



Zusammenfassung
Meteorologie-Instrumentenpraktikum

LMU München
SS 2003

Datum: 22.06.2005

von Christoph Moder
(© 2003–2005)
<http://www.skriptweb.de>

Hinweise (z.B. auf Fehler) bitte per eMail an mich: cm@skriptweb.de – Vielen Dank.

Inhaltsverzeichnis

Allgemein.....	3
Temperaturmessung.....	4
Abkühlung.....	5
Feuchtemessung.....	6
Verdunstung.....	8
Psychrometer.....	9
Windmessung.....	11
Druckmessung.....	13
Strahlungsmessung.....	16
Thermoelektrische Temperaturmessung.....	18
Widerstandselektrische Temperaturmessung.....	19

Allgemein

- Gesetz des idealen Gases:

$$e = \frac{p}{R_L T}$$

$$R_L = 287 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

- Wärmehaushaltsgleichung:

$$Q + B + L + V = 0$$

mit der Strahlungsbilanz Q , dem Wärmestrom von innen B , dem Strom fühlbarer Wärme von außen L und dem Verdunstungswärmestrom nach außen V

Das Vorzeichen ist positiv, wenn der jeweilige Wärmestrom zur Oberfläche des Körpers hin verläuft.

- Strom fühlbarer Wärme (Energie pro Zeit und Fläche) *von der Luft zur Oberfläche*: proportional zur Temperaturdifferenz;

$$L = -\alpha_L \cdot (\vartheta - \vartheta_L)$$

Proportionalitätskonstante = „**Wärmeübergangskoeffizient**“ α_L , näherungsweise proportional zur Wurzel aus der Windgeschwindigkeit:

$$\alpha_L \propto \sqrt{v}$$

- Verdunstungswärmestrom *von der Oberfläche zur Luft*:

$$V = -\frac{0,623 \cdot r}{p \cdot c_p} \cdot \alpha_L \cdot (E' - e_L)$$

(r : spezifische Verdunstungswärme; c_p : spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck; $R_L/R_w = 0,623$)

- Wärmestrom in den Körper hinein, *von der Oberfläche zur Luft*:

$$B = -\frac{C}{F} \frac{d\vartheta}{dt}$$

d.h. proportional zur Wärmekapazität C , umgekehrt proportional zur Oberfläche F

- Vorzeichenkonvention: Alle Wärmeströme zur Oberfläche eines Körpers hin haben positives Vorzeichen.
- Gradeinteilung: Mathematisch befindet sich 0° rechts und zählt im Gegenuhrzeigersinn; die Meteorologen machen es anders: Die Zählung beginnt bei Norden und läuft im Uhrzeigersinn. Die Einer-Stelle der Gradzahl wird weggelassen: Osten = 09, Norden = 36, Windstille = 00

Temperaturmessung

- Messmethoden:
 - Ausdehnung von Stoffen: Flüssigkeitsthermometer, Gasthermometer, Quecksilberthermometer, Bimetallthermometer
 - Thermospannung
 - elektrischer Widerstand: Metalldraht- und Halbleiterthermometer
- Newtonsches Abkühlungsgesetz:

$$\frac{dT}{dt} = -\lambda \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$
 bzw.

$$\ln \frac{\vartheta - \vartheta_L}{\vartheta_0 - \vartheta_L} = -\lambda t$$
 bzw.

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + (\vartheta_0 - \vartheta_L) \cdot e^{-\lambda t}$$
 mit dem Abklingkoeffizient:

$$\lambda = \alpha_L \cdot F / C$$
- Zeit, die das Thermometer braucht, bis es sich auf $1/e$ der Temperaturdifferenz angepasst hat:

$$\tau = 1/\lambda$$
- Fehler bei der Temperaturmessung:
 - durch große Strahlung (Abhilfe: Hüttenthermometer, gegen Strahlung abgeschirmt)
Strahlungsfehler (erster Summand: direkte und diffuse Solarstrahlung; zweiter Summand: Differenz zwischen einfallender und abgestrahlter terrestrischer Strahlung):

$$Q_s = \varepsilon_s (S + D) + \varepsilon_t (A - \sigma T^4)$$
 - durch kleinen Temperaturübergangskoeffizient (Abhilfe: Aspirationsthermometer, d.h. belüftet)
- Strahlungsfehler:

$$Q = A - F = \sigma T_H^4 - \sigma T^4 \approx \alpha_s (\vartheta_H - \vartheta)$$
 mit dem Strahlungsübergangskoeffizienten $\alpha_s = 4 \sigma T_L^3$

