

Instrumentenkunde Zusammenfassung
Sommersemester 2014
Prof. Dr. Kottmeier

7. September 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Messfehler	4
1.1	Fehler von Messgrößen	4
2	Temperaturmessung	5
2.1	Temperatureinheiten	5
2.2	Messgeräte	5
2.2.1	Quecksilberthermometer	5
2.2.2	Flüssigkeitsthermometer	6
2.2.3	Bimetallthermometer	6
2.2.4	Thermoelemente	6
2.2.5	Widerstandsthermometer	6
2.3	Messanordnungen	8
2.4	Brückenmessung nach der Nullmethode	8
2.5	Strahlungsfehler	9
3	Windmessung	10
3.1	Theorie des Schalenkreuzanemometers	10
3.1.1	Stationärer Fall ohne Reibung: $\sum M = 0$	10
3.1.2	Ansatz zur Verallgemeinerung	11
3.1.3	Instationärer Fall, ohne Reibung	11
3.1.4	Einfluss der Reibung	12
3.2	Propelleranemometer	12
3.3	Windmessung über Staudruck	13
3.4	Windmessung mit Hitzdrahtanemometer	13

3.5	Windrichtungsmessung: Theorie der Windfahne	14
3.6	Ultraschallanemometer	15
3.6.1	Messprinzip	15
3.6.2	Funktionsweise von Ultraschallanemometern	16
3.6.3	Fehlerquellen Ultraschallanemometers	17
4	Feuchte	17
4.1	Definition von Feuchtemaßen, Umrechnungsformeln	17
4.1.1	Wasserdampfdruck, Sättigungsdampfdruck	17
4.1.2	Absolute Fehler	18
4.1.3	Spezifische Feuchte	18
4.1.4	Mischungsverhältnis	18
4.1.5	Relative Feuchte	18
4.1.6	Taupunktstemperatur	19
4.2	Feuchtemessung und Messgeräte	19
4.2.1	Psychrometer	19
4.2.2	Haarhygrometer, Hygrograph	21
4.2.3	Lyman- α -Hygrometer	21
4.2.4	Das Infrarothygrometer	23
4.2.5	Weitere Feuchtemessgeräte	23
5	Strahlungsmessung	24
5.1	Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen	24
5.2	Definition	25
5.2.1	Solare Strahlung oder kurzwellige Strahlung	25
5.2.2	Terrestrische Strahlung	25
5.2.3	Strahlungsbilanz	25
5.3	Klassifikation der Messgeräte	26
5.4	Energiebilanzgleichung einer Oberfläche für reale 2π -Geräte	26
5.5	Ideale 2π -Geräte	27
5.5.1	Ideale Pyranometer	27
5.5.2	Ideale Pyrgeometer	27
5.5.3	Ideale Pyrradiometer	27
5.6	Reale Pyrradiometer	27
5.7	Berechnung Strahlungsbilanz	27
5.8	Lambertsches Gesetz	28
6	Niederschlagsmessung	28
6.1	Niederschlagsmesser nach Hellmann	29
6.2	Disdrometer	29
6.2.1	Theoretische Grundlagen	30

6.2.2	Messprinzip des Joss-Waldvogel-Disdrometers	31
6.3	Niederschlagsradar	31
7	Aerologie	32
7.1	Meteorologische Vertikalsondierungen mit Radiosonden	32
7.1.1	Messungen	32
7.1.2	Berechnete Größen	32
7.2	Höhenwindmessung	32
7.2.1	Pilotballonmethode	32
7.2.2	Radarwindmessung	32
7.2.3	Radiotheodolitmethode	33
7.3	GPS	33

1 Messfehler

- Jede Messung ist mit Fehler behaftet.

- Relativer Fehler: $\frac{Istwert - Sollwert}{Sollwert}$ oder $\frac{Istwert - Sollwert}{Messbereichendwert}$
- Zufälliger Fehler: unvorhersehbare Änderungen an Messgeräten, Umwelt, Beobachter (sind immer unterschiedlich groß)
- durch Beeinflussung der Messgröße durch Messeinrichtung

1.1 Fehler von Messgrößen

- Linearitätsfehler: Max. Abweichung einer nicht linearen Nennkennlinie
Linearitätsfehler werden nach...
 - ...Festpunktmethode: Anfangswert und Endwert des Ausgangssignals so justiert, dass sie sich mit richtigen Wert decken.
 - ...Minimummethode: Anfangswert des Ausgangssignals fällt mit richtigem Wert zusammen.
 - ...Toleranzbandmethode: Lage der ausgegebenen Kennlinie so justiert, dass Summe der Quadrate der Abweichungen von linearen Nennkennlinie ein Minimum ist.
 - Nullpunktfehler: Abweichung des ausgegebenen Anfangswertes des Ausgangsbereichs vom Nennwert. Absolute Fehler auf Eingangssignal bezogen. Relative Fehler auf Messende.
 - ...Empfindlichkeitsfehler: Abweichung der gemessenen Empfindlichkeit von Nennempfindlichkeit.
 - ...Quantisierungsfehler: Quantisierung eines analogen Messsignals verursacht und beträgt $\pm 1 \text{Quantisierungsstufe}$
 - ...Hysteresefehler: Max. Abweichung der Messwerte, wenn man gleichen Wert einmal von kleineren Werten her, einmal von größeren Werten her einstellt.
ermittelt.
 - Fehler unter Wiederholungsbedingung: Durch wiederholtes Messen einer bestimmten Messgröße.
 - Fehlergrenzen: vom Hersteller garantierte Grenzen für Gesamtfehler

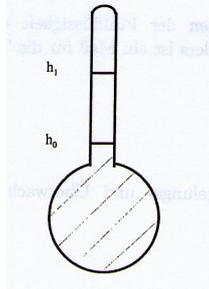


Abbildung 1: Quecksilberthermometer

2 Temperaturmessung

Temperatur ist als Maß für innere Energie eines Körpers eine wichtige Zustandsgröße.

2.1 Temperatureinheiten

Kelvin(T), Grad Celsius(ϑ), Grad Fahrenheit(T_f)
 $T = \vartheta + 273,15$ $\vartheta = \frac{5}{9}(T_f - 32)$

2.2 Messgeräte

2.2.1 Quecksilberthermometer

Hg ist im meteorologischen Bereich lange flüssig.

$$dV = \frac{\partial V}{\partial T} dT + \underbrace{\frac{\partial V}{\partial p} dp}_{=0 \text{ für } p=\text{const.}}$$

Volumenausdehnungskoeffizient: $\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$

Längenausdehnungskoeffizient: $\gamma_l = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p$

$$\rightarrow V(T) - V(T_0) = \underbrace{V_0(T) - V_0(T_0)}_{\text{Gefäß}} + \underbrace{q(t)[h_1 - h_0] - q(T_0)[h_1 - h_0]}_{\text{Faden}}$$

$V_0 = \text{Gefäßvolumen}$

$q = \text{Kapillarquerschnitt}$

2.2.2 Flüssigkeitsthermometer

Tauchrohr ausgebildeten Temperaturfühler F, elastisches Messglied M (Rohr und Schneckenfeder) mit Anzeigetafel, die mit Kapillarrohr K verbunden sind. Anwendung: Reglungs- und Überwachungsgeräte

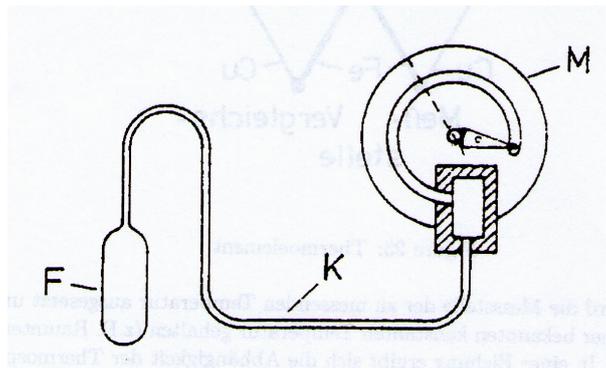


Abbildung 2: Flüssigkeits-Feder-Thermometer

2.2.3 Bimetallthermometer

Zwei fest verbundenen Schichten aus Werkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungseigenschaften. Bei Temperaturänderung → Krümmung
Anwendung: Temperatur-Zeitpunktreglern

