

## Taupunktmessung (T6)

### Ziel des Versuches

In diesem Versuch soll der Taupunkt bestimmt und daraus die absolute und relative Luftfeuchtigkeit berechnet werden. Ziel dieses Versuches ist nicht nur die eigentliche Messung und Auswertung – die recht schnell geht –, sondern auch der selbstständige Aufbau der Messapparatur, wobei die bereits erworbenen Kenntnisse aus der Optik und Elektrik angewendet werden müssen.

### Theoretischer Hintergrund

Ein Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft ist die *absolute Luftfeuchtigkeit*

$$f = m_D / V = \rho_D. \quad (1)$$

Sie gibt an, welche Masse Wasserdampf  $m_D$  in einem bestimmten Luftvolumen  $V$  enthalten ist, und ist damit gleich der Dichte  $\rho_D$  des Wasserdampfes in der Luft. Da der Sättigungsdampfdruck  $p_D$  des Wasserdampfes in der Luft eine Funktion der Temperatur ist, kann die absolute Luftfeuchtigkeit bei vorgegebener Lufttemperatur  $T$  (in Kelvin) einen bestimmten, charakteristischen Wert nicht überschreiten. Dieser Wert ist die *maximale Luftfeuchtigkeit*  $f_m(T)$ , also die maximal mögliche Dichte des Wasserdampfes in der Luft. Mit steigender Temperatur wächst die Fähigkeit der Luft Wasserdampf aufzunehmen. Da die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes  $p_D(T)$  einem recht komplizierten Zusammenhang folgt, der sich aus der Clausius-Clayperon-Gleichung ableiten lässt, sind die Werte für den im Versuch relevanten Temperaturbereich im Anhang tabelliert. Aus der Kenntnis des Sättigungsdampfdruckes  $p_D$  bei einer bestimmten Temperatur kann man sofort mit Hilfe der Gasgleichung<sup>1</sup>

$$p_D V = f_m V R_S T$$

die maximale Luftfeuchtigkeit

$$f_m = \frac{p_D}{R_S T} \quad (2)$$

für diese Temperatur berechnen.

Die *relative Luftfeuchtigkeit*

$$\varphi_T = f / f_m(T) \quad (3)$$

ist das Verhältnis der bei einer bestimmten Temperatur  $T$  vorhandenen absoluten Luftfeuchtigkeit  $f$  zur maximalen Luftfeuchtigkeit  $f_m(T)$ .

<sup>1</sup>  $R_S$  von Wasserdampf =  $462 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

Die Kenntnis der absoluten und relativen Luftfeuchtigkeit ist wichtig für die Meteorologie, aber auch für viele Industriezweige. In der freien Atmosphäre finden häufig sehr schnelle Temperaturwechsel statt. Da die Wiedereinstellung eines Gleichgewichtes durch die Diffusion von Wasserdampf in der Luft einige Zeit benötigt, wird in der freien Atmosphäre die Sättigung entweder selten erreicht oder es tritt nach schneller örtlicher Abkühlung sogar Übersättigung auf.

Apparate zur Messung der Luftfeuchtigkeit nennt man *Hygrometer*. Im Versuch soll die Messung der absoluten Luftfeuchtigkeit mit einem Taupunkthygrometer durchgeführt werden. Wenn die Luft nicht mit Wasserdampf gesättigt ist, bleibt bei einer Abkühlung die absolute Luftfeuchtigkeit  $f$  zunächst unverändert. Wird beim weiteren Abkühlen eine Temperatur  $\tau$  (in Kelvin!) erreicht, bei der absolute und maximale Luftfeuchtigkeit gleich sind, so kondensiert der überschüssige Wasserdampf. Diese Temperatur nennt man Taupunkt. Es gilt also  $f \approx f_m(\tau)$ .

Allerdings ist noch eine kleine Korrektur notwendig: Da die Abkühlung bei konstantem Druck  $p = p_T = p_\tau$  stattfindet und dies mit einer Volumenabnahme verbunden ist, wird sowohl die Dichte der abgekühlten Luft  $\rho_{\text{Luft}}$  als auch die Dichte des Wasserdampfes  $f$  zunehmen. Die Masse des Wasserdampfes  $m_D$  ändert sich jedoch beim Abkühlen von  $T$  auf  $\tau$  nicht, d. h. es gilt  $m_D = f_T V_T = f_m(\tau) V_\tau$ . Aus den Zustandsgleichungen

$$pV_T = f_T V_T R_S T \quad (4)$$

und

$$pV_\tau = f_m(\tau) V_\tau R_S \tau \quad (5)$$

ergibt sich dann die Korrekturformel:

$$f_T = f_m(\tau) \frac{\tau}{T} \quad (6)$$

Die am Taupunkt  $\tau$  vorhandene maximale Luftfeuchtigkeit  $f_m(\tau)$  muss also zu kleineren Werten hin korrigiert werden, um daraus die absolute Luftfeuchtigkeit  $f_T$  bei der Temperatur  $T$  zu erhalten.

### *Versuchsaufbau- und durchführung*

Die Messung des Taupunktes erfolgt mit Hilfe eines optischen Aufbaus. Ein Spiegel wird definiert abgekühlt und beschlägt beim Erreichen des Taupunktes, dadurch wird das einfallende Licht gestreut und gelangt nicht mehr zum im Strahlengang befindlichen Detektor. Die Spiegelrückseite befindet sich in gutem Wärmekontakt mit einem Peltierelement, mit dessen Hilfe der Spiegel abgekühlt wird. Ein Peltierelement ist die Umkehrung eines Thermoelementes (siehe Versuch T5). Beim Thermoelement entsteht eine Thermospannung, wenn sich die zwei Verbindungsstellen der beiden unterschiedlichen Metalle auf verschiedenen Temperaturen befinden. Hält man bei einem solchen Element eine Verbindungsstelle auf konstanter (z. B. Raum-) Temperatur und legt man eine äußere Spannung an, so kühlt oder erwärmt sich die andere Verbindungsstelle je nach Stromrichtung. Mit Hilfe von Peltierelementen kann man Abkühlungen von bis zu 30 K unter die Referenztemperatur erreichen. Ein bekanntes Einsatzgebiet sind Campingkühlboxen. In unse-

rem Fall ist die Referenztemperatur die Raumtemperatur, die durch den Metallblock mit großer Oberfläche (auf der Rückseite des Spiegelhalters) dem Peltierelement zur Verfügung gestellt wird. Am Spiegel befindet sich zusätzlich ein Temperatursensor in Form eines Dünnschicht-Platinwiderstands (PT1000), der bei 273 K einen Widerstand von  $1000\ \Omega$  sowie einen linearen Temperaturkoeffizienten von  $3,85\ \Omega/\text{K}$  besitzt.

### *Geräteliste*

Folgende Geräte stehen Ihnen für den Aufbau des Versuches zur Verfügung:

- Netzgerät – 2 mal 30 V/2,5 A
- Taster als Schalter für Peltierelement
- Spiegel mit eingebautem Peltierelement und Temperatursensor PT1000
- zwei Multimeter
- Steckbrett, Brücken für das Steckbrett, Potentiometer  $100\ \Omega$ , Widerstand  $1\ \text{k}\Omega$  zur Realisierung der Schaltung für den Temperatursensor
- Laborkabel
- Reuterlampe mit Kondensator, Lochblende und Netzgerät
- Linse 10 cm Brennweite mit Halter
- vier optische Reiter
- zwei optische Bänke
- Solarzelle als Photodetektor
- Computer mit CASSY-Interface
- Hygro/Thermometer zur Kontrolle Ihrer Ergebnisse (systematischer Restfehler  $\pm 3\ \%$ )

### *Optischer Aufbau*

Es ist folgender Strahlengang aufzubauen: Die von der Reuterlampe beleuchtete Lochblende ist über den Spiegel (Einfallswinkel am Spiegel etwa zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$ ) mit Hilfe einer Linse auf den Photodetektor (Solarzelle) abzubilden. Dabei ist der Spiegel möglichst großflächig auszuleuchten, da er beim Abkühlen nicht immer gleichmäßig beschlägt. Ein gutes Ergebnis ergibt sich, wenn Sie die Glühwendel der Lampe scharf auf den Spiegel (wegen der Erwärmung nicht auf den PT1000) und die Lochblende scharf auf den Photodetektor abbilden. Das erreichen Sie, wenn Sie die Linse zwischen Spiegel und Detektor anordnen. Schalten Sie die Reuterlampe mindestens 15 min vor der Messung ein, erst dann läuft sie stabil. Die Detektorspannung muss unterhalb der Sättigungsspannung von 0,5 V liegen (Kontrolle mit Multimeter).

Der Spiegel ist vor der Messung mit Alkohol zu säubern. Bitte berühren Sie den Spiegel nicht mit den Fingern, da Fettreste das Beschlagen verhindern. Kontrollieren Sie mit dem Multimeter, ob beim Anhauchen des Spiegels die Spannung am Photodetektor sichtbar abfällt. Erst jetzt schließen Sie den Photodetektor an den CASSY-Eingang UA1 an.