Abkühlung

- **Abkühlungsgröße H** : die pro Zeit und Fläche von der Körperoberfläche abgegebene Energie (d.h. $H=B$); Empfindung „unangenehm kalt“ bei 800 W/m^2 , „heiß“ bei 100 W/m^2 .
- **Katathermometer**: Thermometer, bei dem die Zeit τ gemessen wird, die es zur Abkühlung von $38 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $35 \text{ }^\circ\text{C}$ braucht. **Katawert**: $H=f/\tau$ (f : Instrumentenkonstante)
- **Frigorimeter** (n. Dorno und Thilenius): Geheizte Kupferkugel, die auf $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten wird; aus dem Stromverbrauch und der Oberfläche kann man auf die Abkühlungsgröße schließen.
- **Frigorigraph** (n. Büttner und Pfeleiderer): Ähnlich wie das Frigorimeter; die Heizleistung wird konstant gehalten und die Temperatur wird registriert.

- **Verdunstungswärmestrom**:

$$V=r \cdot W = -\frac{R_L}{R_W} \frac{r}{p c_p} \alpha_L (E - e_L)$$

(W : Wassermenge; $R_L/R_W=0,623$; e_L : Dampfdruck; E : Sättigungsdampfdruck)

- Für einen Zylinder gilt:

$$\alpha_L = \alpha_0 \cdot \sqrt{v/d} \quad \text{mit} \quad \alpha_0 = 3,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K s}^{1/2}$$

Feuchtemessung

- **Wasserdampfdruck** e_L : Partialdruck des Wasserdampfs in der Luft
- **Sättigungsdampfdruck** E_L : eine Funktion der Temperatur, Zusammenhang via Clausius-Clapeyron-Gleichung:

$$\frac{dE}{dT} = \frac{r}{\Delta V T}$$

(ΔV : spezifische Volumenänderung beim Phasenübergang; r : spezifische Phasenübergangswärme)

- Der Sättigungsdampfdruck kann über die empirischen **Magnus-Formeln** berechnet werden. Es gibt sie für Wasser, unterkühltes Wasser und Eis.
- **absolute Luftfeuchtigkeit**: Dichte des Wasserdampfes, d.h. Masse des Wassers pro Volumen Luft.

$$a = 0,795 \cdot \frac{e_L}{1 + 9/273} [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$$

- **spezifische Feuchte** s : Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Gesamtmasse der Luft (d.h. Verhältnis der Dichten):

$$s = \frac{0,623 \cdot e_L}{p - 0,377 \cdot e_L}$$

Im Nenner kann man setzen: $e_L \ll p \Rightarrow e_L := 0$:

$$s = 623 \frac{e_L}{p} [\text{g}/\text{kg}]$$

- **Mischungsverhältnis** m : Ähnlich wie die spezifische Feuchte, aber nicht bezogen auf die Masse der gesamten Luft, sondern nur der wasserdampffreien Luft:

$$m = \frac{0,623 e_L}{p - e_L}$$

- **Sättigungsdefizit** bzw. **Dampfhunger**: Differenz aus Sättigungsdampfdruck und tatsächlichem Dampfdruck.
- **relative Luftfeuchtigkeit** f : Verhältnis aus Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck, d.h.
 $f = e_L / E$
- **relatives Sättigungsdefizit** $(1 - f)$: Sättigungsdefizit pro Sättigungsdampfdruck, bzw. Ergänzung der relativen Luftfeuchtigkeit auf 1.
- Feuchtemessverfahren:
 - **Rüdorffsche Flasche**: Mit einem Trockenmittel wird der Luft Wasserdampf entzogen, d.h. die Druckabnahme ist gleich dem vorher vorhandenen Wasserdampfdruck e_L .
 - **Kondensationshygrometer/Taupunktspiegel**: Eine Oberfläche wird abgekühlt, bis Wasserdampf kondensiert. Die Kondensationstemperatur wird registriert. Wegen latenter Wärme bei der Kondensation bzw. Verdunstung ist die Temperatur, bei der die Kondensation beginnt, niedriger als die, bei der sie wieder verschwindet. Man nimmt den Mittelwert.
 - **Absorptionshygrometer**: Luft wird an stark hygroskopischen Stoffen vorbeigeleitet. Aus deren Gewichtszunahme und dem Volumen der vorbeigeleiteten Luft kann man die Feuchte bestimmen.
 - **Haarhygrometer**: Man nimmt entfettete menschliche Haare, spannt sie ein und registriert

ihre Längenänderungen. Zwischen 0 und 100% Luftfeuchtigkeit verändert sich die Länge der Haare um ca. 2,5%, wobei die Kennlinie nichtlinear ist. Die Haare müssen regelmäßig in gesättigter Luft regeneriert werden.