2.2.4 Thermoelemente

Verlöten von zwei Drähte aus verschiedenen Metallen. An den freien Enden temperaturabhängiges Kontaktpotenzial. Bilden von Leiterschleifen und aufschneiden von Cu-Teil. Bei verschiedenen Temperaturen → Anschlussstellen zeigt elektromotorische Kraft, die Thermospannung. Thermospannungen kann man durch hochohmige Zeigergalvanometer messen (Ausschlagverfahren)

2.2.5 Widerstandsthermometer

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes als Maß der Temperatur metallischer Werkstoffe vorallem Platin, Nickel.

$$R_{\Theta} = R_0(1 + K_1\Theta + K_2\Theta^2)$$

$R_{\Theta,0}$ = Widerstand bei Temperatur Θ bzw. 0 Grad Celsius

$K_{1,2}$ = Materialkonstanten

Vorteile: gute Reproduzierbarkeit und Genauigkeit

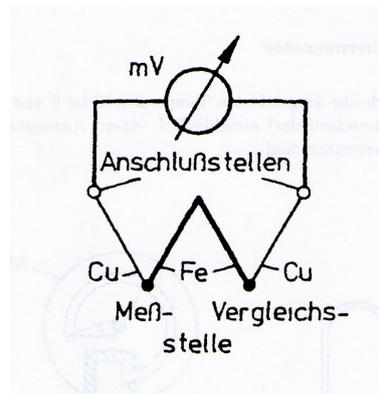


Abbildung 3: Thermoelement

- Halbleiterwiderstandsthermometer: höhere Temperaturbeiwert und negativer Temperturbeiwert

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad B = \text{Materialkonstante}$$

Messung der Widerstandsänderung über Brückenschaltung oder Kreuzspulinstrument

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + bT^2 + c(T - 100)T^3)$$

$$\frac{dR_T}{dT} = R_0(a + 2bT) = 0,39803 - 1,16035 * 10^{-4}T$$

$R_0 = \text{Widerstand bei } 0 \text{ Grad Celsius}$, $R_T = \text{Widerstand bei } T \text{ in } ^\circ\text{C}$, $T = \text{Sensortemperatur}$

2.3 Messanordnungen

Kirchhoffsche Regeln:

$\sum I_i = 0$: Knotenregel für die Zweige, die in einem Knoten münden

$\sum U_i = 0$: Maschenregel für die Masche, d.h. Spannungsabfälle an den einzelnen Elementen

2.4 Brückenmessung nach der Nullmethode

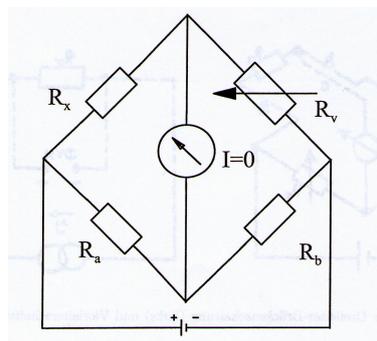


Abbildung 4: Einfache Brückenschaltung

Wheatstonesche Brückenschaltung:

$$\begin{aligned}
 R_v &= \frac{U_v}{I_v} & R_b &= \frac{U_b}{I_b} \\
 R_a &= \frac{U_a}{I_a} & R_x &= \frac{U_x}{I_x} \\
 I_v &= I_x & ; & \quad I_a = I_b \\
 \frac{R_a}{R_b} &= \frac{U_a}{I_a} \frac{I_b}{U_b} = \frac{U_a}{U_b} \\
 \frac{R_v}{R_x} &= \frac{U_v}{I_v} \frac{I_x}{U_x} = \frac{U_v}{U_x} = \frac{U_b}{U_a} \\
 \rightarrow \frac{R_a}{R_b} &= \frac{R_x}{R_v} \rightarrow R_x = R_v \frac{R_a}{R_b}
 \end{aligned}$$

2.5 Strahlungsfehler

Wärmehaushaltsgleichung: $L + B + S = 0$

S= Strahlungsbilanz des Messfühlers und setzt sich wie folgt zusammen:

I: Strahlung der Sonne

H: Himmelsstrahlung

R: Reflexstrahlung benachbarter Oberflächen im kurz- und langwelligen Spektralbereich

G: Wärmestrahlung der Atmosphäre und benachbarter Oberflächen

A: Ausstrahlung des Messfühlers

Entsprechend den Absorptionskoeffizienten des Messfühlers im kurz- und langwelligen Bereich, ϵ_k und ϵ_L wird ein Teil der Strahlung absorbiert, der Rest reflektiert:

$$S = \epsilon_K(I + H) + \epsilon_L(G - \sigma T^4)$$

Stationäres Gleichgewicht am Messfühler (B=0: $S + L = S - \alpha_L(\vartheta - \vartheta_L) = 0$

und $T = T_L + \frac{S}{\alpha_L}$ Klimahütte: Das Holz der Hütte und das Thermometerglas verhalten sich im langwelligen Bereich wie schwarze Körper, d.h. $\epsilon_L \approx 1$, Strahlungsbilanz ist mit I=0:

$$S = G - A = \sigma T_H^4 - \sigma T^4 \approx 4\sigma T_L^3(\vartheta_H - \vartheta) = \alpha_S(\vartheta_H - \vartheta)$$

ϑ = mittlere Temperatur der Hüttenteile $\alpha_S = 4\sigma T_L^3$ = Strahlungsübergangszahl

Wärmebilanzgleichung des Hüttenthermometers: $\alpha_S(\vartheta_H - \vartheta) - \alpha_L(\vartheta - \vartheta_L) = 0$

Temperatur des Thermometers: $\vartheta = \vartheta_L + \frac{\alpha_S}{\alpha_L + \alpha_S}(\vartheta_H - \vartheta_L)$

Instationärer Fall für verstrahltes Thermometer:

Wärmebilanzgleichung: $S + L + B = 0 = S - \frac{c\rho V}{A} \frac{d\vartheta}{dt} - \alpha_L(\vartheta - \vartheta_L)$

Temperaturänderung: $\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \left[\vartheta - \left(\vartheta_L + \frac{S}{\alpha_L} \right) \right]$ mit $\tau = \frac{c\rho V}{A\alpha_L} = \frac{cm}{a\alpha_L}$

3 Windmessung

3.1 Theorie des Schalenkreuzanemometers

3.1.1 Stationärer Fall ohne Reibung: $\sum M = 0$

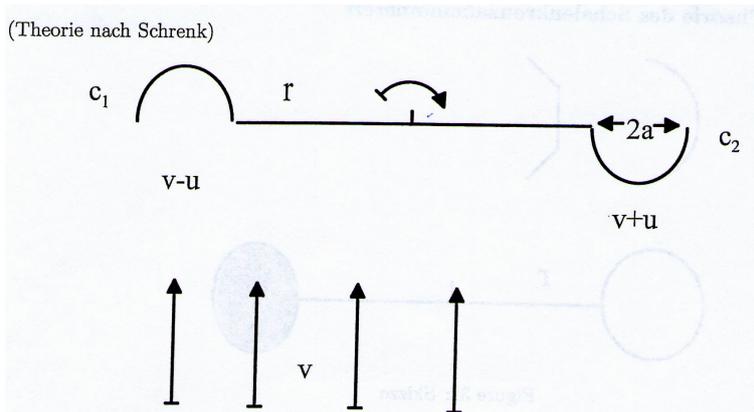


Abbildung 5: Schalenanemometer (Theorie von Schenk)

$c_1, c_2 = \text{Widerstandsbeiwerte}; A = \text{Querschnittsfläche}$

$$\begin{aligned}
 c_1 \frac{\rho}{2} (v-u)^2 Ar - c_2 \frac{\rho}{2} (v+u)^2 Ar &= 0 \\
 c_1 (v-u)^2 &= c_2 (v+u)^2 \\
 \frac{v+u}{v-u} = + \frac{\sqrt{c_1}}{\sqrt{c_2}} = q \rightarrow v &= \underbrace{\frac{q+1}{q-1}}_k u
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

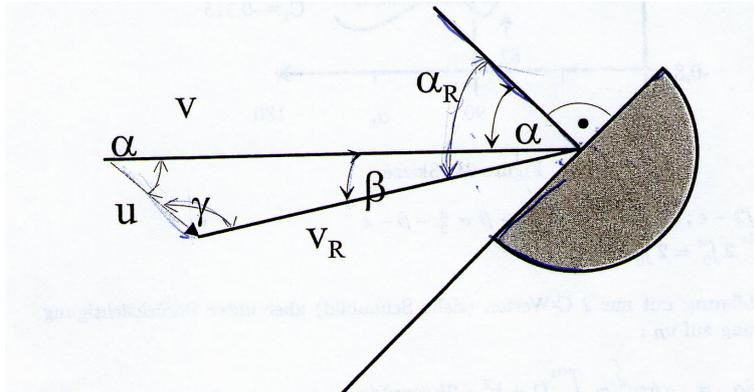
- Auslauf:
Wind abgestellt ($v=0$): $\left(\frac{I}{r} \frac{du}{dt}\right)_A \text{ usl.} = \frac{1}{2} \rho Ar [c_1 u^2 + c_2 u^2] = \frac{\rho}{2} Ar u^2 (c_1 + c_2)$
- Anlauf ($u=0$): $\left(\frac{I}{r} \frac{du}{dt}\right)_A \text{ nl.} = \frac{1}{2} \rho Ar v^2 (c_1 - c_2)$

3.1.2 Ansatz zur Verallgemeinerung

Andere Gleichung für stationären Fall: $\int_0^{2\pi} M(\alpha) d\alpha$

Drehmoment muss für jeden Arm im Mittel 0 sein: $M(\alpha) = C(\alpha_R) \frac{1}{2} \rho v_R^2 Ar$

$\alpha = \text{Winkel}; \alpha_R = f(\alpha); u = \text{Tangentialgeschwindigkeit}, v = \text{Wind } u =$



$$\frac{v}{k}; k = \frac{1}{k'}; u = kv; k = \frac{u}{v}; \alpha_R = \alpha + \beta$$

- Cosinussatz: $v_R^2 = v^2 + u^2 - 2uv \cos \alpha = v^2(1 + k^2 - 2k \cos \alpha)$
- Sinussatz:
 - $\sin \beta = \frac{u}{v} \sin \gamma$
 - $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta) = 180^\circ - \alpha_R$
 - $\sin(180 - \alpha_R) = \sin \alpha_R$
 - $\rightarrow \sin \gamma = \sin \alpha_R$
 - $\sin \beta = \frac{u}{v} \sin \alpha_R = k \sin \alpha_R$
 - $\rightarrow \alpha_R = \alpha + \arcsin(k \sin \alpha_R)$
 - $\rightarrow \int_0^{2\pi} M(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2} \rho v^2 Ar \int_0^{2\pi} C(\alpha_R)(1 + k^2 - 2k \cos \alpha) d\alpha = 0$

3.1.3 Instationärer Fall, ohne Reibung

Mittlere Drehmoment aller N Schalen:

$$\frac{I}{r} \frac{du}{dt} = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} M(\alpha) d\alpha$$

$$= \frac{N}{2\pi} \rho v^2 Ar (c_1 + c_2) \left(\left(\frac{\pi}{2} \frac{c_1 - c_2}{c_1 + c_2} + \epsilon \right) \frac{u^2}{v^2} - \left(3 - \epsilon^2 \right) \frac{u}{v} + \left(\frac{\pi}{2} \frac{c_1 - c_2}{c_1 + c_2} - \epsilon \right) \right)$$

$N = \text{Anzahl der Schalen}$

$$\text{Riccati'sche DGL der Art: } y' + \underbrace{p(x)}_c y^2 + \underbrace{q(x)}_{f(t)} y + \underbrace{r(x)}_{f(t)} = 0$$

Vereinfachungen (für v Ansatz):

- Sprungfunktion
- Vernachlässigung des mit u quadratischen Gliedes $\frac{u}{v} < 0,5$

3.1.4 Einfluss der Reibung

$$\frac{I}{r} \frac{du}{dt} = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} M(\alpha) d\alpha - M_R$$

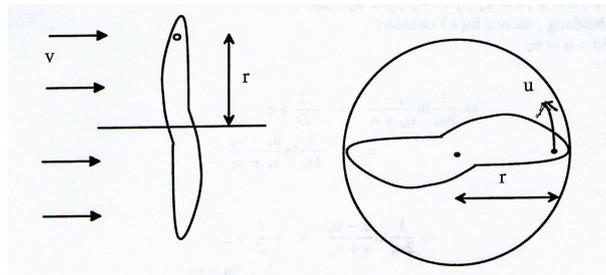
M_R = negatives Moment

Haftreibung wichtig, Gleitreibung vernachlässigbar

Haftreibungsmoment für 3 Schalen: $M_{RA} = \frac{\rho}{2} v_R^2 A (c(\alpha) + c(\alpha + 120) + c(\alpha + 240))$

$$\rightarrow v_A = \sqrt{\frac{2M_{RA}}{\rho A (c(\alpha) + c(\alpha + 120) + c(\alpha + 240))}} \quad v_A = \text{Anlaufgeschwindigkeit}$$

3.2 Propelleranemometer



- Stationärer Fall:

$$\begin{aligned} F_a = 0 &= N c_a \frac{1}{2} \rho v^2 A = N c_w \frac{1}{2} \rho u^2 A \\ \omega &= c_w \frac{1}{2} \rho v^2 A \\ c_a v^2 &= c_w u^2 \\ v &= \sqrt{\frac{c_w}{c_a}} u \quad k_p = \sqrt{\frac{c_a}{c_w}} \\ &\rightarrow v = \frac{u}{k_p} \end{aligned} \quad (2)$$

- Instationärer Fall

$$\begin{aligned} \frac{I}{r} \frac{du}{dt} &= N \frac{1}{2} \rho A r (c_a v^2 - c_w u^2) \\ \frac{du}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{N}{I} \rho A r^2 c_w (u^2 - \frac{c_a}{c_w} v^2) \\ D_p &\equiv \frac{2I}{n \rho A r^2 c_w}; \tau_p \equiv \frac{D}{v} \end{aligned} \quad (3)$$

$I = \text{Trägheitsmoment}; D_p = \text{Trägheitslänge}$

$$\begin{aligned}
 &\rightarrow \frac{du}{dt} = -\frac{1}{D_p}(u^2 - k_p^2 v^2) \\
 &\rightarrow \frac{du}{dt} = -\frac{1}{D_p}(u^2 - u_s^2) \\
 &\rightarrow \int \frac{du}{u^2 - u_s^2} = -\int \frac{dt}{D_p} \\
 \rightarrow \text{BornsteinIntegration} &\int \frac{dx}{(ax+b)(fx+g)} = \frac{1}{bf-ag} \ln \frac{fx+g}{ax+b} \\
 &u = x; a = 1, b = u_s, f = -1; g = u_s
 \end{aligned} \tag{4}$$

Fallunterscheidung, da nur $\ln(+)$ definiert...

