



Wie kühlt man Atome?

Laserkühlung

Sara: Jetzt haben wir soviel über Temperatur und Kälte gesprochen, dass die Frage wirklich nahe liegt, wie man diese 0 K erreichen will. Du hast mir ja sehr deutlich gemacht, dass diese Temperatur in der Natur nicht auftritt, damit scheint sie für mich auch völlig unrealisierbar.

Anja: Das kann ich gut verstehen. Da hilft auch das, was du bisher an Kühlmethoden kennst nicht weiter, aber dennoch ist das Prinzip eigentlich gar nicht so schwer zu begreifen. Wir haben ja auch beim Vakuum schon davon gesprochen, dass dieses eine Isolation von der Umgebung darstellt. Aber das allein kann natürlich nicht die Rubidium-Atome auf den absoluten Nullpunkt abkühlen; das Vakuum an sich kann hier nur bewirken, dass seine Temperatur unter der Raumtemperatur liegt.

Sara: Ja, das habe ich schon so weit verstanden: das Vakuum unterstützt diese kalte Temperatur, wenn sie erstmal erreicht worden ist, oder?

Anja: Genau, so kann man es ausdrücken. Aber jetzt mal zu dem Geheimnis dieser unsagbar kalten Atome: zunächst fliegen sie in unserem Vakuum völlig frei umher, nur begrenzt durch die Geometrie der Vakuumzelle. Zu diesem Zeitpunkt sind es noch sehr viele Atome. Bei der Laserkühlung, die ich dir jetzt erklären will, geht es, wie der Name schon sagt, um Laser. Durch sie sollen die Atome gekühlt werden, auch wenn dir das nicht sofort einleuchtet. Man kann...

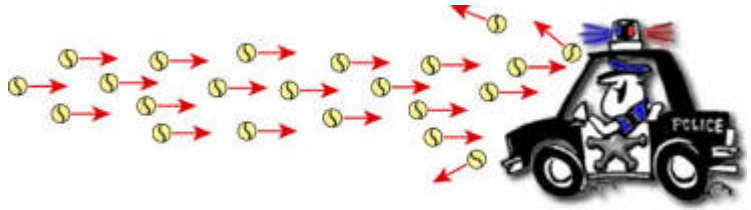
Sara: Halt mal, das widerspricht sich ja in sich! Ich weiß aus eigener Erfahrung, dass bei einer Lampe, die ich in meinem Zimmer anschalte, die Glühbirne ganz heiß wird und somit auch Wärme abstrahlt. Wie soll man denn so Atome kühlen? Du willst mich wohl auf den Arm nehmen!

Anja: Nein, nein, warte mal ab, bis du mehr darüber weißt, erst dann kann es dir klarer werden. Deine Erfahrung mit der Lampe ist auch nicht falsch, nur mit Atomen gibt es noch einen anderen Effekt, wenn man sie mit einem Laser bestrahlt. Die Atome sind ja so leicht, ihre Masse beträgt ca. 10^{-24} Gramm, also 23 Nullen nach dem Komma, dann eine Eins. Für sie bedeutet diese Lichtstrahlung eine Art Kraft, die durch die Photonen, aus denen das Licht besteht, wirkt.

Sara: Oh je, jetzt hagelt es ja Begriffe, mit denen ich nichts anfangen kann. Dieses Thema scheint mir reichlich kompliziert zu sein.

Anja: Ganz mit der Ruhe, das schaffen wir schon! Ich würde sagen, du stellst dir den Laser als eine besonders starke Lichtquelle vor, sie würde dich ganz stark blenden. Man darf auch den Strahl nicht auf sein Auge richten, das kann irreparable Schäden anrichten, wie zum Beispiel die Blindheit. Licht besteht aus diesen Photonen, ganz winzigen, masselosen Teilchen.

Wenn man nun mit diesem Laser auf die fliegenden Atome strahlt, dann ist es wie wenn sie mit kleinen Kugeln beschossen werden. Ein schönes Bild dazu ist ein Auto, das auf der



Autobahn mit hoher Geschwindigkeit fährt, und entgegen der Fahrtrichtung mit Tennisbällen beschossen wird. Zehn von ihnen haben noch keinen Effekt, das entspräche einem sehr, sehr schwachen Laserstrahl mit ganz wenigen Photonen. Stell dir aber vor, es fliegen 100.000 Tennisbälle gegen das Auto, dann kann dieses schon abgebremst werden. Nun kann man es so einrichten, dass die Tennisbälle von allen Seiten kommen. Damit erreicht man letztendlich, dass das Auto zum Stehen kommt, denn aus allen Richtungen kommt eine Kraft, die einer möglichen Bewegung entgegenwirkt.

Sara: Das gefällt mir ja jetzt schon viel besser. Wenn mich jemand so bewerfen würde, hätte ich auch keine Chance mehr, mich irgendwohin zu bewegen.