- **Elektrische Leitfähigkeit:** Dazu wird die Leitfähigkeit von Salzen (z.B. von LiCl) gemessen, die abhängig vom Wassergehalt ist.
Oder: Der hygroskopische Stoff wird geheizt, bis sich Kristalle abscheiden; aus der Temperatur kann der Dampfdruck ermittelt werden.
- **Kapazitätsänderung:** Bei einem Kondensator kann man ausnutzen, dass sich die Kapazität ändert, wenn sich der Feuchtegehalt seines Dielektrikums ändert.

Verdunstung

- Die Verdunstung wird beeinflusst durch: Luftdruck, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Turbulenz der Luft, Temperatur der Oberfläche, Beschaffenheit der Oberfläche
- Die Verdunstung bei einer leblosen Oberfläche heißt **Evaporation**, bei einer Oberfläche eines belebten Objekts heißt sie **Transpiration**. Sind beide Arten vorhanden, spricht man von **Evapotranspiration**.
- **Taupunkt**: Bei dieser Temperatur ist der Sättigungsdampfdruck gleich dem momentan herrschenden Dampfdruck, d.h. ab dieser Temperatur kondensiert die Luftfeuchtigkeit aus. Bei Eis spricht man vom **Reifpunkt**.
- Wassermenge:
$$W = -\omega_Q(Q+B) - \omega_V \alpha_L(1-f)$$
- Messgeräte (**Atmometer** bzw. **Evaporimeter** genannt):
 - Verdunstungskessel, Wildsche Waage: freie Wasserfläche
 - Livingstonesche Verdunstungskugel, Mitscherlich-Evaporimeter: nasse Porzellanoberfläche
 - Leistnerscher Verdunstungsmesser, Piche-Evaporimeter: nasse Mull- bzw. Filterpapieroberfläche
 - Popoff-Lysimeter: Man nimmt ein Stück natürlichen Boden und bestimmt dessen Wasserhaushalt. Die Wasserhaushaltsgleichung lautet:
$$N + W + A + B = 0$$
,
d.h. die Summe aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Versickerung (Vorzeichenkonvention: zur Oberfläche hin = positiv) ist Null.

Psychrometer

- Man misst die Lufttemperatur und Feuchttemperatur, daraus kann man den Dampfdruck und die relative Luftfeuchtigkeit bestimmen
- Sprungsche Psychrometerformel für das ideale Psychrometer (obige Formeln gleichgesetzt, Konstanten zusammen gezogen):

$$e_L = E' - 0,663 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot (\vartheta_L - \vartheta')$$

- Formel für das reale Psychrometer:

$$e_L = E' - \frac{p \cdot c_p}{0,623 \cdot r} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_S + \beta}{\alpha_L} \right) \cdot (\vartheta_L - \vartheta)$$

Beim idealen Psychrometer fällt der vorletzte Faktor (in den Klammern) weg.

- **Äquivalenttemperatur:** Wenn sämtliches Wasser aus der Luft auskondensieren und die freiwerdende Kondensationswärme an die Luft abgegeben würde, hätte die Luft anschließend die Äquivalenttemperatur. Sie entspricht der Lufttemperatur, wenn die relative Luftfeuchtigkeit 0% beträgt (in diesem Fall kann nichts auskondensieren).

$$\vartheta_{\text{ÄL}} = \vartheta_L + \frac{0,623 \cdot r}{p \cdot c_p} e_L$$

- **Feuchttemperatur:** Die Temperatur, die sich durch das dynamische Gleichgewicht aus Verdunstungskälte und aus der Luft nachgelieferter Wärme (d.h. V = L) einstellt. Sie ist gleich der Lufttemperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% (in diesem Fall kann nichts verdunsten).
- Das **ideale Psychrometer** vernachlässigt Fehler durch Strahlung und Wärmeleitung ($Q + B = 0$); das ist beim realen Psychrometer annähernd erfüllt, wenn $v \geq 2 \text{ m s}^{-1}$.
- Um im **realen Psychrometer** die Fehler möglichst klein zu halten, trifft man folgende Maßnahmen:

