	GdHM - Wetterschule - Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche		
	Lektion	9	Luftfeuchtigkeit


# Luftfeuchtigkeit

## Kurzbeschreibung

Zunächst geht es um die spezifische Wärme des Wassers und die Übergänge zwischen Eis, Wasser und Wasserdampf. Die Bedeutung der latenten Wärme wird an Beispielen erläutert.

Der Begriff der Wasserdampfsättigung wird eingeführt und mit den verschiedenen Feuchtemaßen verbunden. Die besondere Bedeutung der relativen Feuchte wird geschildert, der Dampfdruck und sein Zustandekommen werden erklärt.

Autor:	Uwe Bergholter
Erstellungsdatum:	19. Februar 2005

	GdHM - Wetterschule		
	- Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche		
Lektion	9	Luftfeuchtigkeit	2 (6)

Über die besondere Rolle des Wasserdampfes haben wir beim globalen Energietransport schon gesprochen. Heute soll es etwas in die Details gehen. Viele Wettervorgänge werden erst verständlich, wenn man die verschiedenen Eigenschaften des Wassers in seinen drei Aggregatzuständen – Eis, flüssiges Wasser und Dampf – und die Besonderheiten der Übergänge zwischen diesen Zuständen kennt. Das Wasser kann in der Luft in jedem der drei Zustände vorkommen, und in den ersten beiden kann man es dann auch sehen, sei es als Wolke oder als fallenden Niederschlag.


Für eine Erwärmung muß man dem Wasser ebenso wie jedem anderen Stoff Energie zuführen, für eine Abkühlung Energie entziehen. Die Menge der benötigten Energie für eine bestimmte Temperaturänderung ist in den drei Zuständen des Wassers zwar etwas verschieden, extrem wird es aber, wenn wir die Übergänge von einem Zustand in einen anderen betrachten. Dabei nimmt das Wasser gewaltige Mengen Energie auf bzw. gibt sie wieder frei. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Es ist angegeben, wie viele Energie zur Erwärmung eines Kilogramms Wasser um 1 Grad nötig ist. Diese Energiemenge nennt man auch die spezifische Wärme. Bei den Phasenübergängen ist angegeben, wie viele Energie für die Umwandlung von 1 kg gebraucht wird.

Eis	Schmelzen > <Gefrieren	Flüssiges Wasser	Verdampfen > <Kondensieren	Dampf
2.1 (0.58)	334 (93)	4.2 (1.17)	2500 (695)	1.85 (0.51)

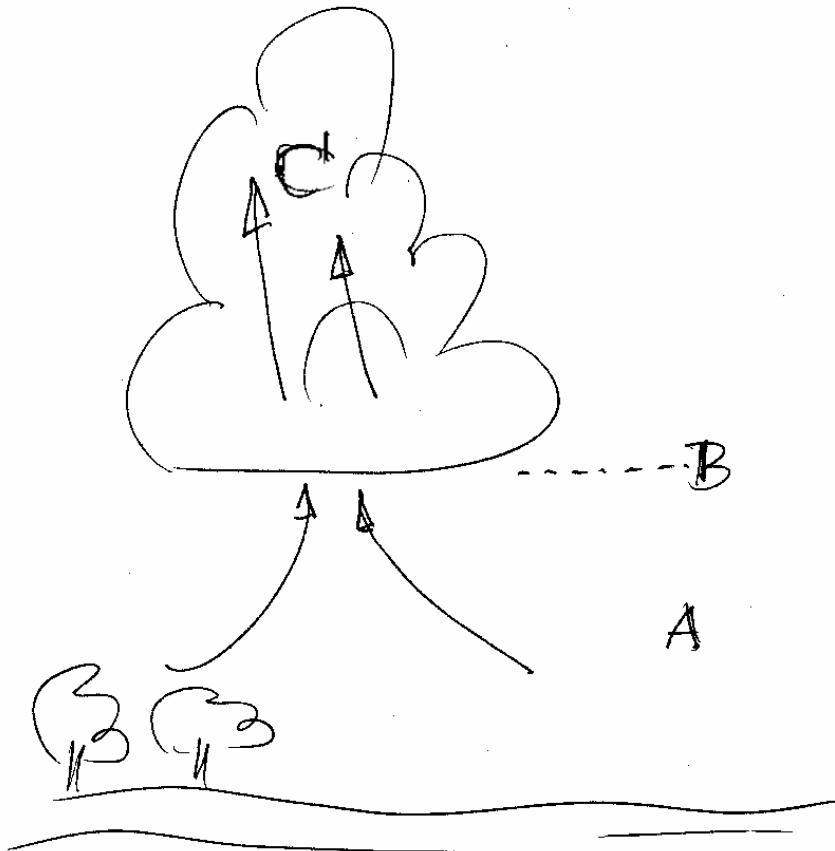
**Tabelle:** Spezifische Wärme in kJ/kgK (Wh/kgK) und Umwandlungsenergie in kJ/kg (Wh/kg)