Anja: Ich sehe schon, du hast begriffen! Im übertragenen Sinn ist also unser Auto das Atom und die Quelle, die die Tennisbälle aussendet, ist unser Laser. Und so kannst du es dir also vorstellen, dass die Atome abgebremst werden, also ganz stark an Geschwindigkeit verlieren. Nun gut, jetzt ist die Frage, was wir durch dieses Abbremsen erreicht haben.

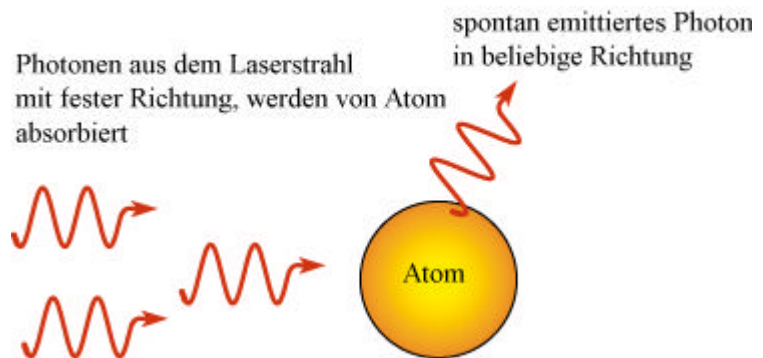
Sara: Ja, das frage ich mich aber auch. So weit ich mich erinnere, gab es da einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Geschwindigkeit: Wie war das noch mal? Ein kaltes Atom ist schnell oder langsam? Oder warte mal, vielleicht fällt es mir ja noch ein... Ich glaube es war langsam, weil Kälte ja eine geringere Energie bedeutet, sodass es sich nicht so schnell bewegen kann. Genau, dann passt ja alles zusammen! Ich bremse die Atome ganz stark ab, dann werden sie automatisch kälter; ist das so richtig?

Anja: Sehr schön, du hast vollkommen Recht. Nun bist du sogar selbst darauf gekommen, das freut mich. So funktioniert also der Kühlmechanismus. Nachdem du das so gut verstanden hast, können wir das ja noch ein wenig physikalischer betrachten - aber keine Angst, auch das kann man mit dir vertrauten Beispielen erklären. Dazu musst du wissen, dass ein Atom Energie, wie in unserem Fall durch ein Photon, aufnehmen kann. Aber da gibt es eine Eigenheit: Das Atom ist wählerisch, es nimmt nur bestimmte Energiewerte auf. So wie du auch nicht Schuhe in irgendeiner Größe kaufst, sondern genau auswählst. Der einzige Unterschied zwischen dir und dem Atom ist, dass dieses mehrere (Schuh-) Größen zur Auswahl hat, es also nicht nur eine bestimmte Energie aufnehmen kann, sondern vier oder mehr.

Sara: Aha, das ist ja interessant... Und wie schaut das dann aus, wenn ein Atom Energie aufnimmt?

Anja: Das Photon wird von dem Atom verschluckt und dieses hat zu seiner eigenen, ursprünglichen Energie noch die des Photons dazu bekommen. Der Impuls des Photons ist wie eine Kraft auf das Atom, das ihm also einen Stoß gibt. Das Entscheidende ist, dass der Stoß in die Richtung erfolgt, in die das Photon fliegt. Es bleibt allerdings nicht in dem Atom, sondern wird kurz darauf wieder ausgespuckt, aber in eine völlig

willkürliche Richtung. Dabei wird der Impuls des Atoms zwar wieder reduziert, aber wenn es in einer Sekunde mehrere Millionen Photonen aufnimmt und wieder ausspuckt, bleibt nur die Kraft übrig, die beim Verschlucken auftritt. Das Ausspucken findet ja in einer völlig willkürlichen Richtung statt, einmal nach oben, unten, rechts, links... Das heißt es wird einmal nach oben, unten, rechts, links gestoßen, aber bei so vielen Photonen heben sich diese Kräfte im Mittel weg. Da die Kraft auf das Atom beim Verschlucken eine feste Richtung hat, wird nur sie ständig aufsummiert und führt zu einer signifikanten Kraft, der Spontankraft.

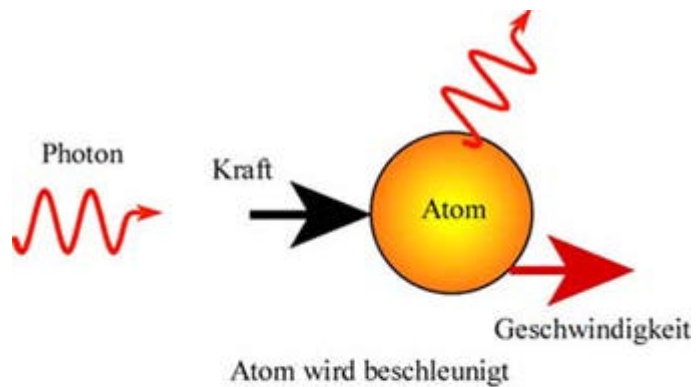


Sara: Naja, so einfach ist das ja nicht, aber ich denke, ich habe es so weit verstanden. Wird die Richtung der Photonen denn durch den Lichtstrahl festgelegt? Und wie mache ich es, dass die Photonen die richtige Energie haben?