- Verspiegelung der Oberfläche: reduziert den Strahlungsfehler

(Strahlungsübergangskoeffizient α_S)

$$Q = \sigma T_L^4 - \sigma T^4 = -4 \sigma T_L^3 \cdot (\vartheta - \vartheta_L) = -\alpha_S (\vartheta - \vartheta_L)$$

(Stefan-Boltzmann-Gesetz, mit $T = T_L + (\vartheta - \vartheta_L)$ und abgebrochener Taylor-Entwicklung)

- Ventilation: erhöht die Verdunstung
- dünne Thermometer: geringe Wärmeleitung β durch geringe Querschnittsfläche

$$B = -\beta (\vartheta - \vartheta_L)$$
- Ablauf beim Sinken der Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt:
 - Zuerst kommt es evtl. zu einer Unterkühlung, d.h. die Feuchttemperatur sinkt unter den Gefrierpunkt.
 - Wenn das Wasser gefriert, steigt die Feuchttemperatur bis auf 0 °C und bleibt eine Weile auf diesem Niveau, weil die beim Gefrieren entstehende latente Wärme die Temperatur bis zum Gefrierpunkt erhöht.
 - Wenn das ganze Wasser gefroren ist, zeigt das Feuchtthermometer die Feuchttemperatur - allerdings auf Eis bezogen (geringerer Sättigungsdampfdruck als über Wasser)
 - Nachdem sämtliches Eis verdunstet ist, zeigt das Feuchtthermometer schließlich die Lufttemperatur, weil kein Eis nachgeliefert wird.
- Psychrometer-Bauformen:

- nach August: ein trockenes und ein feuchtes Thermometer (d.h. reales Psychrometer ohne Fehlerkorrektur)
- nach Aßmann: Aspirationspsychrometer, d.h. beide Thermometer belüftet, Strahlungsschutz außen herum (verspiegelte Röhren)
- nach Schubert: Schleuderpsychrometer
- Hüttenpsychrometer, belüftet

Windmessung

- Der Wind ist eine vektorielle Messgröße (d.h. in kartesischen oder polaren Koordinatensystemen anzugeben); obwohl es prinzipiell 3D-Vektoren sind, wird meist die Bewegung in z-Richtung vernachlässigt, da sie recht klein ist (Ausnahme: Gewitterwolken, dort können nennenswerte Aufwinde entstehen). Hat man viele Messstationen, dann kann man die vertikale Luftbewegung mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung berechnen (d.h. wie viel strömt ein, wie viel aus => Differenz muss aufgestiegen sein).
- Neben Richtung/Betrag des Windes ist eine weitere Eigenschaft die Böigkeit, sowohl in Bezug auf die Stärke als auch die Richtung.
- Einheit: Knoten (kt) = Seemeilen pro Stunde (1 sm = 1,852 km = 1 Breiten-Bogenminute auf der Erdoberfläche)
- Messverfahren:
 - Stauwirkung, z.B. **Prandtl'sches Staurohr**: Inneres Rohr ist vorne offen, äußeres Rohr an der Seite. Staudruck = Differenzdruck. Der durch die Strömung entstehende Unterdruck am äußeren Rohr kann vernachlässigt werden (dazu: Löcher ausreichend klein machen), d.h. der dort gemessene Druck entspricht annähernd dem Luftdruck. Staurohre können mit einer Windfahne versehen werden, die sie in Windrichtung drehen. Die Windgeschwindigkeit geht quadratisch in den Luftdruck ein.
 - Markierung der Luft: Der Bodenwind hat häufig eine vollkommen anderer Richtung als der Wind in der Höhe. Letzteren kann man z.B. mit Ballonen messen, die einen Sender enthalten oder per Radar angepeilt werden können. Weiteres Beispiel: Wolken Spiegel
Die Windgeschwindigkeit geht hier linear ein.
 - Abkühlungswirkung: **Hitzdraht-Anemometer** (auf Quarz/Keramik aufgedampfter Metallfilm aus Platin/Wolfram); v.a. zur Messung von Turbulenzen, weil das Hitzdraht-Anemometer eine dafür ausreichend geringe Trägheit besitzt.
Bauform: Konstantstrom- oder Konstanttemperatur-Anemometer; bei letzterem regelt die Brückenspannung automatisch die Versorgungsspannung nach, gemessen wird der Strom; weil keine Temperaturänderung am Draht abgewartet werden muss, reagiert es schneller als das Konstantstrom-Anemometer.
Die Windgeschwindigkeit geht unter der Wurzel in die Abkühlungsgröße ein.
- **Schalenkreuzanemometer**:
 - Kann keine schnellen Windgeschwindigkeitsänderungen erfassen, da es eine gewisse Massenträgheit besitzt. Weil beim Absinken der Windgeschwindigkeit lediglich die Luftreibung (und zwar nur um die Geschwindigkeitsdifferenz) das Anemometer bremst, beim Ansteigen der Windstärke aber zusätzliche Energie zugeführt wird, ist die gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit zu hoch (umso mehr, je böiger der Wind ist).
 - Schalenkreuzanemometer sind speziell bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ungenau, weil dann die Reibung nicht vernachlässigbar ist - speziell die Haftreibung beim Anlaufen des Anemometers.
 - Funktionsweise: Zwischen gegenüberliegenden Schalen herrscht ein Drehmomentgleichgewicht; das Drehmoment wird durch Staudruck, Schalenquerschnittsfläche sowie Hebelarm bestimmt. Unterschiedlich ist nur der c_w -Wert sowie die Differenzgeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit (einmal Summe aus Bahn- und Windgeschwindigkeit, einmal Differenz). Die Bahngeschwindigkeit und damit die Rotationsfrequenz ist proportional zur Windgeschwindigkeit; die Proportionalitätskonstante beinhaltet die c_w -Werte der beiden Schalen

