

## Wie misst man Temperaturen am absoluten Nullpunkt?

Der absolute Nullpunkt liegt bei  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Das weiß man jetzt allerdings nicht deshalb, weil man den schon mal mit einem Thermometer gemessen hätte; den absoluten Nullpunkt kann man nur berechnen. Dazu gibt es verschiedene Wege.

Schon im 17. Jahrhundert hat man beobachtet, dass sich ein Gas ausdehnt, wenn man es erwärmt. Wenn man es abkühlt, zieht es sich zusammen. Das folgt einem ziemlich einfachen Gesetz: Je niedriger die Temperatur, desto kleiner das Volumen. Als man diesem Zusammenhang auf die Schliche kam, konnte man ausrechnen: Wie kalt müsste ein Gas sein, damit das Volumen auf null zusammenschrumpft? Da kam man auf einen Wert von  $-240^{\circ}\text{C}$ . Wohlgemerkt: Das waren rein theoretische Berechnungen, niemand hat diese Temperatur auch nur annähernd irgendwo „gemessen“.

Für das Jahr 1699 war das schon eine ganz gute Schätzung. Bald war allerdings klar, dass die Rechnung so nicht funktioniert. Denn man kann sich zwar vorstellen, dass ein Gas schrumpft – aber dass das Volumen „null“ beträgt, würde ja bedeuten, dass das Gas gar nicht mehr vorhanden wäre. Das ist erstens unlogisch und zweitens realitätsfremd. Denn jedes Gas wird beim Abkühlen ab einer bestimmten Temperatur etwas ganz anderes machen, nämlich seinen Aggregatzustand ändern, sich also verflüssigen oder sogar gefrieren.

Man hat den absoluten Nullpunkt dann auf eine andere Art ermittelt. Temperatur ist ja, physikalisch betrachtet, ein Ausdruck für die durchschnittliche Bewegung der einzelnen Teilchen. Beim Gas sind es die Bewegungen der einzelnen Moleküle, in einem Festkörper das Zappeln der Atome. Alle Atome haben eine Eigenbewegung, und auch diese Eigenbewegung wird immer langsamer, je kälter es wird. So hat man dann gesagt: Der absolute Nullpunkt wäre dann erreicht, wenn die Eigenbewegung aufhört, wenn sich die Atome nicht mehr bewegen, also alles total eingefroren ist.

Und da hat man auch – zunächst wieder nur rechnerisch – den Wert  $-273,15^{\circ}\text{C}$  als „absoluten Nullpunkt“ ermittelt. Und parallel hat man Verfahren entwickelt, um immer niedrigere Temperaturen zu erreichen. Man hat Gase verflüssigt, sogar Wasserstoff und Helium, was wirklich eine große Leistung war: Man muss Helium auf  $4^{\circ}\text{C}$  über dem absoluten Nullpunkt – also  $-269^{\circ}\text{C}$  – runterkühlen, damit es sich verflüssigt. Das ist gelungen, man kann heute im Labor Temperaturen von Bruchteilen von Graden über dem absoluten Nullpunkt erzeugen. Man weiß aber auch: Man kann diesem Nullpunkt zwar beliebig nahe kommen, doch erreichen kann man ihn nicht.

*Aber wie misst man überhaupt die Temperaturen von so kalten Gasen?*

Das geht natürlich nicht mit der Art von Thermometern, die wir kennen. Die beruhen ja darauf, dass sich eine Flüssigkeit unter Temperatureinfluss ausdehnt bzw. zusammenzieht. Bei so tiefen Temperaturen ist aber Quecksilber, oder was man sonst nehmen kann, längst gefroren.

