

## Wetter, Wolken, Physikalische Chemie

Wolken sind eine sehr alltägliche Erscheinung, über die wenig nachgedacht wird. Wolken findet man am Himmel, aber auch die alte Dampfisenbahn oder der Kühlturm eines modernen Kraftwerks produziert Wolken. Sie erscheinen in unterschiedlicher Form und Farbe, je nach der Höhe in der sie sich befinden und wie dick sie sind. Sie haben keine feste Gestalt, auch wenn sie manchmal als langlebig erscheinen.



Wie die Wolken zustande kommen und was sie bewirken soll in diesem kurzen Beitrag geschildert werden.

Außerdem, wenn sie den Text gelesen haben, sollten sie nicht nur über Wolken besser Bescheid wissen sondern auch über die **Physikalische Chemie**.

## Wetter und Wolken

Wir beginnen mit dem Wetter. Es wird von den Wolken beherrscht und spielt sich in der Troposphäre ab. Dieser Teil der Lufthülle der Erde reicht bis etwa 20 km in die Höhe. Würden wir die Erde mit einem Apfel vergleichen, entspräche dies etwa der Dicke seiner Schale. Luft ist ein Gasgemisch. Seine Hauptbestandteile sind Stickstoff (78,09 Vol-%) Sauerstoff (20,95 Vol-%) und Argon (0,93 Vol-%). Alle weiteren Gase, die auch noch in der Luft vorkommen, sind nur in Spuren vorhanden, d.h. sie machen zusammen weniger als 1% der Luft aus. Unter diesen Spurengasen finden wir auch Kohlendioxid und Wasserdampf. Kohlendioxid ist populär wegen des Klimaszenarios der globalen Erwärmung und dessen politischen Echo, dem Kyoto-Protokoll. Dagegen wird Wasserdampf in diesem Zusammenhang kaum erwähnt, obwohl er ein äußerst wichtiger Bestandteil der Luft ist. Dies soll im Folgenden gezeigt werden.

## Wasser – gasförmig, flüssig und fest

Wasser kommt gasförmig, flüssig und fest vor, als Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis. Dies sind drei verschiedene Aggregatzustände von Wasser.

Wasser ist ein kleines Molekül, das nur drei Atome enthält. Seine Formel  $H_2O$  ist allgemein bekannt. Es ist erstaunlich, dass ein so kleines Molekül meist als Flüssigkeit, oft als Schnee oder Eis auftritt, wo doch andere kleine Moleküle wie z.B. Kohlendioxid gewöhnlich Gase sind.

Seit ihren Anfängen am Ende des 19. Jahrhunderts erforscht die Physikalische Chemie den Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften von Materialien und der Struktur eines einzelnen Moleküls, aus dem diese Materialien aufgebaut sind. In der Materialforschung spielen spektroskopische Methoden und Röntgenbeugung eine wichtige Rolle.

**Tabelle 1: Die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe**

Höhe(m)	0	1000	2000	4000	6000	8000	10000
Druck(mbar)	1013	897	795	624	490	384	301

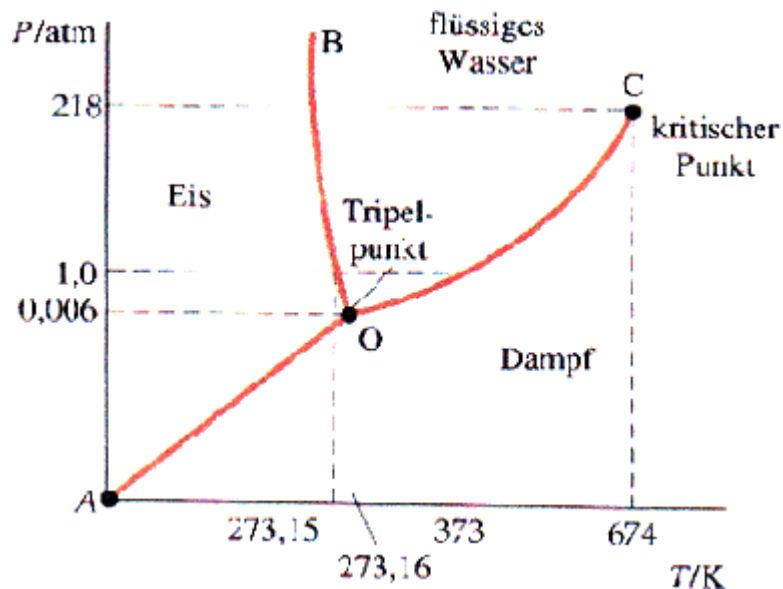
**Tabelle 2: Dampfdruck von Wasser bei verschiedenen Temperaturen**