(typischerweise hat die konkave Schale einen fünfmal so großen Luftwiderstand wie die konvexe).

$$f_1 r \frac{1}{2} \rho_L (v-u)^2 = f_2 r \frac{1}{2} \rho_L (v+u)^2$$

Bahngeschwindigkeit: $u = 2 \pi r \cdot v$

- Die Windgeschwindigkeit geht linear in die Rotationsfrequenz ein.

- Praxisansatz für Reibung:

$$v = a + b u$$

(a : Anlaufgeschwindigkeit)

- **Flügelradwindmesser:** Mit windmühlenartigen Flügeln. Muss in den Wind gedreht werden, braucht daher eine Windfahne, aber reagiert sensibler auf leichte Windstärken (weil der Wind alle Flügel antreibt, statt jeweils bei der Hälfte der Umdrehung zu bremsen).

- **Ultraschall**

- Windweg: Weg, den ein Luftquantum zurücklegen muss, damit sich das Anemometer N -mal dreht.

$$w = N \cdot v / f$$

- Windmessung ohne Messgerät: Anhand von Beobachtungen der Natur. Beispielsweise definiert die Beaufort-Skala die Windstärken mit Hilfe von Erscheinungen auf dem Land (z.B. „Rauch steigt gerade auf“, „Wind behindert beim Gehen“) bzw. auf dem Meer („Schaumkronen auf den Wellen“).

- Bernoulli-Gleichung: Gibt den Staudruck an. Man kann sie aus der Gleichung für eine statische Strömung in einem Rohr herleiten.

