

*Stephanie Neppel, Katharina Flieser, Nico Marx*

## Wolkenphysik

Man muss an den meisten Tagen nur in den Himmel blicken und entdeckt sie: Wolken. Fast schon majestätisch schweben sie über unseren Köpfen und bilden die verschiedensten Formen. Aber wie entstehen Wolken eigentlich?

Um das zu verstehen, erläutert der Text zuerst, was Wolken sind und welchen Nutzen sie für uns und unseren Planeten haben. Anschließend werden die physikalischen Voraussetzungen für das Entstehen von Wolken betrachtet. Hierfür muss man sich zunächst ansehen, wie Wasser in die Luft gelangt und welche Prozesse dort damit vonstattengehen. In diesem Zusammenhang sind unter anderem der Verdampfungs-, der Verdunstungs- und der Kondensationsprozess relevant. Abschließend wird die letztendliche Entstehung von Wolken erklärt und ein Ausblick auf den Stand der Forschung gegeben, der die klimatische Bedeutsamkeit von Wolken unterstreicht.

### Was sind Wolken und welchen Nutzen haben sie?

Wolken stellen den Hauptregler für die Temperatur auf der Erde dar. Sie reflektieren einen Teil der Sonnenstrahlen zurück ins All und fungieren an anderer Stelle als eine Art Decke, indem sie die Energie der Wärmestrahlung an der Erdoberfläche verharren lassen. Zusätzlich helfen sie dabei die Solarenergie auf der Erdoberfläche zu verteilen. Sie tragen demnach einen essenziellen Teil zum Klima der Erde bei.

Wolken sind Ansammlungen von in der Luft schwebenden, winzigen Wassertröpfchen und Partikelchen (Eiskristalle, Staub und viele mehr, allgemein sogenannte *Aerosole*). Die Durchmesser der Teilchen belaufen sich meist auf 10 – 20  $\mu\text{m}$  und erreichen selten bis zu 200  $\mu\text{m}$ . Wie auch bei flüssigem Wasser kann Licht das Luft-Tröpfchengemisch durchdringen. Dabei wird es sowohl gestreut als auch reflektiert. Die diffuse Streuung und die Reflexion in alle Richtungen machen Wolken für das menschliche Auge sichtbar, obwohl flüssiges Wasser eigentlich lichtdurchlässig und damit „durchsichtig“ ist.

Doch wie kommt es zu diesen Tröpfchen- und Partikelansammlungen, die wir am Himmel sehen und Wolken nennen? Wie entstehen Wolken?

## **Welche Bedingungen müssen für die Entstehung von Wolken erfüllt sein?**

Damit sich Wolken bilden können, müssen mehrere Randbedingungen günstig zusammenspielen: Es müssen Phasenübergänge von Wasser zwischen seinen Aggregatzuständen ablaufen, es müssen ein geeigneter Luftdruck und eine geeignete Luftfeuchtigkeit herrschen und die Umgebungstemperatur muss passend sein. Welche Rolle den einzelnen Randbedingungen jeweils zukommt, wird im Folgenden Schritt für Schritt erläutert.

Eine erste Grundvoraussetzung für die Entstehung von Wolken ist das Vorhandensein von Wasser in der Luft. Damit ist gemeint, dass Atemluft und Wasserdampf nebeneinander bestehen. Das ist auch so gut wie immer der Fall, selbst wenn man das nicht sehen kann. Jedoch: Beim Atmen fällt bisweilen ein erhöhter Wasserdampfgehalt in der Umgebung auf, wenn der Wasserdampf der warmen Atemluft in der kühleren Umgebung zu Tröpfchen kondensiert. Eine analoge Beobachtung kann man an kalten Wintertagen machen, wenn sich an der Innenseite einer kalten Glasscheibe Tröpfchen bilden.