### *Anschluss des Temperatursensors*

Der Temperatursensor ist ein Platin-Dünnschichtwiderstand PT1000, der seinen Widerstandswert definiert mit der Temperatur ändert. Um den Widerstandswert zu messen, muss durch den Widerstand ein Strom fließen. Dieser Strom muss jedoch so klein sein, dass er keine merkbare Erwärmung des Widerstands hervorruft. Also darf man nur eine relativ kleine Spannung, hier 0,3 V, anlegen. Da mit dem Netzgerät eine so kleine Spannung nicht exakt genug einstellbar ist, bedienen wir uns einer Spannungsteilerschaltung mit einem Potentiometer. Gemäß Abb. 1 wird am Netzgerät eine Spannung von 3 bis 4 V eingestellt. Mit einem Potentiometer wird die Spannung auf  $U_{\text{Poti}} = (0,6 \pm 0,05) \text{ V}$  eingestellt und *ständig* mit einem Multimeter kontrolliert. Der Temperatursensor PT1000 und ein Widerstand  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  werden in Reihe an die Spannung  $U_{\text{Poti}}$  angeschlossen. Der Spannungsabfall am  $1 \text{ k}\Omega$ -Widerstand wird nun mit dem CASSY-Eingang UB1 gemessen und wird im Folgenden auch mit  $U_{\text{B1}}$  bezeichnet.

Da eine Reihenschaltung von PT1000 und dem Widerstand  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  vorliegt, fließt immer der gleiche Strom durch beide Widerstände. Somit ergibt sich der Strom  $I_{\text{PT1000}}$  durch den Sensor auch aus der Spannung  $U_{\text{B1}}$  wie folgt

$$I_{\text{PT1000}} = \frac{U_{\text{B1}}}{R_1} \quad .$$

Da nach dem Maschensatz  $U_{\text{PT1000}} = U_{\text{Poti}} - U_{\text{B1}}$  gilt, kann der Widerstand des Temperatursensors PT1000 nach dem ohmschen Gesetz berechnet werden zu

$$R_{\text{PT1000}} = \frac{U_{\text{PT1000}}}{I_{\text{PT1000}}} = \frac{U_{\text{Poti}} - U_{\text{B1}}}{\frac{U_{\text{B1}}}{R_1}} \quad . \quad (7)$$

Da der Temperatursensor PT1000 bei 273 K einen Widerstandswert von  $1000 \Omega$  und einen Temperaturkoeffizienten von  $3,85 \Omega/\text{K}$  hat, kann man die Temperatur  $T$  des Spiegels nun wie folgt ermitteln:

$$T = 273 \text{ K} + \frac{R_{\text{PT1000}}(T) - R_{\text{PT1000}}(273 \text{ K})}{3,85 \frac{\Omega}{\text{K}}} \quad . \quad (8)$$

Vergleichen Sie die vom CASSY angezeigte Temperatur mit der vom Hygro/Thermometer und kompensieren Sie gegebenenfalls den Offset. Als Hilfe bei der Eingabe der Formeln (7) und (8) in CASSY nutzen Sie bitte auch die Anleitung, die am Versuchsplatz ausliegt. Die Konstanz der Spannung  $U_{\text{Poti}}$  ist während der Messung öfter zu kontrollieren.

### *Anschluss des Peltierelementes*

Das Peltierelement soll mit einem konstanten Strom von 2 bis 2,5 A und nur kurzzeitig betrieben werden. Kurzzeitig deshalb, da beim Stromfluss immer joulesche Wärme entsteht und der Metallblock (auf der Rückseite des

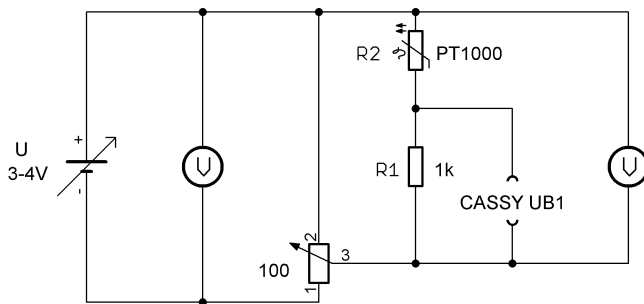


Abbildung 1: Schaltung für den Temperatursensor PT1000

Spiegelhalters) die Referenztemperatur (Raumtemperatur) nicht über längere Zeit halten kann. Das Stromversorgungsgerät verfügt über zwei Regler: einen Regler zur Einstellung der Spannung und einen zur Einstellung der Strombegrenzung. Um einen konstanten Strom einzustellen, schließt man die Spannungsquelle z. B. mit einem Laborkabel kurz, stellt die Spannung auf Maximum und regelt den Strom auf den gewünschten Wert. Dann entfernt man das kurzschließende Kabel und schließt gemäß Abb. 2 das Peltierelement über den Taster, der als Schalter fungiert, an. Nur bei gedrücktem Taster soll der Stromkreis über das Peltierelement geschlossen sein.