3.3 Windmessung über Staudruck

$$\begin{aligned}
 p_G &= p_{stat} + p_{stau} = p_{stat} + \frac{1}{2}\rho v^2 \\
 \Delta p &= p_G - p_{stat} = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad \Delta p = \text{Messdifferenzdruck} \\
 v^2 &= \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho} \rightarrow v_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \\
 v_1 &= \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

3.4 Windmessung mit Hitzdrahtanemometer

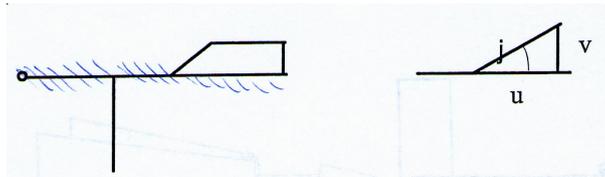
- Sensor besteht aus einem feinen (Platin, Platin-Iridium oder Tungsten) Widerstandsdraht
- Konstant Temperaturmessung: Draht innerhalb einer Wheatstonschen Brückenschaltung auf konstanter Temperatur gehalten. Änderung der Strömungsgeschwindigkeit \rightarrow Änderung der Wärmeübergang zur Umgebung und damit die elektrische Regelungsleistung.
 - Vom Hitzdraht wird pro Zeiteinheit eine Energiemenge abgegeben, die proportional zur Leitungslänge, Durchmesser d und Differenz

zwischen Temperatur des Leiters Θ_w und des umgebenden Gases Θ_g

- Proportionalitätskonstante α_Θ ist Wärmeübergangszahl
- Statt Wärmeübergangszahl wird Nusseltzahl Nu benutzt: $Nu = \frac{\alpha_g d}{\lambda_g}$ λ_g = Wärmeleitfähigkeit des Gases bei Temperatur Θ_g .
- Energiegleichung: $I^2 R_w = \alpha_g \pi d l (\Theta_w - \Theta_g) = \pi l \lambda_g (\Theta_w - \Theta_g) Nu$
- Temperaturabhängigkeit des Platinfühlers konstant
- Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Windgeschwindigkeit: $\frac{I^2 R_w}{R_w - R_g} = A + bu^n$

- Konstantstrommethode: Sensorwiderstand gemessen

3.5 Windrichtungsmessung: Theorie der Windfahne



- Windrichtungsmessung = dynamisches System 2. Ordnung $\sin \vartheta = \frac{v}{u} \approx \vartheta \rightarrow v = u\vartheta$
 $\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = f(t)$
 $\omega_0 = \text{Eigenfrequenz}; \beta = \text{Dämpfungskonstante}; f(t) = \text{äußere Kraft}$
- $f(t) = 0 \rightarrow \text{harmonische Schwingung}$ $\beta = 0 \rightarrow \text{ungedämpft}$
 $\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_0^2 y = 0 \rightarrow y = A \sin(\omega_0 t + \alpha)$ $\alpha = \text{Anfangsbedingung}$
- gedämpft
 $\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0$
 Ansatz: $y = e^{kt}$, Bestimmung charakteristische Gleichung:
 $k^2 + 2\beta k + \omega_0^2 = 0 \rightarrow k_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$
 $\beta^2 = \omega_0^2$ aperiodischer Grenzfall
 $\beta^2 > \omega_0^2$ aperiodischer Kriechfall
 $\beta^2 < \omega_0^2$
 $f(t) = \text{Sprungfunktion: } y = \phi$
 $\frac{d^2 \phi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\phi}{dt} + \omega_0^2 \phi = \omega_0^2 \psi_S$
- Allgemeine Lösung: $\phi = A \cos(\omega_S t - \alpha) + a e^{-\beta t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \alpha)$

3.6 Ultraschallanemometer

3.6.1 Messprinzip

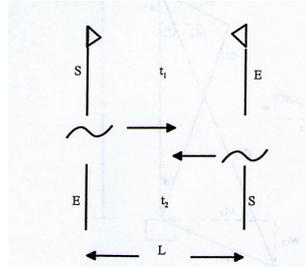


Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau des Ultraschallanemometers mit Schallwandler E und S und unterschiedlichen Laufzeiten t_1 und t_2 bei Schallausbreitung mit und gegen den Wind

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{L}{c+u}; t_2 = \frac{L}{c-u}; u \parallel L \\
 \frac{L}{t_1} &= c+u; \frac{L}{t_2} = c-u \rightarrow \frac{L}{t_1} - \frac{L}{t_2} = 2u; \\
 \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} &= \frac{2u}{L}; c = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{t_1} + \frac{L}{t_2} \right); \\
 c \text{ eliminieren: } \frac{L}{t_1} - u &= \frac{L}{t_2} + u \\
 \rightarrow u &= \frac{L}{2} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Temperaturmessung

$$\begin{aligned}
 c &= 20,067 \left[T \left(1 + 0,3192 \frac{e}{p} \right) \right]^{1/2} \\
 T &= k \left(\frac{t_1 + t_2}{t_1 t_2} \right)^2 \\
 k &= \frac{L^2}{20,067^2 (1 + 0,3192 \frac{e}{p})}
 \end{aligned} \tag{7}$$

T= absolute Temperatur; p=Luftdruck; e=Wasserdruck

3.6.2 Funktionsweise von Ultraschallanemometern

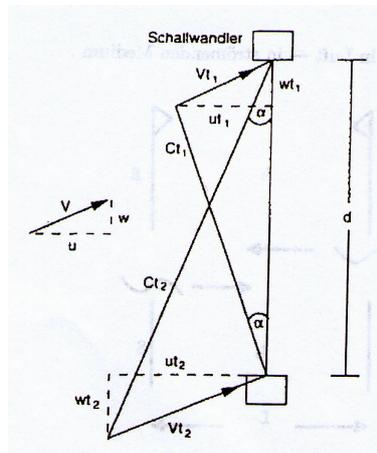


Abbildung 7: Darstellung des Funktionsprinzips eines Ultraschallanemometers nach Coppin und Taylor (1983)

- Windvektor $\vec{V} \rightarrow$ in u und w Komponente zerlegen
- Schallimpuls vom unteren zum oberen Sender gesandt, Druckwelle benötigt die Zeit t_1
- In zwei Anteile aufspalten:
 - Aufgrund der Schallausbreitung in der Zeit t_1 zurückgelegter Weg Ct_1
 - Durch vorherrschender Wind transportierte Strecke $\vec{V}t_1$, lässt sich in einen senkrecht zur Messstrecke ut_1 und in Richtung der Messstrecke wt_1 Anteil aufteilen.
- Laufzeit $t_1 = \frac{d}{C \cos(\alpha) + w}$ $t_2 = \frac{d}{C \cos(\alpha) - w}$
- Zwei Möglichkeiten Kalibrierung für w Komponente zu entwickeln:
 - Differenz der Laufzeit: $t_1 - t_2 = \frac{2dw}{C^2 - w^2} \approx \frac{2dw}{C^2}$
 - Kehrwert der Laufzeiten: $\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{2w}{d}$

3.6.3 Fehlerquellen Ultraschallanemometers

Nachteile:

- Abschattungseffekte durch Sender, Empfänger und durch zu deren Halterung notwendige Streben
- Veränderungen des Windfelds durch Einbringen des Sensors

4 Feuchte

4.1 Definition von Feuchtemaßen, Umrechnungsformeln

4.1.1 Wasserdampfdruck, Sättigungsdampfdruck

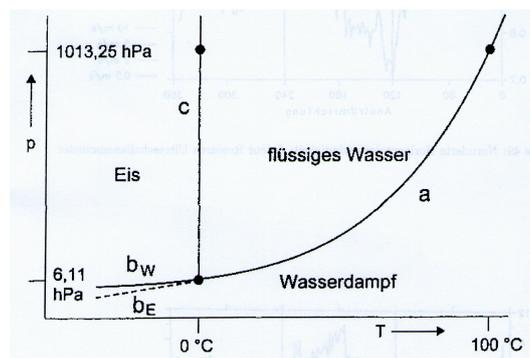


Abbildung 8: Phasendiagramm Wasser, p =Druck, unter dem die jeweilige Phase steht, T =Temperatur; a =flüssiges Wasser; b_w unterkühltes Wasser und Wasserdampf; b_E Eis und Wasserdampf; c = Eis und flüssiges Wasser