$$p_s = 0,5 \cdot \rho_L \cdot v^2$$

Druckmessung

- Druckeinheit: heute Hektopascal (hPa = 100 Pa = 100 N/m²); früher Torr (benannt nach Evangelista Torricelli), d.h. 1 Torr = 1 Millimeter Quecksilbersäule (mmHg) bei 0°C und Normalschwere (45° Breite, Meeresniveau)
Umrechnung: 1 Torr = 1,3332 hPa
- Flüssigkeitsbarometer:
 - Aufbau: U-Rohr, mit Flüssigkeit gefüllt, an einem Ende ohne Luftblase verschlossen. Das Aussehen kann aber variieren, d.h. wenn ein oben verschlossenes Rohr in einem offenen Flüssigkeitsbehälter steht, ist es letztendlich auch wie ein U-Rohr.
 - Abgelesen werden muss die Höhendifferenz zwischen beiden Schenkeln; meist hat der offene Schenkel einen deutlich größeren Durchmesser als der geschlossene Schenkel, so dass die Höhe der Säule im geschlossenen Schenkel annähernd gleich der Höhendifferenz zwischen den Schenkeln ist. Entsprechend wird am geschlossenen Schenkel eine Skala mit reduzierter Teilung aufgetragen, damit man nur dieses Quecksilberniveau ablesen muss und aus den Skalenwerten gleich die Höhendifferenz erhält.
Beispiel: Ist das Verhältnis der Querschnittsflächen 1:50, so haben die Skalenstriche, die einen Höhenunterschied von 1 mm angeben, den Abstand 0,98 mm voneinander.
 - Barometerformel:
$$p = \rho \cdot g \cdot h$$
Die Höhe der Flüssigkeitssäule ist unabhängig vom Rohrdurchmesser, weil sich in $p = F/A$, $F = m \cdot g$, $m = \rho \cdot V$ die Grundfläche und damit der Durchmesser herauskürzt.
 - Quecksilberbarometer: Im Gegensatz zu Wasser hat Quecksilber eine viel höhere Dichte (d.h. kleinere Bauform möglich), außerdem ist es frostsicher (bei einem Wasserbarometer müsste eine 10 m hohe Wassersäule geheizt werden) und verdunstet nicht nennenswert.
 - Die Verdunstung ist bei anderen Flüssigkeiten aber nur insofern ein Problem, weil immer wieder nachgefüllt werden muss. Wegen des prinzipiellen Aufbaus als U-Rohr beeinflusst die Verdunstung aber nicht die Messung, weil der Höhenunterschied zwischen beiden Schenkeln immer gleich bleibt, unabhängig von deren absoluten Höhen (d.h. wenn etwas aus dem offenen Schenkel verdunstet, strömt aus dem geschlossenen Schenkel so viel nach, bis der Gewichtsverlust ausgeglichen ist).
 - Fehlerkorrektur: Die Dichte des Quecksilbers ist temperaturabhängig, d.h. der Korrekturfaktor lautet:
$$\frac{\rho}{\rho_n} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \vartheta_{Hg}}$$
Nicht nur das Quecksilber, sondern auch der Ablesemaßstab dehnt sich mit der Temperatur aus, d.h. man muss die Differenz der beiden thermischen Ausdehnungskoeffizienten α einsetzen.
Die Erdbeschleunigung in Abhängigkeit von der geographischen Breite und Höhe über NN lautet:
$$\frac{g}{g_n} = 1 - 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\varphi) - 1,96 \cdot 10^{-7} \cdot z$$
 - Ablesung: Immer den Stand der Mitte der Flüssigkeitssäule ablesen, d.h. bei einem Quecksilberbarometer die Obergrenze des Meniskus. Bei neuen Barometern ist der Meniskus stark ausgeprägt; er wird umso flacher, je älter das Barometer ist.
- Dosenbarometer (Vidie-Dose): Der Luftdruck drückt eine weitgehend evakuierte Dose zusammen; diese mechanische Deformation wird über ein Hebelsystem auf den Zeiger

übertragen bzw. über Piezokristalle elektronisch umgesetzt. Die Anordnung mehrerer Dosen zu einer Dosenbatterie liefert eine größere mechanische Deformation. In der Dose muss ein Unterdruck herrschen, damit eine Druckdifferenz zum äußeren Luftdruck entsteht, die eine Kraft bewirkt. Allerdings wird kein Hochvakuum verwendet - nicht nur, weil es technisch schwierig wäre. Durch Wärme dehnt sich die Dose aus, ebenso das Gas im Inneren; weil die Ausdehnung des Gases eine Erhöhung des Innendrucks, die Ausdehnung der Dose aber dessen Senkung bewirkt, kann man das Barometer so bauen, dass sich diese Effekte im normalen Temperaturbereich annähernd kompensieren.

- Siedethermometer (**Hypsometer**): Nutzt aus, dass der Siedepunkt mit abnehmendem Luftdruck sinkt. Zusammenhang aber nichtlinear. Nötig ist dazu ein Thermometer, das im Bereich $98^\circ\text{C} - 102^\circ\text{C}$ empfindlich misst.
- Druckdarstellung in der Wetterkarte:
 - In den Karten wird der auf NN reduzierte Luftdruck statt des tatsächlichen Drucks am Boden angegeben, um die Drücke vergleichen zu können. Dazu nimmt man an, dass sich unter der Bodenluft eine Luftschicht mit einer mittleren Temperatur (s. Formel unten, Temperaturen in K) und einem mittleren Druck (Differenzdruck aus der barometrischen Höhenformel, unter Verwendung der mittleren Temperatur) befindet.

$$T_m = (T_0 + (-0,0065^\circ\text{C}) \cdot z) / 2$$
 - Angegeben werden nur die letzten vier Ziffern: 0126 = 1012,6 hPa
 - Isobaren verbinden Orte gleichen Luftdrucks, sie werden alle 5 hPa gezeichnet.
 - Topographie: Wenn man nicht die Drücke in einer bestimmten Höhe, sondern die Höhen eines Luftdruckwerts zeichnet, nennt man das Topographie. Bezieht sich die Höhe auf NN, ist es eine absolute, ansonsten eine relative Topographie.
 - Nicht nur die Höhe, sondern auch die Stärke der Gravitation bestimmt die Kraft auf die Luftmoleküle. Daher darf in der Topographie nicht die geometrische Höhe gezeichnet werden, sondern das Geopotenzial (Produkt aus Höhe und der jeweiligen ortsabhängigen Erdbeschleunigung). Die Bewegung von Luft auf einer Fläche gleichen Geopotenzials erfordert keine Arbeit. Einheit ist der „geopotenzielle Meter“ gpm ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}^2$).
 - In einer Topographie ist der Abstand zweier Druckflächen nur eine Funktion der mittleren Temperatur zwischen ihnen, und damit der Wind proportional zum Abstand der Isopotenzialen.
- Herleitung der barometrischen Höhenformel: Die Formel

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$
 nach der Höhe ableiten ($(dp)/(dh) = \rho \cdot g$), für die Dichte das Gasgesetz einsetzen (in der Form, in der das Volumen durch die Dichte ausgedrückt ist: $\rho = p/(R \cdot T)$), anschließend integrieren (über $(1/p) dp$) und Logarithmus durch Exponentialfunktion ausdrücken:

$$p = p_0 \cdot e^{-(g \cdot z)/(R \cdot T)}$$
 Faustregel: Pro 5 km Höhenzunahme halbiert sich der Luftdruck, pro 10 m reduziert er sich in Bodennähe um 1,2 hPa.
- Die Feuchteverteilung beeinflusst die Luftdichte, da Wasserdampf leichter ist als trockene Luft. D.h. korrekterweise muss man in die barometrische Höhenformel die virtuelle Temperatur einsetzen (in Abhängigkeit von der spez. Feuchte):

$$T_v = (1 + 0,604 \cdot s) \cdot T$$

Strahlungsmessung

- Arten von solarer Strahlung (kurzwellig, sichtbarer Bereich + Infrarotbereich: 300–3000 nm):
 - direkte Sonnenstrahlung S
 - diffuse Himmelsstrahlung D
 - Globalstrahlung $G=S+D$: Summe aus direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung
 - reflektierte Globalstrahlung R
Albedo: Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Globalstrahlung: $a=R/G$
 - solare Strahlungsbilanz Q_s : die Bilanz aus den obigen Größen
- Arten von terrestrischer Strahlung (langwellig, tiefer Infrarotbereich: 4–60 μm):
 - atmosphärische Gegenstrahlung A : von Luft und Wolken emittierte Strahlung
 - Ausstrahlung der Erdoberfläche E
 - reflektierte Gegenstrahlung r : Wenn man den Erdboden als schwarzen Körper ansehen kann, wird sämtliche atmosphärische Gegenstrahlung absorbiert. Wenn das nicht der Fall ist, wird ein Teil r reflektiert.
 - terrestrische Strahlungsbilanz Q_t : die Bilanz aus den obigen Größen
- Der IR-Bereich beinhaltet ca. 50% der solaren Strahlungsleistung, der UV-Bereich ca. 5%, der Rest liegt im sichtbaren Spektrum.
- Licht ist Strahlung, die zur Messung mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges (maximal bei 555 nm) gewichtet wird => Einheit: Lux (bei 555 nm: $1 \text{ lx} = 1,47 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$).
Tageslichtfaktor: Umrechnung Strahlungsflussdichte in Lux bei Tageslicht
 $f = 100 \text{ lx} / (\text{W m}^{-2})$
Meteorologen interessiert in der Regel nicht das Licht, sondern die Strahlung, d.h. nicht die Farbe, sondern die gesamte Energiemenge, über den ganzen Wellenlängenbereich integriert.
- Die auf der Erdoberfläche auftreffende Sonnenstrahlung kann auch höher als die von der Sonne gelieferten 1367 W/m^2 sein - nämlich dann, wenn sowohl direkte Sonnenstrahlung vorhanden ist, als auch Strahlung von benachbarten Wolken, die die Sonnenstrahlen streuen.
- Kulisseneffekt: Hoch aufragende Wolken verdecken sich, vom Beobachtungspunkt aus gesehen, gegenseitig. Während die Wolken Lücken aufweisen, durch die Sonnenstrahlung auf den Erdboden gelangt, sieht man vom Beobachtungspunkt diese Lücken nicht und empfindet daher eine viel größere Wolkenbedeckung als in Realität.
- Strahlungsmessgeräte:
 - **Pyrheliometer:** misst die direkte Sonnenstrahlung, d.h. kleiner Öffnungswinkel
 - **Pyranometer:** misst die Strahlung aus dem Halbraum auf eine ebene Fläche; die Kombination zweier solcher Geräte (nach oben und nach unten) heißt **Albedometer**.
 - **Pyrradiometer:** Wie Pyranometer, aber misst neben der solaren auch die terrestrische Strahlung.
 - **Pyrgeometer:** Wie Pyranometer, aber misst die terrestrische Strahlung.
 - Messung der Sonnenscheindauer: Sonnenscheinautograph nach Campbell-Stokes
 - UV-Messung: Umwandlung der Strahlung in sichtbares Licht mittels Fluoreszenz