T(°C)	-10	0	10	20	30	50	70	80	100
P(mbar)	3	6	12	23	42	123	311	473	1013

In welchem Aggregatzustand Wasser auftritt, hängt von der vorliegenden Temperatur ab und dem Druck unter dem es steht. Auf Meereshöhe steht alles unter dem Luftdruck von etwa 1at (=1013 mbar). Er kommt durch das Gewicht der überstehenden Luftsäule zustande. Es ist geläufig, dass bei diesem Druck Eis bei 0°C schmilzt und flüssiges Wasser bei 100°C siedet. Damit Wasser siedet, muss sein Dampfdruck mindestens so hoch wie der Luftdruck sein. Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck merklich ab (Tab.1), deshalb ist in der Höhe auch der Dampfdruck des siedenden Wassers geringer und damit verbunden die Siedetemperatur des Wassers (Tab.2). Auf dem Mt. Blanc z.B. siedet Wasser bereits bei etwa 85°C. Der Aggregatzustand von Wasser hängt also nicht allein von der Temperatur sondern auch vom Druck ab. Bei ganz bestimmten Werten von Druck und Temperatur können zwei Aggregatzustände von Wasser gleichzeitig existieren. Sie stehen in einem Gleichgewicht miteinander, man spricht dann auch von Phasengleichgewichten.

### Schema 1: Ausschnitt aus dem Phasendiagramm von Wasser

Dieses Schema zeigt in welchem Aggregatzustand Wasser bei bestimmten Werten von Temperatur und Druck vorliegt. Die durchgezogenen Kurven geben an unter welchen Bedingungen zwei Phasen, z.B. Eis und Wasser (B) gleichzeitig vorliegen. Im Tripelpunkt (o) können gleichzeitig Eis, flüssiges Wasser und Wasserdampf im Gleichgewicht existieren.



Die Untersuchung von Phasengleichgewichten ist eine wichtige Aufgabe der Physikalischen Chemie.

Bei der Umwandlung eines Aggregatzustands in einen anderen fließt Energie zwischen dem betrachteten System und seiner Umgebung, meist in Form von Wärme.. Damit in einem Gefäß Eis schmilzt oder Wasser verdampft muss man Wärme zuführen, umgekehrt wird bei der Kondensation von Wasserdampf oder beim Gefrieren von Wasser Wärme frei. Die gemessenen Wärmemengen betragen beim Übergang von Eis in flüssiges Wasser am Schmelzpunkt 333,8 Joule pro Milliliter und beim Verdampfen von Wasser am Siedepunkt 2258,7 Joule pro Milliliter. (Joule ist die Einheit der Energiemenge. 4,18 Joule sind 1 cal.) Es ist übrigens sehr bemerkenswert, dass bei einem Phasenübergang, z.B. dem Schmelzen von Eis, die Temperatur stets der Schmelztemperatur entspricht solange Eis und flüssiges Wasser nebeneinander vorliegen, unabhängig davon wieviel Wärme man zuführt. Erst wenn alles Eis geschmolzen ist, erhöht man durch weitere Wärmezufuhr die Temperatur des Wassers bis zur Siedetemperatur. Dann bleibt die Temperatur auch bei weiterer Wärmezufuhr erneut konstant bis alles flüssige Wasser verdampft ist. Erst wenn alles flüssige Wasser verdampft ist, kann die Temperatur des gebildeten Wasserdampfes wieder steigen. Die zugeführte Energie wird im Wasser gespeichert, man spricht dann von Innerer Energie.

