

Klimafragen, Kapitel 5: Luftfeuchte, Feuchtegrößen & Wasserhaushalt

1) Beschreiben Sie die Aggregatzustände des Wassers auf molekularer Ebene!

Fest: Moleküle bilden ein Kristallgitter

Flüssig: M. bleiben in Kontakt, können sich aber recht frei bewegen

-> höheres Maß an molekularer kinetischer Energie

Gasförmig: M. bewegen sich frei

2) Was ist besonders am Wasser in der Atmosphäre?

- Einzige Substanz, die in allen 3 Aggregatzuständen vorhanden ist

3) Was ist der Luftdruck?

Der Luftdruck an einem beliebigen Ort der Erdatmosphäre ist der hydrostatische Druck der Luft, der an diesem Ort herrscht. Dieser Druck entsteht durch die **Gewichtskraft der Luftsäule**, die auf der Erdoberfläche oder einem auf ihr befindlichen Körper steht. Der mittlere Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe beträgt normgemäß 101325 Pa = **1013,25 hPa** (Hektopascal = Millibar).

4) Was ist der Partialdruck des Wassers (in der Meteorologie: Dampfdruck)?

Der Partialdruck ist der Druck, der in einem Gasgemisch wie z. B. der Luft, einem bestimmten Gas zugeordnet werden kann, z. Bsp. des Wassers

5) Was beschreibt das Dalton-Gesetz?

Das Dalton-Gesetz besagt, dass die Summe aller Partialdrücke p_i bei idealen Gasen gleich dem Gesamtdruck des Gemisches p_{Gesamt} ist.

6) Was ist der Sättigungsdampfdruck?

Der Sättigungsdampfdruck ist der Druck der dampfförmigen Phase eines Stoffes, wenn die flüssigförmigen und dampfförmigen Phasen sich im Gleichgewicht befinden, bei Luft also der Wasserdampfpartialdruck, wenn die Luft mit Wasser gesättigt ist.

Der Sättigungsdampfdruck ist T-abhängig: Ist es kalt, ist der SDD gering, da nur wenig Moleküle verdunsten und sich langsam bewegen. Ist T hoch, ist der SDD auch hoch, da viele M. verdunsten und sich schnell bewegen.

7) Sie füllen Wasser in eine leere Vakuumschüssel. Beschreiben Sie, was mit dem Dampfdruck passiert, und wann der Sättigungsdampfdruck erreicht ist!

- Wassermoleküle verdunsten: Oberhalb der Wasseroberfläche mehr Moleküle

- Der Druck durch den Wasserdampf steigt

- Bald stellt sich ein Gleichgewicht zw. Verdunstung und Kondensation ein

- Der Dampfdruck bleibt konstant

- Anzahl der Wassermoleküle steigt nicht mehr: -> Sättigungsdampfdruck erreicht!

8) Wie lässt sich der Gesamtdruck der Atmosphäre berechnen?

$p_{Ges} = \text{Wasserdampfpartialdruck} + \text{Druck der trockenen Atmosphäre}$

9) Was ist die Luftfeuchte?

Wassergehalt der Luft, bzw. das Gasgemisch aus trockener und feuchter Luft.

10) Nennen Sie alle 6 Feuchtegrößen!

Absolute Feuchte g/m^3

- Gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf in 1 Kubikmeter Luft enthalten ist

Spezifische Feuchte g/kg

- Gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf in 1 kg feuchter Luft enthalten ist (Masse des Wasserdampfs zur Gesamtmasse der feuchten Luft)

Mischungsverhältnis g/kg

- Gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf in 1 kg trockener Luft enthalten ist

Rel. Feuchte %

- Das mit 100 multiplizierte Verhältnis von der vorhandenen zur (entsprechend der T.) maximal möglichen Feuchte