## **Wie kommt Wasser in die Luft?**

Damit sich Wasser mit dem Gasgemisch Luft verbindet, muss das Wasser selbst auch gasförmig sein. Dafür gibt es zwei bekannte Übergänge: verdampfen und verdunsten. Die Verdampfung kann bei der Wolkenentstehung kaum beteiligt sein, da der Verdampfungsprozess unter Atmosphärendruck auf Meereshöhe erst bei etwa 100 °C, also am sog. Siedepunkt einsetzt. Verdunstung hingegen tritt bereits bei Temperaturen unter dem Siedepunkt auf. Nämlich wenn die Bewegungsenergie einzelner Moleküle größer wird als die Bindungsenergie von flüssigem Wasser. Die Moleküle im flüssigen Wasser besitzen eine Bindungsenergie, welche die Flüssigkeit zusammenhält. Die *mittlere* Bewegungsenergie der einzelnen Moleküle ist dabei kleiner als die Bindungsenergie. Da die einzelnen Bewegungsenergiewerte statistisch um diesen mittleren Energiewert verteilt sind, können immer wieder einzelne Moleküle vorhanden sein, deren Bewegungsenergie größer ist als die Bindungsenergie. Diese Moleküle lösen sich aus der flüssigen Phase und vermischen sich als gasförmiges Wasser mit der umgebenden Luft.

## **Was geschieht mit dem Wasser in der Luft?**

Zuvor wurde schon erwähnt, dass sich Wasser an einer kalten Glasscheibe niederschlagen kann und das sogenannte Kondenswasser als Wassertröpfchen sichtbar wird. Der Name kommt von der Aggregatzustandsänderung von gasförmig zu flüssig, der Kondensation. In der Luft finden gleichzeitig Verdampfungs-/Verdunstungs- und Kondensationsprozesse statt, d.h. flüssiges Wasser wird gasförmig und Wasserdampf wird zu Wassertröpfchen. Das „Bestreben“ des Wasserdampfs zu kondensieren, nennt man „Wasserdampfpartialdruck“. Wenn genau soviel flüssiges Wasser verdampft/verdunstet, wie Wasserdampf kondensiert, dann ist das System im Gleichgewicht. Das System erreicht dann den sogenannten Sättigungsdampfdruck. Das Verhältnis zwischen herrschendem Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck heißt Sättigung. Wenn die Sättigung mehr als 100% beträgt, also der Dampfdruck größer ist als der Sättigungsdampfdruck, spricht man von einer Übersättigung. Eine Sättigung unter 100% heißt dementsprechend Untersättigung.

## Wie kommt es zu Kondensation in der Luft?

Damit die Moleküle im gasförmigen Wasser kondensieren, muss Übersättigung herrschen. Um das Zustandekommen einer übersättigten Umgebung nachzuvollziehen, betrachtet man ein bodennahes Luftpaket, dessen Temperatur höher als die der umgebenden Luft ist. Das Luftpaket hat damit eine geringere Dichte als seine Umgebung und steigt auf. Läuft der Steigprozess schnell genug ab, so können wir von einem adiabatischen Vorgang sprechen. Das bedeutet, es findet kein Wärmeaustausch zwischen steigendem Luftpaket und Umgebung statt. Da der Luftdruck mit steigender Höhe abnimmt, dehnt sich das Luftpaket beim Steigen aus und verrichtet dabei Arbeit gegen den lokalen Luftdruck. Da der Prozess als adiabatisch angenommen wird, also keine Energie in Form von Wärme nach außen abgegeben wird, sinkt die innere Energie, also die Bewegungsenergie der einzelnen Moleküle im Luftpaket. Dies hat zur Folge, dass die Luftteilchen im Schnitt langsamer werden. Dies führt wiederum dazu, dass sich das Luftpaket abkühlt. Durch die Abkühlung kann Kondensation auftreten und Wasser geht von der gasförmigen in die flüssige Phase über. Man erinnere sich: Bei fallender Temperatur wird die *mittlere* Bewegungsenergie der Moleküle geringer. Dadurch gibt es mehrere Moleküle, deren Bewegungsenergie niedriger als die Bindungsenergie flüssigen Wassers ist und Kondensation setzt ein. Das Luftpaket steigt so lange auf, bis sich das Luftpaket hinsichtlich Temperatur und Dichte der Umgebung angeglichen hat – es befindet sich dann im „Zustand des thermischen Gleichgewichts“. So ist die Höhe bestimmt, auf die Wolken maximal steigen. Allerdings geschieht die Kondensation von reinem Wasserdampf nicht so einfach wie man annehmen könnte. Erst bei einer Übersättigung von etwa 300% beginnt die Kondensation. Diese Übersättigungswerte sind in der Atmosphäre kaum möglich.