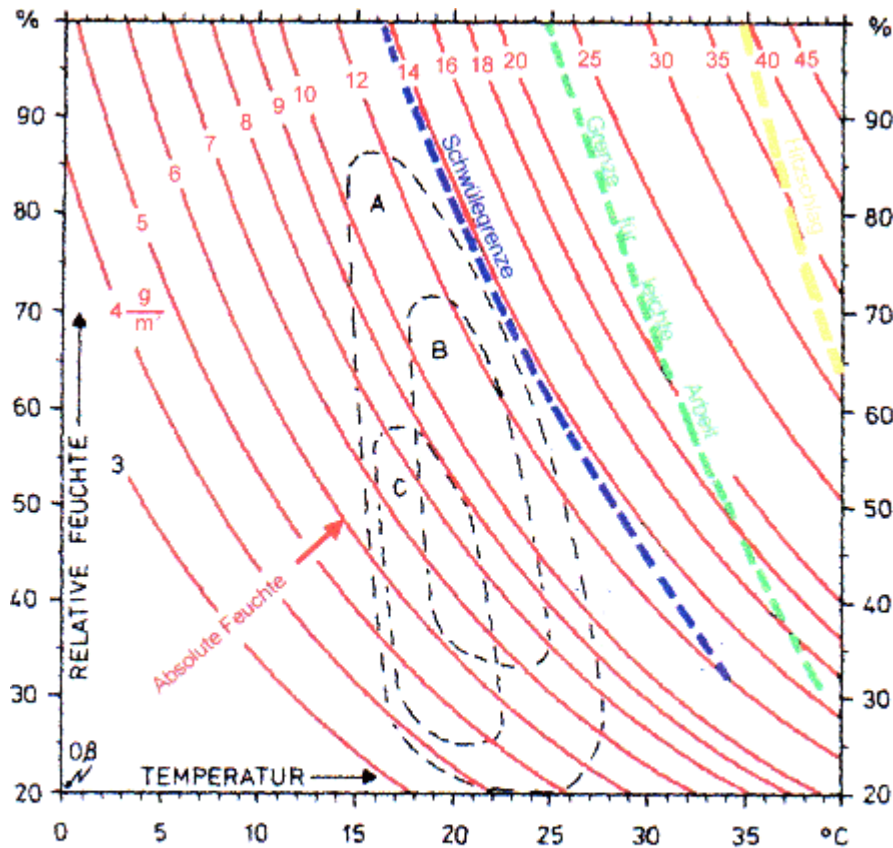
Die Messung der Energiemengen, die bei Phasenübergängen und chemischen Reaktionen umgesetzt werden, zählt zu den wichtigen Aufgaben der Physikalischen Chemie.

Bereits bei Temperaturen wesentlich unter 100°C verdunstet Wasser, dabei verschwindet das Wasser nicht, es verwandelt sich nur, wie beim Sieden, in ein unsichtbares Gas, den Wasserdampf. Weil alle Gase untereinander mischbar sind, mischt sich der Wasserdampf auch mit der überstehenden Luft – die Luft wird feucht.

Es ist natürlich sehr wichtig zu wissen wie viel Wasserdampf die Luft enthält oder mit anderen Worten: Wie feucht ist Luft ?

Im täglichen Leben misst man die Feuchte der Luft mit Hygrometern, welche die relative Feuchte in Prozent angeben. Ein wichtigeres und anschaulicheres Maß ist die absolute Feuchte, welche die Menge Wasserdampf angibt, die in einem Kubikmeter Luft enthalten ist. Die folgende Graphik (Schema 2) zeigt den Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, Lufttemperatur und absoluter Feuchte.