- Wasserdruck e ist Partialdruck der gasförmigen Phase des Wassers in der Atmosphäre [Einheit: hPa]
- Bei gegebener Temperatur maximal mögliche Partialdruck heißt Sättigungsdampfdruck e_w
- Psychrometerformel nach Sprung für den Dampfdruck: $e = e_{w,i} - Ap(t - t_w)$ mit $A = 6,6 * 10^{-4} \frac{1}{K}$ für Wasser und $A = 5,8 * 10^{-4} \frac{1}{K}$ für Eis $e_{w,i}$ =Sättigungsdampfdruck in hPa über Wasser bzw. Eis, bei Temperatur t_w ; t =Temperatur des trockenen Thermometers in $^{\circ}C$; t_w =Temperatur des befeuchteten Thermometers in $^{\circ}C$

- Magnusformel für Sättigungsdampfdruck: $e_{w,i} = C_1 e^{\left(\frac{C_2 t}{C_3 + t}\right)}$
mit $C_1, C_2, C_3 =$ Konstanten, $t =$ Lufttemperatur in $^\circ C$

4.1.2 Absolute Fehler

- Absolute Feuchte a ist die Masse des Wasserdampfes je Volumeneinheit [Einheit $\frac{g}{m^3}$]
- $a = \frac{e}{R_w T}$ mit $e =$ Dampfdruck in hPa, bei Temperatur T in K

4.1.3 Spezifische Feuchte

- Spezifische Feuchte q ist das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Masse der feuchten Luft in derselben Volumeneinheit. [Einheit: $\frac{g}{kg}$]

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{\rho_w}{\rho_l + \rho_w} = \frac{\frac{e}{R_w T}}{\frac{p_l}{R_l T} + \frac{e}{R_w T}} = \frac{e \frac{R_l}{R_w}}{p_l + e \frac{R_l}{R_w}} \\
 &= \frac{0,622e}{p - e + 0,622e} = \frac{0,622e}{p + e(0,622 - 1)} \\
 \rightarrow q &= \frac{0,622e}{p - 0,378e} \approx 0,622 \frac{e}{p}
 \end{aligned}$$

mit $q =$ spezifische Feuchte in $\frac{kg}{kg}$; $e =$ Dampfdruck in hPa; $p =$ Luftdruck in hPa

4.1.4 Mischungsverhältnis

- Mischungsverhältnis r ist das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Masse der wasserdampffreien Luft derselben Volumeneinheit [Einheit: $\frac{g}{kg}$]

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{\rho_w}{\rho_l} = \frac{\frac{e}{(R_w T)}}{\frac{p_l}{(R_l T)}} = \frac{R_l e}{R_w p_l} = \frac{R_l e}{R_w (p - e)} \\
 \rightarrow r &= 0,622 \frac{e}{p - e} \approx 0,622 \frac{e}{p}
 \end{aligned}$$

4.1.5 Relative Feuchte

- Relative Feuchte U gibt das Verhältnis des aktuellen Wasserdampfdruckes zum bei der gegebenen Temperatur maximal möglichen (Sättigungs-)Dampfdruck an und wird als % relative Feuchte angegeben
- $U = \frac{e}{e_{w,i}} \cdot 100$ mit $U =$ relative Feuchte in %; $e =$ Dampfdruck in hPa, bei Temperatur P ; $e_{w,i} =$ Sättigungsdampfdruck über Wasser bzw. Eis in hPa, bei Temperatur t .
- Bei Eis am Feuchtethermometer: $e = e_i - Ap(t - t_w)$

4.1.6 Taupunktstemperatur

- Taupunktstemperatur t_d ist diejenige Temperatur, bei welcher der Sättigungsdampfdruck e_w gleich dem aktuellen Dampfdruck ist
- $t_d = \frac{C_3 \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)}{C_2 - \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)}$ mit $t_d =$ Tautemperatur in $^{\circ}C$; $C_1, C_2, C_3 =$ Konstanten; $e =$ Dampfdruck in hPa, bei Temperatur T

4.2 Feuchtemessung und Messgeräte

Methoden zur Messung der Feuchte:

- Psychrometer
- hygroskopische Substanzen, z.B. Haare
- Taupunkt- oder Frostpunktshygrometer
- elektrische Methoden, z.B. Bestimmung Widerstand von Lithiumchlorid

Feuchtemessgröße	Abkürzungen	Einheit	messbar	Messgerät
relative Feuchte	U, f	1	ja	Haarhygrometer
absolute Feuchte	a	$\frac{g}{m^3}$	ja	Lyman- α
spezifische Feuchte	q	$\frac{g}{kg}$	nein	
Mischungsverhältnis	r	$\frac{g}{kg}$	nein	
Dampfdruck	e	hPa	nein	
Taupunkt	T_d	$^{\circ}C$	ja	Taupunktspiegel
(Feuchthermometer)	t_f	$^{\circ}C$	ja	Psychrometer

4.2.1 Psychrometer

- Abhängigkeit der Verdunstung von den Feuchteverhältnissen der umgebenden Luft
- besteht aus zwei Thermometern, eines misst die Lufttemperatur T , das andere ist mit einem feuchten Strumpf überzogen und kühlt sich in Folge der Verdunstung unter die Lufttemperatur ab
- Temperatur T_f und T dient zur Berechnung der Feuchtegröße (Psychrometertafel)

Ideale Psychrometer:

- Wärmebilanzgleichung einer feuchten Oberfläche: $Q + B + H + LV = 0$
mit Q =Strahlungsbilanz (≈ 0 Strahlenschutz); B = Wärmestrom aus dem Körperinneren (klein angenommen)
- Definition ideales Feucht-Thermometer: Enthält nicht $Q+B$, mit Kombination mit Thermometer zur Messung der Lufttemperatur ist es ein ideales Psychrometer
- $H + LV = 0$
Ansatz : $H = \frac{\alpha_L}{c_p}(T_f - T_L)$ mit α_L =Wärmeübergangszahl; T_L = Lufttemperatur; T_f Temperatur des Messfühlers; c_p spezifische Wärmekapazität [$\frac{J}{kgK}$]; L = spezifische Verdampfungswärme [$\frac{J}{kg}$]

Reale Psychrometer:

- Voraussetzung: $Q=B=0$ des idealen Psychrometers
- kurzwellige Strahlung (Sonne) durch Strahlungsschutzröhre ausgeschaltet
- langwellige Strahlung wie schwarze Körper
- $Q = \sigma T_L^4 - \sigma T_f^4$ Taylorentwicklung um T_L
 $\rightarrow Q = -4\sigma T_L^3(T_f - T_L) = -\alpha_s(T_f - T_L)$ mit α_s =Strahlungsübergangszahl

4.2.2 Haarhygrometer, Hygrograph

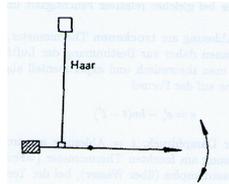


Abbildung 9: Prinzip des Haarhygrometers

- Veränderung Länge des Haars bei Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit
- Verwendung: Registrierung der relativen Feuchte