Tiefere Temperaturen kann man bestimmen, indem man einen Platindraht hinzufügt und den elektrischen Widerstand misst. Auch das ist ein physikalisches Gesetz: Je kälter der Draht, desto schwächer der Widerstand. Doch diese Methode hat ebenfalls Grenzen. Wenn man dem absoluten Nullpunkt schon ganz nah ist, etwa bei 0,1 Grad über dem Nullpunkt, dann nutzt man spezielle Kristalle, die radioaktives Kobalt enthalten. Das Kobalt zerfällt mit einer bestimmten Rate zu Nickel, dabei entsteht Gammastrahlung. Und je weniger Gammastrahlung man misst, desto näher ist man dem absoluten Nullpunkt gekommen.

## Wie wird ein Smartphone gekühlt?

So wie ein Notebook erwärmt sich ein Smartphone, wenn es stark beansprucht wird. Nicht nur die immer leistungsstärkeren Prozessoren setzen Energie um, sondern auch das eingebaute Modem, das die Mobilfunkverbindungen herstellt. Der Kühlungsbedarf bei Smartphones ist so in den letzten Jahren weiter gestiegen. Doch anders als bei einem Notebook läuft bei einem Smartphone kein Gebläse an, wenn es warm wird.

Stand der Technik ist eine sogenannte Heatpipe, also ein Röhrchen, das die Wärme von innen nach außen abführt. Konkret sieht das so aus: Im Inneren des Smartphones befindet sich nahe dem Prozessor eine längliche Mulde. In ihr wiederum liegt ein Kupferdraht – gerade mal einen halben Millimeter dünn. Er ist umgeben von einem Kupfergewebe. Zwischen Draht und Gewebe befindet sich eine Flüssigkeit, die verdampft, wenn sie sich erwärmt.

Verdampfende Flüssigkeiten entziehen der Umgebung Wärme – das führt zu einer Abkühlung. Allerdings ist natürlich nicht unendlich viel Flüssigkeit vorhanden, die verdampfen könnte. Deshalb ist zusätzlich eine Zirkulation eingebaut: Der beim ersten Verdunsten entstandene Dampf strömt, da er sich naturgemäß beim Erhitzen ausdehnt, an das kühlere Ende des Wärmeröhrchens, wo er wieder kondensiert und die Wärme nach außen abgibt – und das alles auf kleinstem Raum.

## **Warum benötigen Schallwellen ein Medium, während sich Wärme-, Licht- oder Radiowellen auch im Vakuum ausbreiten?**

Schallwellen sind im Grunde Druckwellen. Wenn jemand in eine Trompete bläst, dann macht die Trompete mit der Luft das Gleiche wie ein Saunameister, der das Handtuch schwingt und so einen kurzen Windstoß erzeugt, der sich durch den Raum ausbreitet: Der Trompeter bringt die Luftsäule im Instrument zum Schwingen, und diese Schwingungen übertragen sich auf die Luft.

Der Unterschied zum Saunameister ist: Die Trompete erzeugt nicht nur *einen* Windstoß, eine Druckwelle, sondern Hunderte kleine in jeder einzelnen Sekunde. Man kann sich das so vorstellen, dass die Luft kurz verdichtet wird und sich kurz darauf wieder entspannt. Dabei gibt sie die Energie – den Druck – an die benachbarte Luftschicht wieder ab. Diese Druckwellen sind so schwach, dass wir sie nicht als Windstoß spüren. Dafür ist unser Ohr darauf ausgelegt, diese schwachen Druckwellen wahrzunehmen, sie in Nervenimpulse zu verwandeln, aus denen unser Gehirn wiederum etwas erzeugt, was wir als „Töne“ wahrnehmen. Je schneller die Luft schwingt, je höher die Frequenz, desto höher ist der Ton.

Das Entscheidende dabei: Für die Schallübertragung ist Luft bzw. allgemein ein Medium nötig. Es kann auch Wasser oder sonst etwas sein, aber es muss eine Masse geben, die sich verdichten und entspannen kann. Sonst kann sich der Schall nicht fortpflanzen.

Wärme und Radiowellen dagegen sind elektromagnetische Wellen, genau wie Licht- oder Röntgenstrahlung. Sie breiten sich anders aus. Bei Druck- oder Stoßwellen wackelt die Luft gewissermaßen ganz schnell „vor und zurück“. Physiker sprechen hier von „Longitudinalwellen“ – weil sich Druckwellen durch die Länge des Raums ausbreiten. Elektromagnetische Wellen haben mehr Ähnlichkeit mit einem Seil, das man durch Auf-und-ab-Bewegungen zum Schwingen bringt, sodass das Seil Wellen bildet, die sich durch den Raum fortpflanzen. Hier sprechen Physiker von Transversalwellen. So ein Seil könnte man auch im Vakuum – oder im Weltraum – zum Schwingen bringen; dazu braucht es kein äußeres Medium. Und so ungefähr kann man sich das auch mit elektromagnetischen Strahlen vorstellen. Deren Schwingungen ähneln mehr denen eines schwingenden Seils als einer Druckwelle in der Luft oder im Wasser; deshalb brauchen sie kein Medium.

*Nun gibt es bei Radiowellen, Licht- oder Wärmestrahlen aber bekanntlich kein „Seil“ – was schwingt denn da?*

Was schwingt, sind die elektrischen und magnetischen Felder. Die sind natürlich nicht ganz so anschaulich wie ein Seil. Wir kennen das Magnetfeld der Erde – das ist ein großes Feld, das sich um den Globus spannt. Genau sind uns elektrische Felder zum Beispiel zwischen positiv und negativ geladenen Teilchen bekannt. Und diese Felder gibt es eben auch im Kleinen – und sie können schwingen. Je nachdem, wie schnell sie schwingen, handelt es sich um Wärmestrahlung, um Radiowellen, Licht oder um Röntgenstrahlen. Das ist abstrakt, aber die Art der Welle ist in beiden Fällen die gleiche wie die Welle, die sich entlang eines schwingenden Seils fortpflanzt. Deshalb braucht sie – anders als der Schall – kein äußeres Medium.

## **In einem Tunnel ist der Radioempfang beim Reinfahren oft besser als beim Rausfahren – warum?**

Wenn Sie in einen längeren Tunnel einfahren, kann es tatsächlich passieren, dass Sie noch nach 50 bis 100 Metern Empfang haben. Jetzt könnte man denken, dass der Empfang am Ende des Tunnels schon 50 bis 100 Meter vor der Ausfahrt wiederkommt; tut er aber nicht.

Ein möglicher Grund ist die Position der Antenne. Manche Antennen sind hinten am Auto montiert, etwa an der Heckscheibe. Auch Antennen auf dem Dach sind oft nach hinten ausgerichtet. Diese Antennen empfangen Radiowellen von hinten besser als von vorne. Und wenn Sie in einen Tunnel fahren, kommen die Radiowellen nun einmal von hinten, deshalb hält der Empfang an. Wenn ich dagegen hinausfahre, kommen die Wellen von vorne und werden nicht so gut empfangen.

Das kann ein Grund sein. Ein zweiter Grund ist, dass Autoradios oft so eingestellt sind, dass sie, wenn der Empfang weg ist, anfangen zu suchen, ob sie den Sender auf einer alternativen Frequenz finden können. Das führt zu folgender Situation: Sie fahren in den Tunnel, der Empfang ist noch gut und bleibt so lange erhalten, bis das Signal endgültig weg ist. Dann fängt das Radio an, nach alternativen Frequenzen zu suchen. Irgendwann nähern Sie sich wieder Ausgang. Dort ist das Signal zwar schon wieder da – aber das Radio sucht vielleicht gerade in einem ganz anderen Frequenzbereich und findet den eingestellten Sender erst mit Verzögerung. Auch das kann ein Grund für diese ungleiche Situation beim Rein- und Rausfahren sein.

Manchmal kommt es sogar vor, dass ein Radioprogramm im ganzen Tunnel zu empfangen ist, ein anderes gar nicht. Das liegt meist daran, dass in diesem Tunnel ein zusätzlicher Sender installiert ist, speziell für die Autofahrer. Aber dieser Sender verbreitet in der Regel nur ein bis zwei Programme, vor allem solche mit Verkehrsfunk. Welche Programme das sind, das entscheidet der Tunnelbetreiber, also meist die Stadt oder das jeweilige Land.

## Warum ist es im Gotthardtunnel so warm?

Es stimmt: Selbst wenn man im tiefsten Winter durch den Gotthardtunnel Richtung Italien fährt, herrschen im Tunnel hochsommerliche Temperaturen. Das ist die Erdwärme!

Man könnte zunächst glauben, dass es vor allem die Abwärme der Autos ist, die sich im Tunnel staut und die hohen Temperaturen erzeugt. Doch dass das nicht sein kann, wird leicht klar: Erstens sind Autos, die in den Tunnel hineinfahren zwar warm, aber auch nicht so warm, dass sie den Tunnel dermaßen aufheizen können. Im Winter schon gar nicht. Wenn sie im Leerlauf stehen, mögen sie eine warme Kühlerhaube haben, die ebenfalls Wärme an die Umgebung abgibt. Das würde allerdings nicht reichen, denn der Rest des Autos und seiner Karosserie ist kalt. Und die Luft im Tunnel kann durch die Abwärme nicht wärmer werden als die Autos selbst sind.

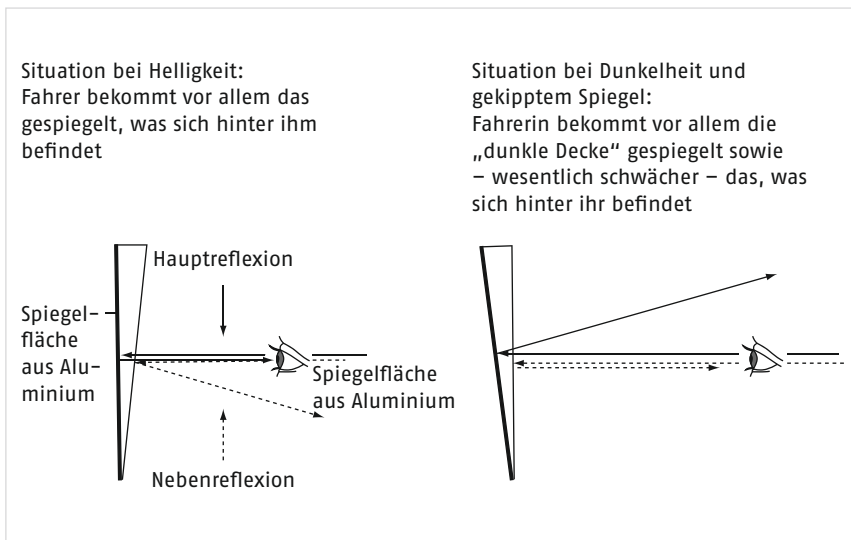
Das zweite Gegenargument: Nicht nur der Autotunnel ist innen warm, sondern auch der Eisenbahntunnel – wo überhaupt keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren unterwegs sind. Und doch liegen im neuen Gotthard-Basistunnel die Temperaturen bei 40 °C und mehr. Und sie wären noch höher, wenn der Tunnel nicht entlüftet und auf diese Weise gekühlt würde.

Diese Wärme kommt tatsächlich aus dem Erdinneren. Denn die Temperatur nimmt in der Erdkruste alle 100 Meter um 3 °C zu. Beim Gotthard liegen mehr als 1100 Meter Gebirge über dem Autotunnel – das entspricht also einer Temperaturzunahme gegenüber der Oberfläche von mehr als 30 °C. Beim neuen Gotthard-Basistunnel ist das Gebirge mehr als doppelt so mächtig – da sind es mehr als 2400 Meter – deshalb wird es darin noch wärmer.