#### Schema 2: Relative und absolute Feuchte der Luft bei verschiedenen Temperaturen



Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, absoluter Feuchte und Temperatur. Eingezeichnet sind Behaglichkeitsbereiche (A: bei Möglichkeit weitgehender Anpassung, z. B. bei Luftbewegung, B: bei sitzender Beschäftigung in Räumen ohne Luftbewegung, C: bei körperlicher Arbeit in Räumen ohne Luftbewegung) sowie einige für den Menschen wichtige Grenzkurven.

Man erkennt, dass die zur Sättigung der Luft notwendige Menge Wasserdampf stark von der Lufttemperatur abhängt. Sättigung bedeutet 100% relative Luftfeuchte. Zusätzlich eingebrachter Wasserdampf würde zu flüssigem Wasser kondensieren oder bei tiefen Temperaturen zu Eiskristallen gefrieren. Bei nasskaltem Novemberwetter befinden sich nur etwa 5g Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft, während es nach einem sommerlichen Gewitter bis zu 15g sein können. Bei 55°C sind theoretisch maximale absolute Feuchten von 100g pro Kubikmeter möglich, doch in der Natur nie beobachtet worden. Werte von 30g pro Kubikmeter gehören schon zu den Ausnahmen. Andererseits nimmt die absolute Feuchte für niedrige Temperaturen auf äußerst kleine Werte ab. Bei -50°C, die in der oberen Troposphäre gefunden werden, ist die Luft praktisch vollkommen trocken.

Wie für ungezählte andere Stoffe, sind alle genannten und weitere Daten über Wasser und sein Verhalten das Ergebnis von Grundlagenforschung im Labor. Die Physikalische Chemie leitet aus den Messergebnissen mathematisch formulierte Gesetze her, die es erlauben den Zustand von Wasser und vielen anderen Systemen bei bestimmten Temperaturen und Drucken vorherzusagen. Die entsprechenden Gleichungen nennt man Zustandsgleichungen.

## Wolken – entstehen, vergehen, bestehen

Die Bildung von Wolken kann sehr verschiedene Ursachen haben. Die meisten Wolken sind Indikatoren für aufwärts gerichtete Luftströme. Aufwärts strebende, mit Wasserdampf noch nicht gesättigte Luft kühlt sich ab, wobei die relative Feuchte ansteigt. Bei der so genannten Taupunkttemperatur erreicht man Sättigung der Luft mit Wasserdampf (100% relative Feuchte). Bei weiterer Abkühlung ist die Luft mit Wasserdampf übersättigt und Wasser scheidet sich in Form von feinsten Tröpfchen ab. Damit ist die Voraussetzung für die Bildung von Wolken gegeben.

Wolken sind sehr vielfältige Gebilde, aber unabhängig von ihrer Form bestehen sie immer aus mikroskopisch kleinen Tröpfchen flüssigen Wassers oder Eiskristallen und mit Wasserdampf gesättigter Luft. Die Bildung dieser kleinen Wassertröpfchen ist kein einfacher Prozess, weil in der Luft keine Wasserfläche vorhanden ist

an der Wasserdampf auskondensieren könnte. Hilfestellung für die Bildung von Wassertröpfchen leisten die Aerosole. Sie sind mikroskopisch kleine Festkörperteilchen, die in der Luft schweben. An ihnen kondensiert der Wasserdampf. Ohne diese winzigen Staubteilchen wäre Wolkenbildung wesentlich seltener. Und auch der Wasserkreislauf, der entscheidend für unser Klima ist, wäre wesentlich langsamer. Die schwebenden Mikrotröpfchen wachsen weiter solange die Luft mit Wasserdampf übersättigt ist. Es entstehen je nach Temperatur und Wachstumsgeschwindigkeit Regentropfen, Schneeflocken oder Hagelkörner.

Die Eigenschaften und das Verhalten von einzelnen, schwebenden Mikrotröpfchen werden auch in Laboratorien für Physikalische Chemie studiert. Dabei interessieren oft die kinetischen Eigenschaften. Wie schnell gefriert oder verdampft ein Tröpfchen?