Nicht in die Tabelle aufgenommen habe ich den Übergang vom Wasserdampf direkt zum Eis, die Sublimation. Rauhreif ist ein Beispiel dafür, ebenso der Diamantschnee, der bei großer Kälte in kleinen Eisnadeln oder Flöckchen vom blauen Himmel schwebt. Die Umwandlungsenergie beträgt dabei soviel wie die beiden anderen Umwandlungsenergien zusammen.


In allen drei Phasen hat das Wasser eine viel höhere spezifische Wärme (die man auch als Wärmespeichervermögen bezeichnen kann) als andere Stoffe. Die Minerale, die wir in der Umwelt finden, liegen mit ihren Werten zwischen 0.5 und 1 kJ/kgK, also 4- bis 8-mal niedriger als flüssiges Wasser! Das hat Folgen für das Wetter. Die bekannteste unter ihnen ist die verschiedene Reaktion von Land und See auf Erwärmung und Abkühlung. Immer ändert sich die Wassertemperatur viel langsamer als die Temperatur an Land. So kommt es nicht nur in der Nähe der Meere zu einem über das Jahr ausgeglicheneren Temperaturverlauf, sondern auch immer wieder zu der so genannten Seewindzirkulation. Darauf wird in einer anderen Lektion eingegangen.

	GdHM - Wetterschule - Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche		
	Lektion	9	Luftfeuchtigkeit

Für unsere Betrachtung der Luftfeuchtigkeit sind die Phasenübergänge des Wassers eigentlich noch wichtiger als die spezifische Wärme, und zwar vor allem der Übergang zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf. Die Energie, die bei diesem Übergang freigesetzt wird bzw. aufgebracht werden muß, ist gewaltig. Ein Beispiel dazu aus dem täglichen Wettergeschehen: Ein kräftiger Regenschauer kann auf einem Streifen von 2 km<sup>2</sup> eine Regenmenge von 10 Liter pro m<sup>2</sup> abladen. Das sind – bitte nachrechnen! – 20 Mio Liter oder 20 000 t Wasser, etwa 670 Tanklaster voll. Übrigens, 1 Liter Wasser, auf einem Quadratmeter ausgegossen, steht genau 1 mm hoch. Daher sind die Angaben „x Millimeter Regen“ und „x Liter pro qm Regen“ absolut gleichwertig. Doch zurück zu den 20 Mio Litern. Wenn man sie wieder verdunsten wollte, brauchte man für einen Liter 0.695 kWh, für 20 Mio Liter also 13.9 Mio kWh. Auf einer 2000W-Kochplatte dauerte das 794 Jahre, und ein Kraftwerk mit 1000 MW elektrischer Leistung würde immerhin 14 Stunden brauchen, um diese Energie aufzubringen. Die 20 Mio Liter Wasser sind in der Schauerwolke erst zu flüssigem Wasser geworden, vorher waren sie Wasserdampf. Bei der Kondensation zu Wolkentröpfchen ist also diese riesige Energiemenge freigeworden und hat bewirkt, daß sich die in der Wolke aufsteigende Luft nicht so schnell abkühlte. Dadurch konnte die Wolke überhaupt erst soweit wachsen, daß es zum Regenschauer kam – und hier liegt die Bedeutung der großen Kondensationswärme. Ohne sie müßten wir auf Quellwolken, Regenschauer und Gewitter weitestgehend verzichten.