4.2.3 Lyman- α -Hygrometer

- Allgemeine Bemerkungen
 - selektive auf Frequenzen beschränkte Absorption von Strahlung durch den Wasserdampf
 - nur solche Spektralbereiche herausuchen, wo nur Wasserdampf absorbiert, damit Abhängigkeit zwischen Feutemessung und Änderung der Absorptionsstärke eindeutig ist
 - Wasserdampf hat Absorptionsbanden im ultravioletten(Lyman- α -Banden) und infraroten Spektralbereich
 - Messgeräte: Lyman- α -Hygrometer und Infrarothygrometer (Messung turbulenter Feuchteschwankungen)
- Lyman- α -Hygrometer (Messprinzip)
 - Wasserdampf absorbiert stark bei 121,6nm, Sauerstoff hat in diesem Bereich einen starken Einbruch
 - Wenn Streunungs- und Emissionsbeiträge vernachlässigt werden können, dann lautet Strahlungsbilanzgleichung:

$$\begin{aligned}
dI_\lambda &= -k_\lambda \rho dx I_\lambda \\
\rightarrow \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} &= -k_\lambda \rho dx \\
d \ln I_\lambda &= -k_\lambda \rho dx \\
\text{Integration} \quad \ln \frac{I_\lambda(x)}{I_{0\lambda}} &= -k_\lambda \rho x
\end{aligned}
\tag{8}$$

Beer-Bounger-Lambertsche Gesetz: $I_\lambda(x) = I_{0\lambda} e^{(-k_\lambda \rho x)}$ $I_\lambda(x)$ =gemessene Strahlungsintensität an der Stelle x der Frequenz λ , $I_{0\lambda}$ =ausgesandte Strahlungsintensität der Frequenz λ , k_λ = Absorbtionskoeffizient bei Frequenz λ , x =Länge des Absorbergases, ρ Gasdichte des Absorbergases

- Vorteile
 - * Gerät sich leicht konstruieren, minimal eine cm Strahlweg
 - * Trägheitszeit ist sehr kurz und Gerät ist für Turbulenzmessungen geeignet
- Nachteile
 - * Der zur Erkennung des UV-Lichtes notwendige Wasserstoff reagiert mit den Elektroden und der Ummantelung, d.h. die Quelle ist nicht stabil
 - * Transmissionseigenschaften des Quellfensters ändern sich

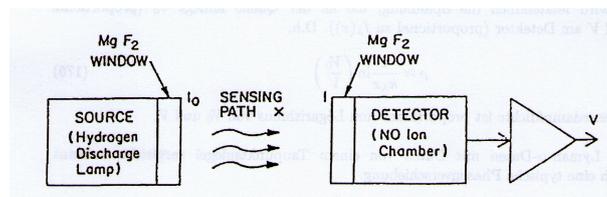


Abbildung 10: Blockdiagramm eines Lyman- α Absorptionshydrometers

- Realisierung des Lyman- α Gerätes (Konstruktion)
 - Lyman- α Strahlungsquelle
 - Fenster, mit hohem Transmissionseigenschaften im UV-Bereich (Magnesiumfluorid)
 - Ionsationskammer mit NO als Ionisationsgas

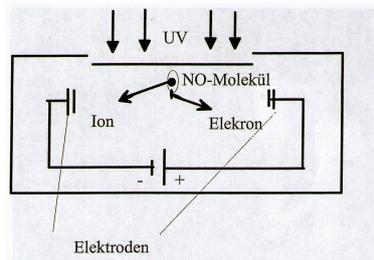


Abbildung 11: Skizze einer Ionisationskammer

4.2.4 Das Infrarothygrometer

- Absorptionsbanden bei 1,4 , 1,9, 2,7 , 6,3 μm . Normalerweise 2,7 μm
- Vorteil: höhere Lebensdauer der Infrarotquelle
- Nachteil: größere Wellenlängen 15cm-1m und damit größerer Störfaktor für Turbulenzmessungen

4.2.5 Weitere Feuchtemessgeräte

- Hygrioren sind Sensoren, deren Ohmscher Widerstand sich durch hygroskopische Wasseraufnahme mit der Luftfeuchtigkeit ändert
- Taupunktspiegel:
Geregt kühlbaren Spiegel, an dem beim Erreichen des Taupunktes ein Beschlag auftritt. Wird mit einer Leuchtdiode und einem Fototransistor erfasst

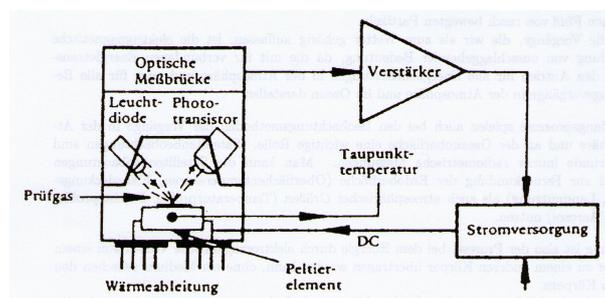


Abbildung 12: Funktionsweise des Taupunktspiegels

- Differential-Absorptions-Hygrometer nutzen die unterschiedliche Absorption nahegelegener Wellenlängen, von denen nur eine durch Was-

serdampfabsorbtion beeinflusst ist, die andere dagegen auch Absorbtion anderer Gase unterliegt

- Kapazitive Feuchtesensoren (Humicap) sind Polymere deren Kapazität sich durch Wasserdampfabsorbtion mit der Luftfeuchtigkeit ändert. Sie werden heute vielfach in Radiosonden eingesetzt

5 Strahlungsmessung

- Strahlung in der Physik:
 - einen Fluß von Photonen durch Ausbreitung elektromagnetischer Wellen (für Meteorologen am Wichtigsten)
 - einen Fluß von rasch bewegten Partikeln
- Prozess, bei dem Energie durch elektromagnetische Wellen von einem Körper zum anderen übertragen werden kann, ohne ein Medium zwischen den Körpern

Bezeichnung	Größe	Dimension
Strahlungsenergie	Q	J=Ws
Strahlungsfluss	$\frac{dQ}{dt}$	W
Strahlungsichte	$\frac{dQ}{(dA*dt)}$	$\frac{w}{m^2}$

5.1 Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen

- Aufteilung unter anderem in solare Strahlung $\lambda \leq 4\mu m$ und in terrestrische Strahlung $\lambda \geq 4\mu m - 100\mu m$
- Zwischen Phasengeschwindigkeit von (Licht-)Wellen c , ihrer Wellenlänge λ und Frequenz ν besteht die Beziehung: $c = \lambda\nu$
- sichtbare Wellenlängenbereich $400nm - 700nm$ Kürzerwellig \rightarrow ultraviolette Licht, langwelliger \rightarrow infrarote Strahlung
- Gesetz, das die Emission thermischer Strahlung eines Körpers beschreibt, ist das Stefan-Boltzmann-Gesetz:
 $M = \epsilon\sigma T^4$ (Einheit: $\frac{W}{m^2}$)
 mit Stephan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$
 Gesetz besagt, dass die Emission, integriert über alle Wellenlängen, proportional zur 4. Potenz der absoluten Temperatur eines Körpers ist.

5.2 Definition

5.2.1 Solare Strahlung oder kurzwellige Strahlung

- Messbare spektrale Energieverteilung der extraterrestrischen Sonnenstrahlung reicht von 200nm bis 3000nm
- Über ganzes Spektrum integrierter Wert, wird Solarkonstante bezeichnet [Wert: $1366,4 \frac{W}{m^2} \pm 1\%$]
- Unterscheidung im solaren Bereich zwischen:
 - direkter solaren Strahlung S: $S = I \sin h$ mit I=direkte Sonnenstrahlung pro Zeit- und Flächeneinheit senkrecht zur Einstrahlrichtung, h=Sonnenhöhenwinkel
 - diffuser solaren Strahlung D (Streu und Reflexstrahlung von Luft und Wolken, diffuse Himmelsstrahlung)
 - Globalstrahlung $K \downarrow$ (Summe aus direkter Himmelsstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung): $K \downarrow = I \sin h + D$
 - kurzwelliger Reflexstrahlung $K \uparrow$
- α =mittleren solaren Absorptionskoeffizienten der Erdoberfläche:
 $K \uparrow = (1 - \alpha)K \downarrow = rK \downarrow$ $r = (1 - \alpha)$ = mittlerer Reflexionskoeffizienten oder Albedo der Oberfläche

5.2.2 Terrestrische Strahlung

Bereich von 6000nm bis 60000nm

- atmosphärischen Gegenstrahlung $L \downarrow$
- Ausstrahlung der Erdoberfläche $L \uparrow = \epsilon \sigma T^4$
- langwelligen Reflexstrahlung $(1 - \epsilon)L \downarrow$

5.2.3 Strahlungsbilanz

Summe der solaren und terrestrischen Strahlungsflüsse ergibt sich die Strahlungsbilanz:

$$Q = K \downarrow - k \uparrow + L \downarrow - L \uparrow - (1 - \epsilon)L \downarrow = (1 - r)K \downarrow + \epsilon(L \downarrow - \sigma T^4)$$

Strahlungsbilanz gibt an, welche Strahlungsenergie in einem bestimmten Niveau der Atmosphäre zur Umsetzung in andere Energieformen zur Verfügung steht.