Allerdings geschieht die Kondensation von reinem Wasserdampf nicht so einfach wie man annehmen könnte. Erst bei einer Übersättigung von etwa 300% beginnt die Kondensation. Diese Übersättigungswerte sind in der Atmosphäre kaum möglich.

## Wie bilden sich denn nun Wassertröpfchen in der Luft?

Hier spielen Aerosole eine entscheidende Rolle. Aerosole sind 10 nm – 10 µm große Teilchen. Sie bestehen oft aus Schwefelverbindungen oder auch aus Staub, Salzkristallen, Ruß oder organischen, pflanzlichen Molekülen. Die Konzentration von Aerosolen in der Luft unterliegt starken regionalen Schwankungen (z.B. ländliche Gegend gegenüber Städten). Allgemein nimmt sie mit zunehmender Höhe ab. Aerosole begünstigen die Kondensation von Wasser, indem sie Wassermoleküle binden und somit eine spontane Tröpfchenentstehung in Gang bringen. Sie setzen somit den Sättigungsdampfdruck herab. Allerdings ist noch nicht abschließend geklärt, wie groß ihr Einfluss auf die Wolkenbildung tatsächlich ist.

## Welche aktuellen Forschungen zu Wolken gibt es?

Man weiß mittlerweile, dass es ohne Aerosole keine Wolken gäbe und unser Planet für uns unbewohnbar wäre. Allerdings wird unter anderem noch untersucht, woher genau all die lebensbewah-

renden Aerosole kommen. 2014 wurde bei einem Experiment des CLOUD-Projekts im CERN das erste Mal entdeckt, welchen signifikanten Einfluss Aerosole auf die Bildung von Wolken haben. Mit CLOUD ist es möglich unter vollkommen kontrollierbaren Randbedingungen Wolken entstehen zu lassen. Außerdem können die Forscher\*innen dort untersuchen wie wolzig („cloudy“) unsere Erde vor der Industrialisierung war und lassen uns damit noch besser den menschengemachten Klimawandel verstehen. Denn man hat herausgefunden, dass Pflanzen organische Moleküle (Aerosole, in diesem Fall sog. HOMs – „highly oxygenated molecules“) in die Luft befördern. Damit wurde ein weiterer wichtiger Einfluss von Pflanzen als „Erhalter des Klimas“ entdeckt. Denn wie bereits zu Beginn des Textes erklärt wurde, sind Wolken zu großen Teilen für die Regulierung der Erdtemperatur verantwortlich.

## Literaturverzeichnis

Diese Quellen liegen einerseits dem Text zugrunde und werden andererseits für die vertiefende Lektüre empfohlen:

CERN (o. D.). *CLOUD*. About the CLOUD-experiment at CERN. URL: <https://home.cern/science/experiments/cloud> (besucht am 17. 06. 2022).

Häckel, Hans (2012). *Meteorologie*. 7., korr. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.

Kraus, Helmut (2004). *Die Atmosphäre der Erde: eine Einführung in die Meteorologie*. 3., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Neppl, Stephanie (in Vorb.). „Perspektivenübernahme im Physikunterricht. Explorative Interviewstudie zu einer Seminarkonzeption mit dem Schwerpunkt Perspektivenübernahme bei der Planung von Physikunterricht“. Regensburg: Universität Regensburg.

Roedel, Walter (2000). *Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre*. 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Yau, M. K. and R. R. Rogers (1996). *A Short Course in Cloud Physics*. Vol. 113. International Series in Natural Philosophy. Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier.