12 | Foken et al.           | Dokumentation des Experimentes VOITEX-99   | 10/2000 |
| 13 | Bruckmeier et al.      | Documentation of the experiment EBEX-2000, July 20 to August 24, 2000  | 01/2001 |
| 14 | Foken et al.           | Lufthygienisch-bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales   | 02/2001 |
| 15 | Göckede                | Die Verwendung des Footprint-Modells nach Schmid (1997) zur stabilitätsabhängigen Bestimmung der Rauigkeitslänge   | 03/2001 |
| 16 | Neuner                 | Berechnung der Evaporation im ÖBG (Universität Bayreuth) mit dem SVAT-Modell BEKLIMA   | 05/2001 |
| 17 | Sodemann               | Dokumentation der Software zur Bearbeitung der FINTUREX-Daten  | 08/2002 |
| 18 | Göckede et al.         | Dokumentation des Experiments STINHO-1   | 08/2002 |
| 19 | Göckede et al.         | Dokumentation des Experiments STINHO-2   | 12/2002 |
| 20 | Göckede et al.         | Characterisation of a complex measuring site for flux measurements   | 12/2002 |
| 21 | Liebenthal             | Strahlungsmessgerätevergleich während des Experiments STINHO-1   | 01/2003 |
| 22 | Mauder et al.          | Dokumentation des Experiments EVA_GRIPS  | 03/2003 |
| 23 | Mauder et al.          | Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003  | 12/2003 |
| 24 | Thomas et al.          | Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment  | 05/2004 |
| 25 | Göckede et al.         | Qualitätsbegutachtung komplexer mikrometeorologischer Messstationen im Rahmen des VERTIKO-Projekts   | 11/2004 |
| 26 | Mauder & Foken         | Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2   | 12/2004 |
| 27 | Herold et al.          | The OP-2 open path infrared gas analyser for CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O  | 01/2005 |
| 28 | Ruppert                | A TEM software for atmospheric turbulent exchange measurements using eddy covariance and relaxed eddy accumulation systems and Bayreuth whole-air REA system setup | 04/2005 |
| 29 | Foken (Ed.)            | Klimatologische und mikrometeorologische Forschungen im Rahmen des Bayreuther Institutes für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), 1989-2004                   | 06/2005 |
| 30 | Siebeke & Serafimovich | Ultraschallanemometer-Überprüfung im Windkanal der TU Dresden 2007   | 04/2007 |
| 31 | Lüers & Bareiss        | The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 1: Technical documentation of the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006                                      | 07/2007 |
| 32 | Lüers & Bareiss        | The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 2: Visualization of near surface measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006               | 07/2007 |
| 33 | Bareiss & Lüers        | The Arctic Turbulence Experiment 2006 PART 3: Aerological measurements during the ARCTEX 2006 campaign, May, 2nd to May, 20th 2006                                 | 07/2007 |
| 34 | Metzger & Foken et al. | COPS experiment, Convective and orographically induced precipitation study, 01 June 2007 – 31 August 2007, Documentation   | 09/2007 |

|    |                          |   |         |
|----|--------------------------|---|---------|
| 35 | Staudt & Foken           | Documentation of reference data for the experimental areas of the Bayreuth Centre for Ecology and Environmental Research (BayCEER) at the Waldstein site  | 11/2007 |
| 36 | Serafimovich et al.      | ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP1), September, 6th to October, 7th 2007  | 01/2008 |
| 37 | Serafimovich et al.      | ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER) - Documentation of the Intensive Observation Period (IOP2), June, 1st to July, 15th 2008   | 10/2008 |
| 38 | Siebicke                 | Footprint synthesis for the FLUXNET site Waldstein/Weidenbrunnen (DE-Bay) during the EGER experiment.   | 12/2008 |
| 39 | Lüers & Foken            | Jahresbericht 2008 zum Förderprojekt 01879 - Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge 2007 – 2013   | 01/2009 |
| 40 | Lüers & Foken (Eds.)     | Proceedings of the International Conference of "Atmospheric Transport and Chemistry in Forest Ecosystems" Castle of Thurnau, Germany, Oct 5 to Oct 8, 2009  | 10/2009 |
| 41 | Biermann et al.          | Mesoscale circulations and energy and gas exchange over the Tibetan Plateau – Documentation of the micrometeorological experiment, Nam Tso, Tibet , 25 June 2009 – 08 August 2009   | 12/2009 |
| 42 | Foken & Falke            | Documentation and Instruction Manual for the Krypton Hygrometer Calibration Instrument  | 01/2010 |
| 43 | Lüers & Foken            | Jahresbericht 2009 zum Förderprojekt 01879 - Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge 2007 – 2013   | 07/2010 |
| 44 | Biermann & Leipold (Ed.) | Tibet Plateau Atmosphere-Ecology-Glaciology Cluster Joint <i>Kobresia</i> Ecosystem Experiment: Documentation of the first Intensive Observation Period (IOP 1) summer 2010 in Kema, Tibet  | 01/2011 |
| 45 | Zhao et al.              | Complex TERRain and ECOlogical Heterogeneity (TERRECO) WP 1-02: Spatial assessment of atmosphere-ecosystem exchanges via micrometeorological measurements, footprint modeling and mesoscale simulations - Documentation of the Observation Period, May 12th to Nov. 8th, 2010, Haean, South Korea | 03/2011 |
| 46 | Mauder et al.            | Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 2011   | 05/2011 |
| 47 | Serafimovich et al.      | ExchanGE processes in mountainous Regions (EGER)- Documentation of the Intensive Observation Period (IOP3) June, 13th to July, 26th 2011 2011   | 11/2011 |
| 48 | Hübner et al.            | Documentation and Instruction Manual for the Horizontal Mobile Measuring System (HMMS) 2011   | 12/2011 |
| 49 | Lüers et al.             | The Arctic Turbulence Experiment 2009: Long-term measurements of near-surface turbulent fluxes in the Arctic environment - Documentation of the additional laser Scintillometer measurement campaign 2009 at Bayelva on Svalbard, August 2009   | 02/2012 |
| 50 | Foken                    | Klimawanderweg auf der Landesgartenschau in Bamberg 2012  | 04/2012 |
| 51 | Ruppert et al.           | Whole-air relaxed eddy accumulation for the measurement of isotope and trace-gas fluxes   | 05/2012 |
| 52 | Foken                    | Jahresbericht 2010-11 zum Förderprojekt 01879 -Untersuchung der Veränderung der Konzentration von Luftbeimengungen und Treibhausgasen im hohen Fichtelgebirge 2007 – 2013   | 12/2012 |
| 53 | Gerken et al.            | Documentation of the Atmospheric Boundary Layer Experiment, Nam Tso, Tibet, 08th of July – 08th of August 2012  | 03/2013 |
| 54 | Biermann (Ed.)           | Tibet Plateau Atmosphere-Ecology-Glaciology Cluster Joint <i>Kobresia</i> Ecosystem Experiment: Documentation of the 2nd Intensive Observation Period (IOP 2) summer 2012 in KEMA, Tibet  | 05/2013 |
| 55 | Babel et al.             | Documentation of the EVENT-HMMS Experiment 2012 – Microclimatological effects of rain-out shelters within EVENT II  | 06/2013 |
| 56 | Lüers et al.             | 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe - Homogenisierung der Bayreuther Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten   | 06/2014 |
| 57 | Babel                    | An R routine for the simplified application of a footprint-based characterisation of a complex measuring site for flux measurements   | 06/2014 |
| 58 | Lüers et al.             | Application of a multi-step error filter for post-processing atmospheric flux and meteorological basic data.  | 06/2014 |
| 59 | Zhao et al.              | GaFiR: a gap-filling package for ecosystem-atmosphere carbon dioxide flux and evapotranspiration data   | 06/2014 |

|    |              |  |         |
|----|--------------|--|---------|
| 60 | Foken et al. | Meteorologisches Instrumentenpraktikum an der Universität Bayreuth | 08/2014 |
|----|--------------|--|---------|