## Wetter

Der Wasserdampfgehalt in der Luft, die Temperatur und der Luftdruck sind die für die Wolkenbildung entscheidenden Parameter. Sie werden in einem engen Netz von Messstationen laufend registriert und dienen neben anderen Daten zur Erstellung der Wettervorhersage.



Am einfachsten ist die Bildung der Schönwetter-Haufenwolken (Cumulus-Wolken) am Sommerhimmel zu erklären. Sie entstehen, wenn die Luft am Erdboden stark erwärmt wird. Diese warme Luft mit dem darin enthaltenen Wasserdampf steigt auf wie ein Heissluftballon. Sie wird dabei kühler und dehnt sich aus. Weil die kühlere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann wird in einer bestimmten Höhe, wenn die Temperatur der aufsteigenden Luft den so genannten Taupunkt erreicht, Wasserdampf zu mikroskopisch kleinen Tröpfchen kondensieren – es ist eine Wolke entstanden. Sehr kleine Tröpfchen schweben im Aufwind, sie verdampfen und werden neu gebildet. Im inneren Aufwindschlauch sind vertikale Windgeschwindigkeiten von 40 km/h nicht selten, dies ist die Thermik, die Segelflurzeuge bis in sehr große Höhen trägt.

Wenn die aufsteigende Luft sehr feucht ist und die Erwärmung am Boden sehr stark ist, dann entwickeln sich gewaltige Aufwinde, die bis an die Grenze der Troposphäre reichen und zur Bildung von beeindruckenden Wolkenbergen führen, die wir als sommerliche Gewitterwolken wahrnehmen.



In solchen Wolkenbergen werden nicht nur gewaltige Mengen an Wasser transportiert sondern auch sehr große Energiemengen, die bei der Kondensation des Wasserdampfs in der Höhe wieder freigesetzt werden.

Die Übersättigung der Luft mit Wasserdampf wird in vielen verschiedenen Szenarien erreicht, bei denen jedoch immer Temperatur und Luftdruck im beobachteten Gebiet eine wesentliche Rolle spielen.

Der Luftdruck auf der Erdoberfläche ist nicht konstant, es treten zeitliche und lokale Schwankungen auf, sie sind als Hochdruck- und Tiefdruckgebiete Gegenstand des täglichen Wetterberichts. Die Änderungen des Luftdrucks, die damit verbunden sind, bewegen sich zwischen etwa 950 und 1050 mbar. Der Luftdruck schwankt nur um etwa  $\pm 5\%$  gegenüber einem mittleren Wert von 1000 mbar. Trotzdem hat diese kleine Schwankung entscheidenden Einfluss auf das Wetter. In Tiefdruckgebieten rotiert die Luft auf der Nordhalbkugel der Erde entgegen dem Uhrzeigersinn. Durch diese Bewegung wird Luft am Boden angesaugt und in die Höhe befördert, dabei kühlt sie sich ab und es bilden sich Wolken. Da Tiefdruckgebiete oft Durchmesser von mehr als 1000 km erreichen, entstehen dabei große Wolkenfelder, die mit den Tiefdruckgebieten ziehen. Umgekehrt rotieren Hochdruckgebiete im Uhrzeigersinn und befördern trockene Luft aus der Höhe Richtung Erdoberfläche. Dies führt zur Auflösung von Wolken und viel Sonnenschein.

Dieses großflächige Wettergeschehen wird oft durch lokale Besonderheiten stark modifiziert. Sehr bekannt sind die Föhn-Wetterlagen am Rand von Gebirgen. Sie kommen dadurch zustande, dass feuchte wolkenreiche Luft gegen eine Bergkette strömt. Dort wird sie zum Aufsteigen gezwungen und dabei abgekühlt. Die Folge sind Steigungsregen. Die abgekühlte und trockene Luft fällt hinter dem Gebirge ins Tal. Dies führt zur Erwärmung der Luft und zur Wolkenauflösung. Föhnwetterlagen treten nicht nur in den Alpen auf, auch das Aufsteigen der aus Nordwest anströmenden Luft an den Norwegischen Bergen führt zu ausgedehnten wolkenarmen „Föhnlücken“, die oft weit über die Ostsee reichen.