5.3 Klassifikation der Messgeräte

- Sonnenscheinschreiber: Erfasst und registriert die Dauer direkter Sonnenstrahlung
- Pyrradiometer: Misst aus dem Halbraum auf eine ebene Fläche fallende totale Strahlungsflussdichte
- Pyranometer: Misst aus dem Halbraum auf eine ebene Fläche fallende solare Strahlungsflussdichte
- Pyrheliometer: Misst die direkte solare Einstrahlung S
- Pyrgeometer: Misst auf eine horizontale nach oben gerichtete schwarze Fläche fallende atmosphärische Gegenstrahlung bei jeweiliger Lufttemperatur
- Nettopyrradiometer (Strahlungsbilanzmesser): Misst die Nettostrahlungsflussdichte Q . Wichtiges Strahlungsmessgerät. Besteht aus zwei Pyrradiometern
- Nettopyranometer: Misst die solare Nettostrahlungsflussdichte $K \downarrow - K \uparrow$
- Nettopyrgeometer: Misst die terrestrische Nettostrahlungsflussdichte $L \downarrow - L \uparrow$
- Oberflächenthermometer: Oberflächentemperaturmessgerät, $8 - 12 \mu m$

5.4 Energiebilanzgleichung einer Oberfläche für reale 2π -Geräte

- Verluste: $\underbrace{\frac{\lambda}{l}(T_A - T_G)}_{(a)} + \underbrace{\alpha_A^l \sigma T_A^4}_{(b)} + \underbrace{\alpha_h(u)(T_A - T_G)}_{(c)}$

mit (a)=Bodenwärmestrom, (b)=langwellige Ausstrahlung, (c)=fühlbarer Wärmestrom ≈ 0 , da $u=0$

- Gewinne: $\tau_H^k \alpha_A^k K \downarrow + \tau_H^l \alpha_A^l L \downarrow + \alpha_A^l \underbrace{\alpha_H^l \sigma T_G^4}_{(d)} + \underbrace{r_H^l \alpha_A^l \alpha_A^l \sigma T_A^4}_{(e)}$

mit (d)= Lupolenhaubenstrahlung, (e)=Empfangsflächenausstrahlung wird an der Oberfläche reflektiert und dann wieder absorbiert; $\frac{\lambda}{l} = h$, T_G =Gerätetemperatur, T_A =Temperatur der absorbierenden Fläche, Index 'l' (hochgestellt)=langwellig, Index 'k' (hochgestellt)=kurzwellig;

Index 'H' = Haube, Index 'A' = Absorberfläche, τ ? Transmission, α = Absorptionsvermögen

- im Gleichgewicht gilt: Gewinn = Verlust

5.5 Ideale 2π -Geräte

5.5.1 Ideale Pyranometer

$$\alpha_A^l = 0, r_A^l = 1; \tau_H^l = 0$$

$$\alpha_A^k = 1, r_A^k = 0, \alpha_H^k = 0$$

im langwelligeren weiß und im kurzwelligen schwarz. $\alpha_a^l \tau_H^l$ = spektrale Empfindlichkeit

$$\rightarrow \Delta T = \frac{K \downarrow}{h}$$

5.5.2 Ideale Pyrgeometer

$$\alpha_a^l = 1, r_A^l = 0, \alpha_H^l = 0$$

$$\alpha_A^k = 0, r_A^k = 1, \alpha_H^k = 0$$

im langwelligeren schwarz und im kurzwelligen weiß

$$\rightarrow \Delta T = \frac{L \downarrow - \sigma T_G^4}{h + 4\sigma T_G^3}$$

5.5.3 Ideale Pyrradiometer

$$\alpha_A^l = 1, r_A^l = 0, \alpha_H^l = 0$$

$$\alpha_A^k = 1, r_A^k = 0, \alpha_H^k = 0$$

langwelligeren und im kurzwelligen schwarz

$$\rightarrow \Delta T = \frac{K \downarrow + L \downarrow - \sigma T_G^4}{h + 4\sigma T_G^3}$$

5.6 Reale Pyrradiometer

(siehe Skript S.105/106)

5.7 Berechnung Strahlungsbilanz

$$\text{Oben: } \Delta T = T_{oben} - T_G = \gamma(K \downarrow + L \downarrow - \sigma T_G^4)$$

$$\text{Unten: } \Delta T = T_{unten} - T_G = \gamma(K \uparrow + L \uparrow - \sigma T_G^4)$$

$$K \downarrow + L \downarrow = \frac{1}{\gamma}(T_{oben} - T_G) + \sigma T_G^4$$

$$\begin{aligned}
K \uparrow + L \uparrow &= \frac{1}{\gamma}(T_{\text{unten}} - T_G) + \sigma T_G^4 \\
Q_0 &= K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \\
&= \frac{1}{\gamma}(T_{\text{oben}} - T_G) + \sigma T_G^4 - \left(\frac{1}{\gamma}(T_{\text{unten}} - T_G) + \sigma T_G^4 \right) = \frac{1}{\gamma}(T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}})
\end{aligned}$$

Thermospannung:

$$Q_0 = \text{Einstr.} - \text{Ausstr.} = \frac{\Delta U}{k_1} - \frac{\Delta U}{k_2} - \sigma T_G^4 + \sigma T_G^4 = \Delta U \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right)$$

5.8 Lambertsches Gesetz

Die Strahlungsleistung eines Strahlers oder Reflektors ist proportional zum Cosinus der Flächenorientierung

Strahlungsstärke= Gesamtenergiemenge in eine Richtung

Wenn Strahlungsstärke J dem Lambert-Gesetz $J = J_0 \cos \vartheta$ folgt, erscheint das Papier immer weiß mit gleicher Intensität

Bei Strahlungsmessgerät genauso: unabhängig von Richtung der Orientierung

$$J \downarrow = J_0 \downarrow \cos \vartheta$$

6 Niederschlagsmessung

Niederschlag entsteht aus der Gasphase in die flüssige Phase umgewandeltem Wasser

- Regen: Wassertropfen, Durchmesser 0,5 bis 6mm
- Sprühregen: Gleichmäßig und dicht fallend, kleine Wassertropfen, Durchmesser 0.05 bis 0,5mm
- Unterkühlter Regen/Sprühregen: Regen bzw. Sprühregen unter 0°C
- Schnee: Einzelne oder aneinander haftende Eiskristalle
- Schneegriesel: Kleine weiße, undurchsichtige Eispartikel
- Reifgraupel: Kleine weiße, undurchsichtige Eispartikel, kugelförmig
- Frostgraupel: Durchscheinende Eispartikel, überwiegend kugelförmig
- Hagel: größere Eispartikel, unterschiedlich in Durchsichtigkeit und Gestalt, Durchmesser 5 bis 50mm

Nach dem zeitlichen Verlauf wird unterschieden zwischen:

- Schauer: Als Quellbewölkung fallender, kurzzeitiger Niederschlag
- Andauernder Niederschlag: Niederschlag ohne Unterbrechung mit unterschiedlichen Intensitätsschwankungen
- Niederschlag mit Unterbrechungen