**Abbildung:** Luft steigt auf (A) und kühlt mit ca. 1°C pro 100m ab. Bei (B) setzt Kondensation ein und eine Wolke bildet sich. Die Wolkenluft (C) nimmt die Kondensationswärme auf und kühlt deshalb nur mit ca. 0.5°C pro 100m ab. Sie bleibt deshalb wärmer als die Umgebung und die Wolke kann weiter wachsen.

	GdHM - Wetterschule - Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche		
	Lektion	9	Luftfeuchtigkeit

Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft kann auf verschiedene Weise gemessen und bezeichnet werden, und man kann die Angaben ineinander umrechnen. Wichtig ist, daß es zu jeder Temperatur eine Höchstmenge an Wasser gibt, die als Dampf existieren kann. In der Wärme kann mehr Wasserdampf in der Luft sein als in der Kälte. Wie groß die Unterschiede sind, kann man in der nachfolgende Tabelle sehen.

-40°C	-30°C	-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0.18	0.54	1.07	2.36	4.84	9.39	17.3	30.3	51.1


Tabelle: Maximale Wasserdampfmenge bei verschiedener Temperatur ( $\text{g/m}^3$ )

Man sieht, wieviel mehr Wasserdampf warme Luftmassen aufnehmen und transportieren können als kalte Luft. Das ist auch ein Grund dafür, daß die schweren Sommergewitter bei uns immer in Luftmassen tropischen oder subtropischen Ursprungs entstehen. Viel Wasserdampf bedeutet eben auch: Viel Energie bei der Wolkenbildung!

Was passiert nun, wenn die Höchstmenge an Wasserdampf in der Luft erreicht ist und noch weiterer Wasserdampf hinzukommt? Dann muß sich irgendwo flüssiges Wasser niederschlagen. Wir sagen, die Luft ist mit Wasserdampf gesättigt. Entsprechend gibt es für die verschiedenen Feuchtemaße, die am Schluß zusammengestellt sind, z.B. eine Sättigungsfeuchte, einen Sättigungsdampfdruck, ein Sättigungsmischungsverhältnis. Alle bezeichnen den bei der aktuellen Temperatur möglichen Höchstwert.

Jetzt kommen wir zur Taupunktstemperatur, die meist einfach als Taupunkt bezeichnet wird. Sie gibt die Temperatur an, bei der sich aus der Luft Tau abzusetzen beginnt. Wir haben ja gesehen, daß bei niedrigerer Temperatur die Sättigungsfeuchte geringer ist, also wird bei Abkühlung irgendwann die vorhandene Feuchte zur Sättigung führen. Dann kommt es zur Bildung von Tau oder von Nebel oder Wolken, wenn es in der freien Atmosphäre geschieht. Wenn wir von der Taupunktdifferenz sprechen, meinen wir den Betrag, um den der Taupunkt niedriger ist als die Temperatur. Trockene Luft hat demnach eine große, feuchte Luft dagegen nur eine kleine Taupunktdifferenz. In gesättigter Luft ist sie Null.

Wir verstehen jetzt vielleicht besser, warum sich Tau an bestimmten Stellen zuerst absetzt – auf Autodächern, auf Hausdächern und Dachfenstern, auf dem Rasen und auf Blättern von Pflanzen. Es sind die kältesten Stellen, wenn z.B. abendliche Abkühlung einsetzt. Bei völliger Windstille können sich Oberflächen unter einem klaren und kalten Himmel durchaus um 4-5 Grad unter die Lufttemperatur abkühlen. Das gilt auch für Pflanzen wie Klee, deren Blätterdach eine isolierende Luftschicht unter sich einschließt. An diesen kalten Oberflächen ist oft der Taupunkt der Luft unterschritten, und es schlägt sich Wasser nieder. In manchen Gebieten, in denen wenig Regen fällt, spielt die auf diese Weise eingefangene Nässe eine große Rolle. Der Tau, der an den Blättern herab rinnt und in den Boden gelangt, macht zum Beispiel in be-