## Der Kreislauf des Wassers

Das Wasser ist auf der Erde ständig in Bewegung. Es wird als Wolken und feuchte Luft in der Atmosphäre transportiert, fällt als Niederschlag zu Boden, fließt in Flüssen und Meeresströmungen.

Man hat abgeschätzt, dass die gesamte Wassermenge der Erde etwa 1350 Millionen Kubikkilometer beträgt, davon befinden sich 97% in den Ozeanen. Täglich verdampfen aus den Ozeanen 875 Kubikkilometer Wasser, dies entspricht der 18fachen Wassermenge des Bodensees. Nur 90% des verdampften Wassers fällt

als Niederschlag unmittelbar ins Meer zurück. Aus Flüssen, Seen und feuchten Böden verdampfen zusätzlich täglich etwa 160 Kubikkilometer Wasser. Obwohl gewaltige Wassermengen verdampfen befinden sich zu jedem Zeitpunkt nur 0.015 Millionen Kubikmeter Wasser in der Atmosphäre. Das ist nur ein Zehntausendstel Prozent der gesamten Wassermenge der Erde. Dies würde nur zu einer mittleren globalen Niederschlagsmenge von 30 l pro qm ausreichen, man misst aber einen Wert von etwa 1000 l pro qm. Dies bedeutet, dass die durch Verdunstung und Kondensation in Umlauf gebrachte Wassermenge pro Jahr mehr als 30mal umgeschlagen werden muss. Ein Cyclus des Wasserkreislaufs zwischen Himmel und Erde dauert etwa 10 Tage.

Um den Kreislauf des Wassers in Betrieb zu halten wird sehr viel Energie benötigt. Sie kommt ausschließlich von der Sonne. Die gesamte Leistung der in der Lufthülle und auf der Erdoberfläche absorbierten Sonnenstrahlung beträgt über 10<sup>17</sup> Watt, das ist rund 4000 mal mehr als der Wärmefluss aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche und ungefähr das 10000fache der globalen Wärmefreisetzung durch menschliche Energienutzung. Etwa ein Drittel der absorbierten Sonnenstrahlung hält den Wasserkreislauf durch Verdunsten von Wasser in Gang.

Der Kreislauf des Wassers macht Leben auf der Erde erst möglich. Er reguliert das Klima auf der Erde. Durch Verdunstung wird die Erdoberfläche gekühlt und für die Vegetation ausreichend Niederschlag bereitgestellt. Leider ist es im Rahmen dieses kurzen Berichts nicht möglich hier weiter ins Detail zu gehen. Ein sehr empfehlenswertes Buch zu diesem Thema ist: P. Ball H<sub>2</sub>O – Biographie des Wassers, Piper-Verlag München 2001 (ISBN 3-492-04156-6)

## Physikalische Chemie

Die Modelle, die zum Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre entwickelt wurden und in verfeinerter Form immer noch entwickelt werden, basieren auf den Ergebnissen von Grundlagenforschung, die über viele Jahrzehnte in zahlreichen Laboratorien durchgeführt wurde. Sie liefert die notwendigen Daten, die in die oben skizzierten Überlegungen einfließen. Erst wenn diese in verlässlicher Form vorliegen kann man daran gehen die komplexen Zusammenhänge der Natur aufzuklären und wirklich zu verstehen. Daher ist Physikalisch-chemische Grundlagenforschung unverzichtbar und dringend notwendig, nicht nur bei Wolken, Wetter, Klima, sondern auch als Voraussetzung für Fortschritte auf vielen anderen Gebieten wie Nanotechnologie, Biosensorik, Energiegewinnung und Materialforschung.

Weitere Auskunft zu diesem Thema und dem Fach Physikalische Chemie:

Prof. Dr. H. Baumgärtel, Institut für Chemie der Freien Universität Berlin

Takustr.3 14195 Berlin, Tel 030/83852095

<http://www.chemie.fu-berlin.de/fb/iptc/index.html>