

## Die Physik der Stille:

### Anmerkungen zu Nullpunktenergie, Hörschwelle und Antischall

Monika Ritsch-Martel, Sektion für Biomedizinische Physik der Universität Innsbruck

Stille ist kein physikalisches Phänomen. Ganz im Gegenteil: Physikalisch betrachtet bedeutet Stille das Nicht-Vorhandensein einer akustischen Welle. Also eigentlich „Nichts“. Doch ganz so einfach wollen wir es uns nicht machen: Gibt es das tatsächlich, das Nichts? Erlaubt die Physik das Fehlen jeglicher Schwingungsenergie, den totalen Still-Stand? Und spielen solche physikalischen Überlegungen für uns Menschen überhaupt eine Rolle oder bestimmt die physiologische Hörschwelle, was Stille heißt?

#### Beginnen wir beim Schall

Teilchen, zum Beispiel Atome und Moleküle, vollführen ständig Schwingungen um eine Ruhelage herum. Besonders dann, wenn ihnen von außen Energie zugeschoben wird, durch Absorption von Sonnenlicht zum Beispiel oder durch Wärmezufuhr auf der Herdplatte. Die jetzt stark schwingenden Teilchen können (unter bestimmten Bedingungen) einen Teil ihrer Energie an benachbarte Teilchen weitergeben. So ähnlich wie gekoppelte, d.h. mit einander verbundene, Pendel, die ebenfalls Schwingungsenergie untereinander austauschen.

Wir lassen die Energiezufuhr jetzt periodisch auf und ab schwanken - und schon breitet sich die Energie, von Nachbarpartikeln zu Nachbarpartikeln weitergegeben, im Medium aus. Wohlgedacht: es läuft die Energie und breitet sich aus in Raum und Zeit, nicht die Teilchen. Die bleiben schwingend dem Ort ihrer Ruhelage treu. Von *Schallwellen* spricht man, wenn sich Schwankungen der Dichte der Teilchen ausbreiten: Stellen wir uns ein mit Gas oder Flüssigkeit gefülltes langes Rohr vor, das mit einer Plastikfolie als bewegliche Membran am einen Ende verschlossen ist. Wenn wir die Membran periodisch eindrücken, entstehen periodische Teilchenverdichtungen, die sich „im Gänsemarsch“ im gefüllten Rohr ausbreiten.

Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Verdichtungen zu einem festen Zeitpunkt, die Frequenz die Anzahl der Verdichtungen, die eine bestimmte Stelle pro Zeit (Sekunde) passieren. Die Schallgeschwindigkeit verknüpft die beiden miteinander. Wie schnell die Welle im Medium läuft, hängt von der Stärke der Wechselwirkung zwischen Nachbarpartikeln ab: Schallwellen laufen im Wasser deutlich schneller als in Luft - und in Beton nochmals deutlich schneller.

#### Kommen wir zum Stillstand

Hört die periodische Energiezufuhr von außen auf, verläuft sich die Welle in den Weiten des Mediums und stirbt aus. Es herrscht sozusagen Stille: kein Wind klappert in den Jalousien und beutelt die Teilchen, keine Stimmbänder flattern im Rachen.

Wenn Schall mit Bewegung von Teilchen zu tun hat, bedeutet Stille dann den absoluten Stillstand? Unsere Sprache suggeriert diese Verknüpfung ohnehin: Still-Stand. Und was sagt die moderne Physik dazu? Der Anteil der Energie der in der Bewegung von mikroskopisch kleinen Teilchen, von Atomen und Molekülen, steckt, wird kinetische Energie genannt. Die kinetische Energie eines Teilchen der Masse  $m$  mit Geschwindigkeit  $v$  ist in der klassischen Mechanik durch  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$  gegeben. (Nebenbemerkung: Diese Formel verdient es, so bekannt wie  $E = mc^2$  zu sein, ist sie doch wichtiger für unseren Alltag. Sie beschreibt zum Beispiel die Wucht des Aufpralls bei einem Autounfall frontal gegen irgendein Hindernis. Rein unemotional physikalisch gesehen richtet ein doppelt so schweres Fahrzeug einen doppelt so großen Schaden an, ein doppelt so *schnelles* Fahrzeug hingegen ist ein viermal so verderbenbringendes Geschoss.)