	GdHM - Wetterschule		
	- Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche		
Lektion	9	Luftfeuchtigkeit	5 (6)

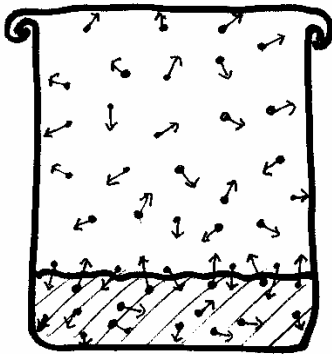
stimmten Gegenden von Jordanien bis zu 30% des Jahresniederschlags aus und ist damit für die Landwirtschaft ganz entscheidend. Ein anderer Faktor bei der Taubildung ist die Feuchtenachlieferung, wenn etwa aus einem Bächlein oder aus einer feuchten Wiese Wasser verdunstet und die Schwaden an der nahen Brücke zu Tau oder im Winter zu Reif werden, weil auf der schnell abkühlenden Brücke der Taupunkt erreicht wird. Auch im Haushalt kann man diese Vorgänge oft erleben, zum Beispiel bei den beschlagenen Scheiben im Badezimmer oder, wenn in der Küche gekocht wird. Der Eisbelag im Kühlschrank entsteht, weil Feuchtigkeit aus den Speisen verdunstet und an den Kühlflächen kondensiert, wo sie anschließend gefriert. Geräte zum Trocknen von Luft für Neubauten, Feuchträume und Schwimmbäder arbeiten ebenfalls nach dem Prinzip. Die Luft wird in ihnen stark gekühlt, so daß das meiste Wasser daraus kondensiert. Die wieder erwärmte Luft ist dann sehr trocken.

Ein weiteres wichtiges Feuchtemaß ist die relative Feuchte (RF), die in % angegeben wird. Klar, bei 0% ist kein Wasserdampf zu finden, bei 100% herrscht Sättigung. Die Werte zwischen 0 und 100% geben an, wieviel vom maximal möglichen Wasserdampfgehalt tatsächlich in der Luft ist. Die RF hat im Gegensatz zu der ‚neutralen‘ Angabe von Taupunkt und Temperatur noch eine besondere Bedeutung. Schon die %-Angabe, die nichts über warm und kalt aussagt, weist ein bißchen darauf hin. Alle Lebewesen haben einen sogenannten Behaglichkeitsbereich, also einen Bereich, in denen es ihnen nach Gesundheit und Wohlbefinden am besten geht. Für uns Menschen liegt der Bereich hinsichtlich der relativen Feuchte zwischen 35 und 70%. Fast alle Materialien, besonders die natürlichen, nehmen mehr oder weniger Wasserdampf aus der Luft auf oder verdunsten Wasser, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat zwischen der Feuchte der Umgebungsluft und der Feuchte im Material.

Wir wollen uns ein kleines Experiment vorstellen. Wir nehmen einen Luftballon und füllen ihn draußen mit Luft, deren Temperatur 0°C und deren RF 50% betragen soll. Dann tragen wir den Ballon ins Warme und warten, bis sich die Temperatur an die Raumtemperatur von 20°C angeglichen hat. Nun messen wir wieder die Feuchte und stellen erstaunt fest, daß sie nur noch etwa 14% beträgt! Wie kommt das? Es ist kein Wasserdampf entwichen. Die Luft enthielt und enthält immer noch, siehe die erste Tabelle, 2.42 g/m<sup>3</sup> Wasserdampf. Das war bei 0°C gerade 50% des Maximalwertes. Bei der höheren Temperatur ist nun der Maximalwert gestiegen, und die 2.42 g/m<sup>3</sup> sind nur noch 14% davon. Darum ist es im Winter in den Häusern so viel trockener. Die kalte Luft draußen enthält sowieso schon viel weniger Feuchtigkeit als im Sommer, und in den Häusern wird sie auch noch kräftig aufgeheizt. Die relative Feuchte zeigt Werte wie in der Wüste! Da kommt es schon mal vor, daß die Haare ‚elektrisch‘ werden und uns die Augen zu brennen anfangen.