Kennzeichnende Größe sind Höhe und Dauer des Niederschlags und Intensität $R = \frac{\Delta V}{A \Delta t}$ mit $\Delta V =$ Volumen gesammelten Niederschlags, $A =$ Auffangfläche, $\Delta t =$ Messdauer [Einheit: $\frac{mm}{s}$]

6.1 Niederschlagsmesser nach Hellmann

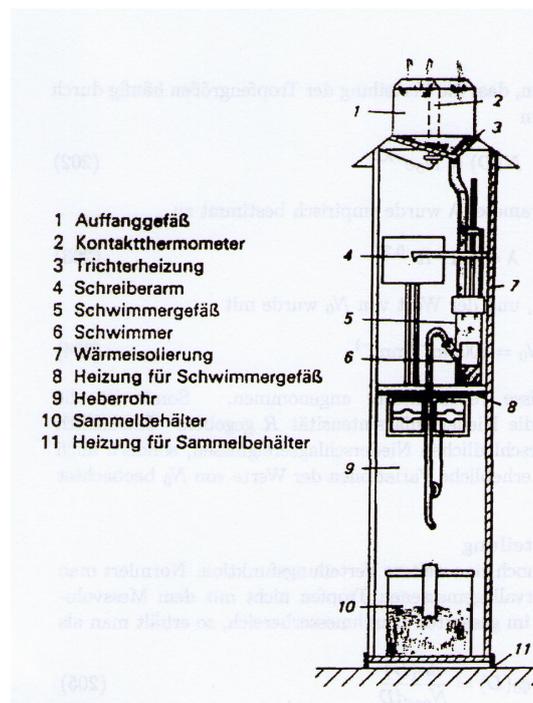


Abbildung 13: Registrierendes Niederschlagsmessgerät mit Schwimmer

6.2 Disdrometer

Bestimmung von Niederschlagsintensität und Tropfenspektrum des Niederschlags

6.2.1 Theoretische Grundlagen

- Mathematische Beschreibung von Tropfengrößenverteilungen
 $N(D) = \frac{dn(D)}{V dD}$ mit $N(D)$ =Anzahldichteverteilung, $dn(D)$ =Tropfenanzahl im Durchmesserintervall $[D - \frac{dD}{2}, D + \frac{dD}{2}]$, D =mittlerer Tropfendurchmesser im Durchmesserintervall dD , V = Messvolumen, dD = Durchmesserintervallbreite
- Marshall-Palmer-Verteilung: $N(D) = N_0 e^{-\lambda D}$ mit $\lambda = 4,1 R^{-0,21}$ und $N_0 = 8000 \frac{1}{m^3 mm}$
- Anzahl-bzw. Massendichteverteilung: Nomierung der Zahl der pro Durchmesserintervall gemessenen Tropfen durch die Tropfenanzahl im gesamten Durchmesserbereich
 \rightarrow Verteilerdichte : $q_0(D) = \frac{dn(D)}{N_{ges} dD}$ mit q_0 = normierte Verteilungsdichte, $dn(D)$ =Tropfenanzahl im Durchmesserintervall, N_{ges} =Gesamttröpfchenanzahl, dD =Durchmesserintervallbreite
 Kumulative Verteilung durch Intergration: $Q_0(D) = \int_{D_{min}}^D q_0(D) dD$
- Weiter Zusammenhänge
 - Tropfenanzahldichte $N = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) dD$
 - Niederschlagsintensität: $R = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) v(D) V(D) dD$
 - Flüssigwassergehalt: $W = \frac{\pi}{6} \rho_{H_2O} \int D^3 N(D) dD$
 - Radarreflektivitätsfaktor: $Z \int D^6 N(D) dD$

$N(D)$ =spektrale Anzahldichteverteilung, D =mittlere Tropfendurchmesser im Durchmesserintervall dD , dD =Durchmesserintervallbreite, $v(D)$ =Tropfenfallgeschwindigkeit
- Fallgeschwindigkeit eines Tropfens Alle auf Tropfen wirkende Kräfte:
 $0 = \vec{F}_s + \vec{F}_a + \vec{F}_r$ mit $\vec{F}_s = \rho_w V g$ =Schwerkraft, $\vec{F}_a = -\rho_L V g$ =Auftriebskraft, $\vec{F}_r = -3\pi D \eta \vec{v}$ =Reibungskraft

6.2.2 Messprinzip des Joss-Waldvogel-Disdrometers

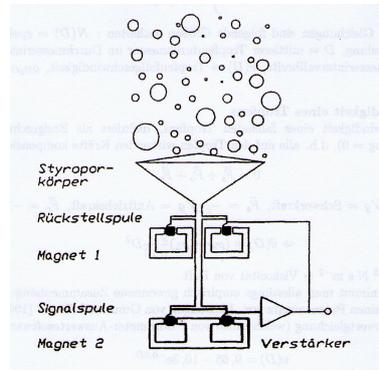


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Disdrometers

Zwei Spulenpaare sind in ein Dauermagnet eingebettet. Trifft Tropfen auf Styroporkörper wird Spannung induziert, die proportional zum Impuls p des Tropfens ist: $p = m\vec{v} = \rho_W V\vec{v} = \rho_W \frac{\pi}{6} D^3 \vec{v}$
Außerdem können Tropfenanzahldichte und Niederschlagsintensität berechnet werden.

6.3 Niederschlagsradar

Ziel:

- Regenrate
- Anzahl der Tropfen
- Bewegungszustand
- Aggregatzustand

Energiereicher Strahl wird von Antenne ausgestrahlt und durch Partikel reflektiert

Radargleichung: $P_e = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ Herleitung siehe Skript S.118/119

7 Aerologie

7.1 Meteorologische Vertikalsondierungen mit Radiosonden

7.1.1 Messungen

- Druckmessung
- Temperatur
- Relative Feuchte

7.1.2 Berechnete Größen

- Geopotenzial in Metern aus Druck und Temperaturmessung, berechnet aus der Barometrischen Höhenformel: $Z_n = Z_0 + \frac{R_d}{g} \bar{T}_v \ln\left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right)$ mit Z_0 =Ausgangshöhe, R_d =Gaskonstante für trockene Luft, $\bar{T}_v = \frac{1}{2}(T_{v,i+1} + T_{v,i})$ =mittl. virtuelle Temperatur zwischen p_i und p_{i+1}
- Virtuelle Temperatur T_v : Temperatur die trockene Luft haben muss, um bei gleichem Druck die gleiche Dichte zu haben wie feuchte Luft: $T_v = T(1 + 0,608q)$ mit q =spezifische Feuchte: $q = \frac{0,622e}{p-0,378e}$
- Sättigungsdampfdruck: Dampfdruck, der sich bei gegebenen Druck und Temperatur höchstens einstellen kann: $e_s = 6,122e^{\left(\frac{17,67T}{T+243,5}\right)} hPa$
T in °C
- Dampfdruck: $e = \frac{e_s RH}{100} hPa$ mit RH=relative Feuchte
- Taupunktstemperatur: $T_d = \frac{(237,3y)-186,527}{8,286-y} C$ mit $y = \log_{10} e^{(\ln(e))}$

7.2 Höhenwindmessung

7.2.1 Pilotballonmethode

Gummiballon mit Wasserstoff gefüllt. Verfolgung durch Ballontheodolit

7.2.2 Radarwindmessung

Ballongespann mit Radargerät, das ausgehende Kurzwellen reflektiert

7.2.3 Radiotheodolitmethode

elektrischer Theodolite, der den Azimutwinkel auch den Höhenwinkel misst

7.3 GPS

Vier Satelliten müssen empfangen werden, um den genauen Ort bestimmen zu können

Vorteile der Verwendung von GPS bei der Höhenwindbestimmung:

- Traditionelle Navigationshilfen sind nicht global einsetzbar
- Traditionelle Navigationshilfen sind empfindlich gegenüber elektrischen Interferenzen, da lange Antennen in der Sonde benötigt werden
- Hohe Genauigkeit