- wird oft von privaten Home-Wetterstationen gemessen

Taupunkt C°/K

Die T. bis zu der Luft abgekühlt werden muss, damit Kondensation einsetzt (Wenn T Luft = T Taupunkt, dann Kondensation oder Nebelbildung). Die isobare Abkühlung der Luft auf den Taupunkt führt somit zur Kondensation

Sättigungsdampfdruck mB / hPa

Maximal mögliche Aufnahmekapazität der Luft an Wasserdampf, abhängig von T

11) **Wie lässt sich die spezifische Feuchte errechnen?**

- Näherungsweise aus dem Dampfdruck und dem Luftdruck oder
- Aus der Dichte der Luft bzw. des Wasserdampfs

12) **Nennen Sie typische Werte der spezifischen F. von warmer, feuchter; bzw. trockener Luft!**

Trockene Luft: 0,1g/kg

Feuchte und warme Luft: 30g/kg

13) **Wie lässt sich die rel. Feuchte errechnen?**

Wenn die spezifische F. und die Aufnahmekapazität der Luft bis zur Sättigung bekannt ist, dann gilt:

Bsp.: T= 14 Grad

Sp. Feuchte: 6g/kg; Sättigung der Luft bei 10 g/kg, dann folgt:

$F_{rel} = 6/10 \cdot 100 = 60 \%$

Bsp: T= 25 Grad

Sp. Feuchte: 6g/kg; Sättigung der Luft erst bei 20 g/kg (da die Luft wärmer ist), dann folgt:

$F_{rel} = 6/20 \cdot 100 = 30\%$

Die Rechnung ist nichts anderes als die Definition der relativen Feuchte:

Rel. Feuchte %:

Das mit 100 multiplizierte Verhältnis von der vorhandenen zur (entsprechend der T.) maximal möglichen Feuchte

14) **Wann ist die Taupunkttemperatur erreicht?**

Wenn T Luft so weit abkühlt, bis Kondensation einsetzt, bzw. es zur Nebelbildung kommt, da die rel. Feuchte 100 % erreicht.

15) **Nennen Sie Werte der spezifischen Sättigungsfeuchte für 0, 15 und 42 Grad!**

0= 4-5 g/kg

15= 10 g/kg

42= 50 g/kg

16) **Der Sättigungsdampfdruck über Wasser ist höher als über Eis. Welche Folgen hat das?**

- Es resultiert ein Dampfdruckgefälle, so dass dem Eis mehr Moleküle zugeführt werden, als zur Sättigung nötig ist. Überschüssige Moleküle begünstigen das Wachstum der Eiskristalle auf Kosten des Wassers (Eis im Eisfach, Schneeflocken,...) Die Eisphase ist für die Wolkenbildung sehr wichtig.

17) **Messung der rel. Luftfeuchte nach Assmann'schen Aspirationspsychrometer!**

Das Aspirationspsychrometer ist ein Messinstrument der Gruppe der Psychrometer, mit welchem die wahre, nicht durch Sonnenstrahlung verfälschte relative Feuchtigkeit und Temperatur der Luft gemessen wird. Es besteht ua. aus 2 Thermometern, wobei eines die tatsächliche T, das andere die Feuchttemperatur misst. Das geschieht mit Hilfe eines mit destilliertem Wasser besprühten Baumwollschlauches um die Kapillarkugel. Aus der Temperaturdifferenz des Trocken- und Feuchtthermometers ($t_t - t_f$) lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit unter Verwendung der *Sprungschens Formel* bestimmen, meist wird sie aus vorberechneten Tafeln abgelesen.

18) **Was ist die Feuchttemperatur?**

Wird in einem Luftvolumen solange Wasserdampf isobar **verdampft, bis Sättigung** eintritt, und wird die dafür notwendige Energie für die Verdunstung dem System **entzogen**, so kühlt sich das Luftvolumen bei Sättigung bis zur Feuchttemperatur ab.

19) **Was ist die Äquivalenttemperatur?**

Wird der in einem Luftvolumen enthaltende Wasserdampf isobar bis zur **Kondensation** gebracht, und die dabei

freiwerdende Energie zur T-zunahme verbraucht, so erwärmt sich das Volumen bis auf die Äquivalenttemperatur.
- ist immer größer als tatsächliche T.

20) Wie kann man mit Hilfe von Luft- und Feuchttemperatur andere (welche) Feuchtegrößen ablesen?

Nomogramme & Tabellen

- rel. Feuchte, Dampfdruck, Taupunkt, Äquivalenttemperatur

21) Der Sättigungsdampfdruck ist über Wasser...als über Eisflächen?

- größer

22) Der Sättigungsdampfdruck ist bei großen Tropfen...als bei kleinen Tropfen?

- kleiner

23) Der Sättigungsdampfdruck ist eine Funktion der...

Temperatur

24) Der Gesamtdruck der Luft ist =...

dem Wasserdampfpartialdruck + Druck der trockenen Atmosphäre

25) Folgendes Feuchtemaß ist gegenüber Vertikalbewegungen konservativ, solange keine Kondensation eintritt:

- Spezifische Feuchte

26) Die Magnusformelparameter zur Berechnung der Sättigungsdampfdrucks variieren in Abhängigkeit von?

- der Berechnung des Sättigungsdampfdrucks über Wasser oder Eis und

- ob die T des Wassers über oder unter 0 C° liegt.

27) Mit folgenden 3 Messinstrumenten lässt sich die Luftfeuchte bestimmen?

Psychrometer, Haarhygrometer, Hygrograph

28) Für die Äquivalenttemperatur gilt?

Ist in einem Luftvolumen Wasserdampf vorhanden, so ist die Äquivalenttemperatur immer höher als die tatsächliche T.

29) Im Vergleich mit einem großen Tropfen, wenn alle anderen Faktoren gleich sind, ist der Sättigungsdampfdruck bei einem kleinen Tropfen..., was sich ... auf die Verdunstung auswirkt!

größer; positiv - > leichter verdunstbar

30) Was beschreibt die Magnusformel?

Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks

31) A: Wenn der Sättigungsdampfdruck erreicht ist, gilt? B: Wie kann der Sättigungsdampfdruck erreicht werden?

A: Evaporation = Kondensation

B: Zufuhr von Wasserdampf (Verdunstung), Abkühlung des Luftpaketes bis zum Taupunkt, Mischung feuchter mit trockener Luft

32) Bestimmen Sie die spezielle Gaskonstante für die Venusatmosphäre. Nehmen Sie an, dass die gasförmige Venusatmosphäre zu 96% aus Kohlendioxid, zu 3.5% aus Stickstoff und zu 0.5% aus Wasserdampf (jeweils Volumenanteile) besteht und die Gase sich „ideal“ verhalten.

$$M_{Luft} = \sum_i \frac{n_i}{n_{Luft}} M_i = \frac{0.96 \cdot 44}{CO_2} + \frac{0.035 \cdot 28}{N_2} + \frac{0.005 \cdot 18}{H_2O} = 43.3 \text{ g/mol}$$

$$R_{Venus} = \frac{R}{M_{Venus}} = \frac{8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}}{43.3 \text{ g mol}^{-1}} = 192 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

33) Der atmosphärische Wasserdampfgehalt der Erdatmosphäre sei null und der atmosphärische Druck betrage 1013 hPa. Durch einen Verdunstungsprozess erhöht sich nun der Partialdruck des Wasserdampfes auf 13 hPa. Was ist schwerer? Ein Mol der trockenen Luft oder ein Mol der feuchten Luft? Feuchte Luft ist wegen des geringen Molekulargewichtes immer leichter!

34) Wasserdampftransport ist immer auch ein ... Transport!

Energietransport. Daher ist Wasserdampf für viele atmosphärische Prozesse von Relevanz z.B. für die Gewitterbildung bei hoher Feuchte in der Grundsicht.