Der wichtige Begriff Dampfdruck wird besonders bei der Wolkenbildung wieder auftauchen. Der Dampfdruck des Wasserdampfes ist der Anteil am Luftdruck, der vom Wasserdampf herkommt. Ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, dann herrscht der Sättigungsdampfdruck. Man kann ihn sich so vorstellen: In einem luftleeren Gefäß sei eine ebene Wasserfläche. Dann verdunstet soviel Wasser, bis sich dieser Sättigungsdampfdruck einstellt.

	GdHM - Wetterschule - Deutschlands "erste Schule" für angehende Wetterfrösche			
	Lektion	9	Luftfeuchtigkeit	6 (6)



Er zeigt sozusagen an, daß ein Gleichgewicht herrscht zwischen den Wassermolekülen, die als Dampf die Wasseroberfläche verlassen und denen, die aus dem Dampf wieder in das Wasser zurückgehen. Wenn das Wasser erwärmt wird, ist es den Molekülen leichter zu entweichen, und der Dampfdruck steigt an, weil nun mehr Moleküle im Dampfraum sind. Wird es kälter, nimmt die Zahl der Moleküle im Dampfraum ab, weil mehr von ihnen ins Wasser zurückkehren als austreten, bis wieder ein Gleichgewicht herrscht. Der Sättigungsdampfdruck ist vor allem abhängig von der Temperatur. Er ist auch

etwas davon abhängig, ob es sich um gefrorenes oder flüssiges Wasser handelt. Eigentlich wissen wir schon aus der Erfahrung, daß der Dampfdruck des Wassers bei 100°C genauso groß ist wie der (Normal-) Luftdruck. Dann fängt es an zu sieden. Eine kleine Tabelle für den Wasserdampfdruck füge ich hier ein:

-20	-10	0°C	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1.3	2.9	6.1	12.3	23.4	42.4	73.8	123	199	312	474	701	1013	1461	2025

Tabelle: Sättigungsdampfdruck in hpa für Wasser bei verschiedener Temperatur

Meistens ist die Luft ja nicht mit Wasserdampf gesättigt, d.h. der aktuelle Dampfdruck ist niedriger als der Sättigungsdampfdruck. Wir könnten mit der herrschenden Temperatur, dem dazu gehörigen Sättigungsdampfdruck und dem aktuellen Dampfdruck die uns schon etwas vertraute relative Feuchte bestimmen. Wir dividieren einfach den Dampfdruck durch den Sättigungsdampfdruck und multiplizieren mit 100% - das war es schon. Als Formel geschrieben, sieht es so aus:

$$\frac{\text{Dampfdruck}}{\text{Sättigungsdampfdruck}} * 100\% = RF\%$$

Die gleiche Formel können wir zur Berechnung der RF für alle Feuchtemaße verwenden, wenn wir in den Nenner den Wert bei Sättigung und in den Zähler den aktuellen Wert einsetzen.

Als Abschluß der Lektion eine Zusammenstellung wichtiger Feuchtemaße:

**Absolute Feuchte** Das Gewicht des Wasserdampfes (in g) in 1 m<sup>3</sup> feuchter Luft

**Spezifische Feuchte** Das Gewicht des Wasserdampfes (in g) in 1 kg feuchter Luft

**Mischungsverhältnis** Das Gewicht des Wasserdampfes (in g) in 1 kg trockener Luft

**Taupunkt** Die Temperatur, bei der die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist

**Dampfdruck** Anteil des Luftdrucks, der vom vorhandenen Wasserdampf stammt

**Relative Feuchte** Anteil der Feuchte (in %) im Verhältnis zur Sättigungsfeuchte