Jetzt könnte man denken: „Wieso eigentlich? Nur weil da ein hohes Gebirge drüber liegt, sind die Tunnel deshalb doch noch nicht näher am Erdmittelpunkt.“ Das stimmt zwar, doch entscheidend ist, dass das Gesteinspaket eine dicke Isolationsschicht darstellt. Von unten kommt immer Wärme nach – je mehr Gestein drüber liegt, desto schlechter wird diese Wärme abgeführt. Deshalb wird es im Tunnel so warm. Das ist übrigens auch eine technische Herausforderung: Im Basistunnel müssen die Gleiskörper und die Strom-Leitungen diese Temperaturen auf Dauer aushalten, genauso wie im Autotunnel der Straßenbelag. Alles machbar – aber die Temperaturen müssen berücksichtigt werden.

## Wenn man nachts den Autorückspiegel kippt, dunkelt er die Sicht ab – wie geht das?

Dieser Trick lässt sich am besten verstehen, wenn wir daran denken, was passiert, wenn wir nachts in einem beleuchteten Zimmer stehen und durchs Fenster nach draußen schauen wollen. Was sehen wir? Vor allem: uns selber – weil Glasscheiben eben nicht hundertprozentig lichtdurchlässig sind, sondern immer auch einen gewissen Teil spiegeln. Und wenn draußen im Dunkeln nichts zu sehen ist, sehen wir vor allem das, was sich spiegelt. Mit diesem Effekt funktioniert der abgedunkelte Rückspiegel.



Was man beim Blick in den Rückspiegel sieht

Vergleichen wir ihn mit einem normalen Spiegel: Der besteht normalerweise aus einer Glasscheibe, die von hinten mit Aluminium beschichtet ist. Das Aluminium ist das, was die Lichtstrahlen zurückwirft. Beim Blick in einen Spiegel kann es aber passieren – je nachdem, in welchem Winkel man guckt –, dass neben dem Hauptspiegelbild auch noch ein wesentlich schwächeres Neben- spiegelbild erscheint. Das kommt daher, dass ein – sehr viel kleinerer – Teil der Lichtstrahlen bereits an der Vorderseite der Glasplatte reflektiert wird und nicht erst hinten am Aluminium. Das wäre beim Rückspiegel im Auto normaler- weise genauso.

Doch an der Stelle kommt der Trick ins Spiel: Die Glasscheibe eines Innen- rückspiegels hat eine Besonderheit – ein keilförmiges Profil. Ihre Vorder- und ihre Rückseite verlaufen also nicht parallel zueinander, sondern bilden einen



kleinen Winkel von 3–5 Grad. Das ist genau der Winkel, um den man in der Dunkelheit den Spiegel nach oben klappen muss, um diesen Abdunkelungseffekt zu erzielen.

Das keilförmige Profil bewirkt, dass das Hauptspiegelbild (Reflektion am rückseitigen Aluminium) bei einem anderen Blickwinkel erscheint als das Nebenspiegelbild (Reflektion an der Glasoberfläche) – die beiden Spiegelbilder treten somit nie zusammen auf. So ermöglicht es der Spiegel, dass ich neben der normalen Position eine weitere einstellen kann, bei der das Spiegelbild abgedunkelt erscheint.

In dieser Position spiegelt sich das Bild, das in mein Auge gelangt, nicht am Aluminium, sondern ich sehe das schwächere Bild, das bereits an der Glasoberfläche reflektiert wird. Das heißt, die Vorderseite des Glases ist jetzt mein eigentlicher Spiegel, der zum Beispiel die Scheinwerferlichter reflektiert, die bei Dunkelheit durch die hintere Fensterscheibe des Autos auf den Spiegel gelangen.

Die Aluminiumrückseite spiegelt in dieser Position auch etwas: die Auto- decke. Doch die ist nachts dunkel, deshalb sehe ich vorrangig die Lichter hinter mir – aber eben abgedunkelt, sodass sie nicht blenden.