35) Nennen Sie stichpunktartig und kurz die Bedeutung der Feuchte im A hydrologischen Zyklus B Energiekreislauf!

A Hydrologischer Zyklus:

Wolken- und Niederschlagsbildung

Austauschprozesse an der Oberfläche (Bodenfeuchte, Bodenleben, Grundwasser)

B Energiekreislauf:

Absorption solarer Strahlung

Absorption/Emission langwelliger Strahlung

Energieumsatz bei Phasenübergängen

36) Der Wasserdampfanteil in der Atmosphäre ist stark variabel – beträgt jedoch maximal wie viel Volumenprozent PW (precipitable water) Gesamtwasserdampfgehalt?

4 % (im Mittel 25 kg/m^2 entsprechend 25 mm Wassersäule mit $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=10^3 \text{ kg m}^{-3}$) und im Vergleich zur Gesamtmasse der Atmosphäre ca. 0,3 %.

37) Der Wasserdampfpartialdruck e ...

Variiert zw. 0 hPa bis einer absolut wasserdampffreien Atmosphäre und dem Sättigungsdampfdruck bei maximaler Sättigung (Sättigungsdampfdruck e_s)

38) Der Sättigungsdampfdruck e^* ...

...ist der maximale Wasserdampfdruck bei einer gegebenen Temperatur. Wird er erreicht, kommt es zum Gleichgewicht zwischen Verdunstung und Kondensation im abgeschlossenen System:

$e > e^*$ = Kondensation zu flüssiger/fester Phase

$e < e^*$ = Verdunstung von flüssiger/fester Phase

39) Nennen Sie die Magnusformel über einer ebenen Wasserfläche reinen Wassers für e^* !

$$e_w^* = 6.1078 \exp\left(\frac{17.08085 \vartheta}{234.175 + \vartheta}\right) \quad [\text{hPa}]$$

40) Nennen Sie in dem Zusammenhang was das Dalton'sche Gesetz beschreibt!

Summe aller Partialdrücke ist bei idealen Gasen gleich dem Gesamtdruck des Gemisches

41) Skizzieren Sie das Phasendiagramm des Wassers! Zeichnen sie auch die Gleichgewichtskurve zw. Eis und Wasserdampf bzw. unterkühltem Wasser und Wasserdampf! Wie viele Phasen können auf den Kurven, wie viele an Tripelpunkten auftreten?

Kurve: 2

Trippelpunkt: 3

42) Wo liegt der Sättigungsdampfdruck höher - über Eis oder über Wasserflächen und warum?

Sättigungsdampfdruck über Eis e_i^* ist niedriger als über einer gleich temperierten Oberfläche unterkühlten Wassers, da die größeren Anziehungskräfte zwischen den Molekülen im Eiskristall diese stärker binden und ein Gleichgewicht bei niedrigerem Dampfdruck bewirken.

→ Im Eis bewegen sich die Moleküle langsamer und die Bindungskräfte sind viel stärker als im Wasser

→ Deshalb benötigen sie eine höhere kinetische Energie, um in die Luft zu gelangen

→ Der Sättigungsdampfdruck über Eis muß niedriger sein als über (unterkühltem) Wasser mit derselben Temperatur

→→ wichtig für Niederschlagsbildung: Eisteilchen wachsen auf Kosten von Wassertropfen

43) Wofür ist eine Verdampfungswärme (L) nötig?

Sie ist nötig um eine Flüssigkeit in Dampf umzuwandeln, denn die Bindungskräfte im Wasser müssen überwunden werden. Die Verdampfungswärme (L) enthält zusätzlich die Arbeit für die Ausdehnung vom Flüssigkeitsvolumen auf das Gasvolumen:

→ 1 g flüssiges Wasser nimmt 1 cm^3 ein

→ 1 g Wasserdampf nimmt 1600 cm^3 bei 1000 hPa und 100°C ein.

→ Tatsächlich wird aber der weitaus größte Teil der Energie für das Aufbrechen der Bindungsenergie benötigt.

44) Wie kann man den Taupunkt über den Sättigungsdampfdruck definieren?

Der Taupunkt T_d ist jene Temperatur, deren Sättigungsdampfdruck über Wasser $e(T_d)$ gerade gleich dem wirklichen Dampfdruck e ist, also $e=e^*(T_d)$.

→ Eine isobare Abkühlung eines Luftpaketes mit dem Dampfdruck e führt zur Sättigung bzw. Kondensation
→ Ist der Taupunkt T_d (oder ϑ_{din} °C) bekannt, kann der aktuelle Dampfdruck e mittels der Magnus-Formel berechnet werden

45) Was versteht man unter der virtuellen Temperatur?

Die virtuelle Temperatur T_v ist jene, die wasserdampffreie Luft hätte, wenn sie gleiche Dichte und Druck wie die feuchte Luft hätte

46) Wo finden wir den meisten Wasserdampf in der Atmosphäre?

In der atm. Grenzschicht zw. Boden und ca. 2 bis 3 km Höhe

→ Boden stellt durch Verdunstung Feuchtigkeit bereit

→ Verdunstungsstärke hängt von der Feuchtedifferenz zw. Boden und unterer Atmosphärenschicht ab

→ Feuchtetransport wird durch Turbulenz bewerkstelligt

→ Wolkenbildung durch Aufstieg feuchter Luft

47) Der Tagesgang des Dampfdruckes lässt sich als Doppelwelle beschreiben. Warum?

Doppelwelle des Dampfdruckes durch Zusammenspiel von Verdunstung am Boden und später intensiviertem turbulenten Feuchtetransport am frühen Nachmittag (bei Tage Verdunstung, bei Nacht Taubildung)

48) Der Tagesgang der rel. Feuchte zeigt i.d.R. einen starken Abfall mit einem Tiefpunkt am späten Nachmittag. Warum?

Die Schwankung der Feuchte ist nicht durch eine tatsächliche Änderung des Feuchtegehaltes sondern vielmehr durch den Temperaturanstieg im Tagesverlauf bestimmt → wärmere Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen, der rel. Feuchtegehalt der Luft sinkt.

49) Der globale Wasserdampfverteilung ist heterogen. Wo gibt es besonders viel Wasserdampf?

Über den äquatorialen Ozeanen.

50) Nennen Sie die 3 Kompartimente des Wasserkreislaufes!

- Atmosphäre

- Ozeane

- Landoberfläche

51) Von 380000 km³ Verdunstung fallen wie viel km³...

A) ...an Niederschlag über dem Land? 96.000

B) ...an Niederschlag über dem Meer? 284.000

52) Von 96.000 Niederschlag an Land verdunsten wie viel km³? Was passiert mit dem Rest?

Verdunstung Land: 60.000

Der Rest fließt durch Flüsse oberirdisch ab (runoff - stark vereinfacht): 36.000

53) Wie viel km³ verdunsten direkt aus dem Meer?

320.000

54) Nennen Sie wichtige Kenngrößen bei der Historie der Feuchtemessung!

- 1400: Holz absorbiert Feuchtigkeit ("hygroskopisch") und ändert bei Feuchtigkeitsaufnahme seine Eigenschaften (z.B. Volumen, Länge, Gewicht, Farbe)

- Bis 1. Hälfte 19. Jahrhundert: "Grannen von wildem Hafer" wurden in englische Banjobarometern eingebaut. Lebensdauer höchstens 12 Monate.

- Wolle, Holz, Papier, Hanfschnüre, Darmsaiten, Fischbein, Elfenbein und Salze kamen in frühen Hygroskopen zur Anwendung.

- 2. Hälfte des 18. Jahrhundert: Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) "Essais sur l'Hygrométrie" stellt Haarhygrometer mit speziell behandelten blonden Frauenhaaren und Messskala vor.

- 1820: Kondensationshygrometer können Temperatur des Taupunktes der umgebenden Luft direkt zu bestimmen

- Ende 19. Jahrhundert: Einführung des **Psychrometers** durch Richard Aßmann
- 20. Jahrhundert Fernerkundungssensoren in verschiedenen Spektralbereichen

55) Nennen Sie Methoden der Feuchtemessung!

- Psychrometer Messung:

→ Effekt des Zufügens von Wasser (Verdunstungskälte), Trocken- und Feuchttthermometer: Gleichgewicht zwischen latentem und fühlbarem Wärmefluss

- Sättigungsgleichgewicht hygroskopischer Substanzen:

- elektrische Hygrometer (Kapazitätsänderung, Humicap)
- Längenänderung von Haaren
- Lithium-Chlorid Hygrometer

- Tau- und Frostpunkthygrometer

- Absorption elektromagnetischer Strahlung

→ z.B. Lyman- α Linie im ultravioletten (Buck, 1976)

56) Erklären Sie die Messmethode eines Haarhygrometers!

- Mit zunehmender relativer Feuchte wird der Wassergehalt der hygroskopischen Substanz immer größer, und ihr Volumen nimmt zu, bei langgestreckter Form ist die Längenänderung besonders groß.
- Materialien sind z.B. Haare, Textilfasern (künstlich oder natürlich) und Zellophan.
- Für Wasserdampfaustausch mit Luft müssen Haare entfettet werden
- Verbesserung von Empfindlichkeit und Genauigkeit durch chemische und/oder mechanische Vorbehandlung (z.B. Kochsalzlösung, Wälzung)
- Haarbüschel (Harfe) wird mit Hebelsystem auf Zeiger übertragen
- Haarhygrometer müssen regelmäßig regeneriert werden (Sättigung!) z.B. bei 40 % relative Feuchte beträgt nach 4 Wochen der Fehler + 13 %.
- Haare ändern ihre Länge nicht linear mit der relativen Feuchte!

Relative Feuchte: 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Relative Längenänderung: 0 22,5 40,0 52,2 61,6 69,0 76,0 82,6 88,8 94,6 100,0

57) Wie kann man den Taupunkt messen – beschreiben Sie den Taupunktspiegel!

- Temperaturregung eines metallischen Spiegels bis zum Einsetzen von Kondensation
 - Kondensation führt zur Streuung des auftreffenden Lichts und somit zur Reduktion der am Photodetektor
 - Temperaturmessung möglichst direkt an Spiegeloberfläche um Temperaturgradienten zu minimieren. Problem: Beeinflussung der Taubildung
 - Spiegeloberfläche muss extrem rein sein, um Verfälschungen im Sättigungsdampfdruck zu vermeiden
 - Unter 0°C kann es zur Kondensation (unterkühltes Wasser) bzw. Frostbildung kommen
- Der Sättigungsdampfdruck über unterkühltem Wasser bei -20 °C entspricht einem Frostpunkt von -18 °C

58) Beschreiben Sie die Feuchtemessung mittels Radiosonden!

- Der feuchteempfindliche Kondensator besteht aus zwei flachen Elektroden, zwischen denen sich eine elektrisch isolierende, hygroskopische Kunststoffschicht (Dielektrikum) befindet.
- Dieses Dielektrikum kann das in der Luft befindliche Wasser absorbieren.
- Mit steigender Luftfeuchte steigt auch die Kapazität des feuchteempfindlichen Kondensators.
- Probleme durch Trägheit beim Durchfliegen von Wolken und bei niedrigen Feuchten

59) Phasendiagramm von Wasser – was ist ein Tripelpunkt?

- Wasser kommt in fester, flüssiger und gasförmiger Phase gleichzeitig vor
- Phasenübergänge werden ausgelöst durch Zufuhr / Abfuhr von Wärme oder Wasserdampf