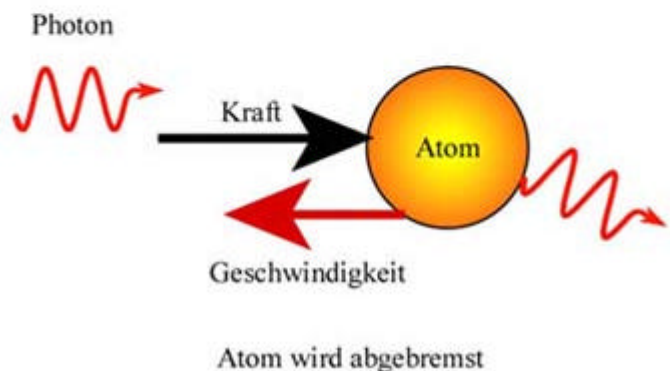
Anja: Ja, mit der ersten Frage hast du Recht: Strahlt man das Licht natürlich ständig von einer anderen Seite ein, hat man effektiv nicht viel von dieser Spontankraft, dann hebt auch sie sich weg. Die Energie der Photonen wird durch die Farbe des Laserlichtes bestimmt, rotes Licht ist energieärmer als blaues.

Sara: Okay, das leuchtet mir ein. Aber wenn das Atom jetzt in der gleichen Richtung wie das Photon fliegt, dann wird es ja durch diese Spontankraft erst recht angetrieben ?

Anja: Genau, da hast du gut mitgedacht! Das wollen wir ja gar nicht erreichen, es soll ja langsamer werden! Was ist dann die Konsequenz für uns?



Sara: Da fällt mir das Auto ein: Die Photonen müssen entgegen der Fahrtrichtung des Atoms, du weißt schon wie ich das meine, fliegen oder das Atom fährt den Photonen entgegen.



Anja: Genau! Wir müssen also das Atom auf den Laser zufliegen lassen. Dann hat die Spontankraft eine bremsende Wirkung. Jetzt haben wir nur noch ein Problem: Wenn wir 10^{12} Atome haben, die sich in unserem Vakuum völlig chaotisch bewegen, können wir schlecht verhindern, dass gelegentlich die Atome in die falsche Richtung fliegen. Es sollte also so sein, dass das Atom das Photon nur aufnimmt, wenn es sich auf es zu bewegt. Hier hilft uns der Doppler-Effekt, den es für Schall und Licht gibt, weiter: Den kennst anschaulich von dem Krankenwagen, denn wenn er auf dich zufährt, hört sich die Sirene höher an, als wenn er neben dir steht, das heißt, du nimmst mit dem höheren Ton eine höhere Frequenz wahr. Das Gegenteil ist der Fall, wenn er von dir wegfährt. Da dieser Effekt auch für ein Photon, das auf einen Laser zufliegt, auftritt, nutzen wir das aus. Also stellen wir den Laser so ein, dass er Photonen mit niedrigerer Energie, als der, die vom Atom geschluckt wird, aussendet. Fliegt das Atom nun auf das Photon zu, meint es genau die richtige Energie zu sehen und verschluckt dieses erfreut.

Sara: Puh, das war jetzt gar nicht so leicht. Aber das mit dem Krankenwagen ist mir schon aufgefallen, nur habe ich mir darüber keine Gedanken gemacht. Jetzt wirkt also die Kraft, die durch das Verschlucken der Photonen in eine bestimmte Richtung zeigt, entgegen der Bewegungsrichtung des Atoms und bremst es letztendlich ab.

Anja: Sehr schön. Machen wir das nun aus allen Richtungen, genauer mit sechs Laserstrahlen, so können wir alle Atome, egal wohin sie in unserer Vakuumzelle fliegen, abbremsen und somit kühlen. Mit diesem Verfahren kann man die Rubidiumatome auf ca. $40 \cdot 10^{-6} \text{ K} = 40 \mu\text{K}$ abkühlen, weiter leider nicht. Die Geschwindigkeit der Atome ist da noch fast 10 cm/s. Das insgesamt leichte Zittern

der Atome, was bei dem Ausspucken der Photonen als Resteffekt übrig bleibt, verhindert das Erreichen noch tieferer Temperaturen.

Sara: So, also für heute reicht es mir, das war ja gedankliche Schwerstarbeit; das muss ich erst noch verdauen. Aber spannend ist das ganze schon: Wenn ich mir vorstelle, dass mit Licht kühlen kann, das ist wirklich eine besondere Erfindung. Ich kann nur hoffen, dass dieses Verdampfungskühlen ein wenig einfacher ist.

Anja: Da kann ich dich wirklich beruhigen, da stecken weniger Schwierigkeitsgrade dahinter.

Sara: Na schön, da kann ich mich ja weiter über die Bose – Einstein-Kondensation informieren - sie macht mich sowieso immer neugieriger.

[\[BEC-Home\]](#) [\[Bose\]](#) [\[Einstein\]](#) [\[1924-Story\]](#) [\[1995-Story\]](#) [\[Kondensat\]](#)