Es gibt neben diesem klassischen Trick allerdings noch eine modernere Version, die bei neueren Autos zum Einsatz kommt. Da hat man keine keilförmige Glasscheibe, sondern zwei dünne Glasscheiben hintereinander. Die erste Scheibe ist einfach eine durchlässige Glasscheibe, die zweite ist der eigentliche Spiegel. Und zwischen diesen beiden Scheiben befindet sich eine spezielle Flüssigkeit. Sie hat eine Besonderheit: Wenn sie unter Strom gesetzt wird, wird sie trüb – und damit dunkelt sie den hinteren „eigentlichen“ Spiegel ab, sodass auch dann wieder nur die vordere Glasscheibe als schwächere Spiegelfläche übrig bleibt.

Dafür braucht das Auto aber spezielle Helligkeitssensoren, die erkennen, wenn es draußen dunkel ist und helles Scheinwerferlicht von hinten kommt. Dann springen diese Sensoren an und leiten Strom in die Flüssigkeit zwischen den Glasscheiben, sodass der Verdunkelungseffekt eintritt. Und in dem Moment ist der Effekt wieder ähnlich wie bei dem Kippspiegel: Das Licht wird dann nicht mehr im eigentlichen Spiegel reflektiert, sondern nur noch schwach an der Glasoberfläche – während der größte Teil der Lichtstrahlen ins Glas reingeht und letztlich von der trüben Flüssigkeit geschluckt wird.

## **Warum bestellen so viele Leute im Flugzeug Tomatensaft?**

Weil sich der Geschmackssinn im Flugzeug verändert. Es ist nach den Zahlen der Lufthansa tatsächlich so: Im Flugzeug wird sogar mehr Tomatensaft als Bier getrunken.

*Und was verändert sich da im Flugzeug, dass vielen Leuten plötzlich Tomatensaft schmeckt?*

Zum einen der Luftdruck. Der wird zwar zum Teil ausgeglichen – wenn ein Flugzeug seine Reiseflughöhe von 10 000 Metern erreicht hat, herrscht in der Maschine nicht der gleiche Luftdruck wie draußen, das würden wir gar nicht aushalten –, aber er ist schon niedriger als am Boden; er entspricht ungefähr dem Luftdruck in einer Höhe von 2000–2500 Metern. Außerdem verändert sich die Luftfeuchtigkeit. Die Luft im Flugzeug ist ziemlich trocken. Empfindliche Menschen spüren das ja auch an den Schleimhäuten. Und diese beiden Faktoren beeinträchtigen das Geschmacksempfinden.

Vor einigen Jahren haben die Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Bauphysik quantitativ nachgewiesen. Sie haben einen alten Airbus-Rumpf genommen und darin möglichst genau die Bedingungen hergestellt, wie sie in einem Flugzeug herrschen: niedriger Luftdruck, trockene Luft, selbst die Flugzeuggeräusche haben sie künstlich zugespielt. Und dann haben sie mit Testpersonen Geschmackstests durchgeführt. Das Ergebnis war: Die Empfindlichkeit für Salz ist im Flugzeug deutlich geringer. Man muss also Speisen viel kräftiger salzen und würzen, damit sie so schmecken, wie man es gewohnt ist. Auch Süßes schmeckt im Flugzeug nicht ganz so süß. Was dagegen weitgehend uneinträchtigt bleibt, ist der Geschmackssinn für Bitterstoffe und für Säuren. Im Ergebnis führt das dazu, dass zum Beispiel im Tomatensaft die Fruchtsäuren stärker zur Geltung kommen und eben auch das Bittere. Das haben die Wissenschaftler zum Beispiel daran gemerkt, dass sie Leuten Tomatensaft unter „Bodenbedingungen“ gegeben haben – da haben viele den Saft als „muffig“ beschrieben. Aber unter den Bedingungen im Flugzeug in 10 000 Metern Höhe schmeckt der gleiche Tomatensaft plötzlich fruchtig.