- **UV-Index:** Erythem-gewichtete UV-Strahlungsflussdichte

Thermoelektrische Temperaturmessung

- Unterschiede zum widerstandselektrischen Verfahren:
 - keine Spannungsversorgung nötig (nur Ausschlagsmethode)
 - kann nur Differenztemperatur messen, hat immer zwei Messpunkte (da ein Drahtstück nunmal zwei Enden hat)
- Vorteile:
 - kann sehr kompakt gebaut werden, z.B. zur Messung an schwer zugänglichen Stellen (etwa im Inneren eines Blatts bei der Untersuchung eines Baums)
 - ist technisch simpel, kann einfach automatisiert ausgelesen werden
 - hat eine sehr geringe Trägheit, d.h. Messungen können schnell hintereinander erfolgen, viele Sensoren können quasi gleichzeitig abgefragt werden
- Nachteile:
 - man kann nichts direkt ablesen (wie beim Flüssigkeitsthermometer), sondern braucht eine Messelektronik dafür
 - es gibt nicht nur Kontaktspannungen zwischen den Zuleitungen und dem Messdraht, sondern auch z.B. an den Widerständen usw., die auch alle temperaturabhängig sind
 - man braucht immer eine Referenztemperatur
 - Alterung von Lötstellen ist ein Problem
- Fehlerkompensation:
 - Ausschlagsmethode: Dazu installiert man in den Zuleitungen Widerstände, die deutlich höher sind als die Widerstände der Zuleitungen, und kann dann letztere vernachlässigen. Gemessen wird die Spannung.
Diese Methode liefert die exakteren Ergebnisse.
 - Kompensationsmethode: Hier legt man eine Gleichspannung an, die man mit einer Potentiometerschaltung so regelt, dass sie gleich der Thermospannung ist (mit Nullgalvanometer überprüfbar). Weil dann kein Strom mehr fließt, spielen Leitungswiderstände keine Rolle mehr. Zur Thermospannung proportional ist der Kompensatorstrom durch den Spannungsteiler, den man beliebig hoch machen und somit beliebig fein auflösende Messgeräte verwenden kann.
Nachteile dieser Methode: Man muss die Schaltung abgleichen, man braucht eine Versorgungsspannung, die Schaltung ist aufwändiger.
- Thermospannung: in der Größenordnung von 5 mV/100 K (aber Zusammenhang nichtlinear)
- Vergleichslötstelle: Typischerweise in einem trägen Metallklotz, der isoliert ist; in Freilandversuchen wird sie im Boden eingegraben.
- Thermobatterien: mehrere Thermoelemente hintereinander geschaltet, zur Verbesserung der Messgenauigkeit; begrenzende Faktoren sind die Wärmeleitung im Draht sowie die zunehmenden Leitungswiderstände

Widerstandselektrische Temperaturmessung

- Metalldrahtwiderstände:
 - Widerstand nimmt mit zunehmender Temperatur linear zu, Temperaturkoeffizient ist positiv:
 $R = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$
 - Legierungen haben einen deutlich niedrigeren Widerstand als reine Metalle.
 - Aufbau: Draht auf Glas aufgewickelt und eingeschmolzen, oder auch frei gespannte Drähte. Material typischerweise Platin (korrosionsbeständig, d.h. verändert seine Charakteristik nicht).
- Thermistoren (NTC „negative temperature coefficient“)
 - Heißleiter, d.h. Widerstand nimmt mit zunehmender Temperatur ab (exponentiell), Temperaturkoeffizient ist negativ:
 $R = R_0 \cdot e^{b \cdot (1/T - 1/T_0)}$
 $a = -b/T^2$
 - großer Widerstand, d.h. Leitungswiderstände spielen keine Rolle