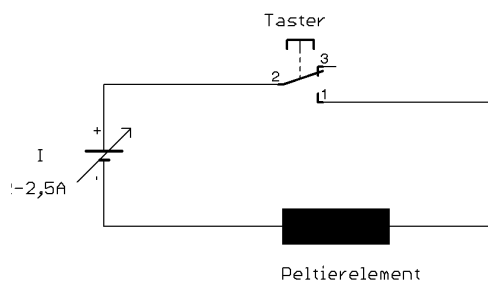


Abbildung 2: Anschluss des Peltierelementes

### Aufgabenstellung

1. Bauen Sie den optischen Strahlengang auf und überprüfen Sie die Empfindlichkeit Ihres Aufbaus (Änderung der Sensorspannung beim Anhauchen des Spiegels).
2. Bauen Sie die Schaltung für den Temperatursensor auf. Geben Sie die entsprechenden Formeln in CASSY ein und kalibrieren Sie den Sensor (Raumtemperatur).
3. Schließen Sie das Peltierelement an (Betrieb mit Konstantstrom 2 bis 2,5 A und über den Morsetaster als Schalter). Schalten Sie das Peltierelement erst ein, nachdem Sie den Temperatursensor kalibriert haben, da sonst der Metallblock keine Raumtemperatur mehr hat.
4. Führen Sie die Messung des Taupunktes durch. Stellen Sie dazu sowohl die aus  $U_{B1}$  berechnete Temperatur des Spiegels als auch das Photodetektorsignal  $U_{A1}$  über der Zeit  $t$  in einem Diagramm dar. Starten Sie die CASSY-Messung und nehmen Sie 10 bis 20 Sekunden beide Signale bei Raumtemperatur auf, bevor Sie dann das Peltierelement für ebenfalls

10 bis 20 Sekunden einschalten. Beim Beschlagen des Spiegels fällt das Sensorsignal ab. Der Zeitpunkt, bei dem der Taupunkt erreicht wurde, ist durch grafische Extrapolation zu bestimmen. Dazu wird das zeitliche Verhalten des Photodetektorsignals bei Raumtemperatur und bei fallender Temperatur des Spiegels jeweils durch Geraden grafisch angepasst und der Schnittpunkt beider Geraden ermittelt. Aus dem Schnittpunkt ergibt sich der genaue Zeitpunkt des Beschlagens des Spiegels. Da mittels  $U_{B1}$  auch der zeitliche Temperaturverlauf am Spiegel registriert wurde, ist der Taupunkt  $\tau$  bestimmbar.

5. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit denen der anderen Gruppen und beziehen Sie deren Ergebnisse zur Größtfehlerabschätzung mit ein.
6. Berechnen Sie aus dem ermittelten Taupunkt  $\tau$  die absolute und relative Luftfeuchtigkeit bei der Raumtemperatur  $T$  unter Berücksichtigung der Korrektur nach Gl. (6). Die Werte  $f_m(T)$  und  $f_m(\tau)$  können Sie mit Gl. (2) unter Nutzung der im Anhang tabellierten  $p_D$ -Werte berechnen. Die Tabellenwerte sind linear zu interpolieren.
7. Bringen Sie Ihren Versuchsplatz wieder in den Ausgangszustand.

### Anhang

Tabelle: Sättigungsdampfdruck  $p_D$  des Wasserdampfes in der Luft

$T$ in K	$p_D$ in hPa	$T$ in K	$p_D$ in hPa	$T$ in K	$p_D$ in hPa	$T$ in K	$p_D$ in hPa
273	6,12	283	12,28	293	23,39	303	42,47
274	6,57	284	13,13	294	24,88	304	44,97
275	7,06	285	14,03	295	26,45	305	47,60
276	7,58	286	14,98	296	28,11	306	50,35
277	8,14	287	15,99	297	29,86	307	53,25
278	8,73	288	17,06	298	31,70	308	56,29
279	9,35	289	18,19	299	33,64	309	59,48
280	10,02	290	19,38	300	35,68	310	62,82
281	10,73	291	20,65	301	37,83	311	66,33
282	11,48	292	21,98	302	40,09	312	70,00