Wenn wir sehr viele Teilchen haben, wie etwa in einem Liter Wasser oder Luft bei Raumtemperatur, ist es natürlich völlig unmöglich, die Geschwindigkeit jedes *einzelnen* zu kennen. Das interessiert uns eigentlich auch nicht wirklich. Was wir wissen wollen ist, wie viel Bewegungsenergie *insgesamt* in diesem Liter steckt - und wie sich diese ändert, wenn wir das gesamte Material z.B. auf 10 Grad abkühlen. So etwas leistet die

Statistik: Wir verzichten gänzlich darauf, Bescheid zu wissen, was das einzelne Teilchen gerade macht und schauen uns nur mehr Größen an, die das gesamte Ensemble betreffen, Mittelwerte sind ein Beispiel dafür. Die mittlere kinetische Energie ist eine wichtige Größe, die sich ändert, wenn wir etwas erhitzen oder abkühlen: Jeder kennt sie, denn sie ist eng mit der Temperatur  $T$  verknüpft. Es gilt  $T \sim \text{Mittelwert}(E_{kin})$ , wobei die Proportionalitätskonstante eine berühmte Naturkonstante enthält, die Boltzmann-Konstante  $k_B$ . Damit haben wir uns jetzt – so hoffe ich – ein Erkenntnis erarbeitet: die ultimative Stille, der absolute Stillstand aller Teilchen ist der *absolute Nullpunkt der Temperatur*, also null Grad Kelvin. In der uns vertrauteren Celsius Temperaturskala liegt dies bei  $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$ .

Soweit die klassische Physik. Doch was sagt die Quantenmechanik dazu? Lässt sie den absoluten Bewegungsstillstand zu – oder kommen uns da die Eigenheiten der Quantenwelt in die Quere? Der energetisch tiefste mögliche Zustand eines Systems wird Grundzustand genannt, das oben besprochene Vielteilchensystem geht beim Temperaturnullpunkt  $T = 0$  in diesen Zustand. Doch es gibt Fälle, zum Beispiel ungebundene Elektronen in einem Metall, wo nicht jedes einzelne Teilchen für sich selbst den energetisch günstigsten Zustand einnehmen kann, weil das Pauli-Prinzip verbietet, dass sich zwei Teilchen (Bemerkung für die Experten: mit halbzahligen Spin) im exakt gleichen Quantenzustand befinden. Dieser Grundzustand enthält damit also doch noch Bewegungsenergie. Und würden wir von Licht - und nicht Schall - reden, kämen noch die berühmten Vakuumfluktuationen dazu, aber das ist eine andere Geschichte für eine andere Gelegenheit...

### **Horchen wir genau hin**

Doch spielt das alles irgendeine Rolle im täglichen Leben? Die Tieftemperaturphysik und der Energiegrundzustand sind wohl nicht gerade das, woran wir denken, wenn wir ein genervtes „Jetzt sei doch endlich still, ich muss mich konzentrieren“ an unsere Umgebung abgeben. Was bedeutet Stille physiologisch gesehen – für das Messgerät Mensch, falls dieser Begriff überhaupt sinnvoll ist?

Unsere Spezies setzt Schall zur Kommunikation ein. Das heißt, wir müssen in der Lage sein, die Schallwellen, die für uns bestimmte Information enthalten, herauszufiltern und zu verarbeiten. Das geht offensichtlich nur, wenn die Signalstärke deutlich über dem Geräuschpegel liegt: Jeder kennt das, in lauter Umgebung muss man lauter sprechen. Unser Gehör ist nur für einen bestimmten Frequenzbereich der Schallwellen empfindlich, von etwa 16 Hz bis 20 kHz. Für Sprache wird nur ein engerer Bereich um einige wenige kHz herum verwendet, in dem wir besonders gut hören. Einzelne oder wenige isolierte Frequenzen nehmen wir als Töne oder Klänge wahr, Schallwellen mit vielen Frequenzkomponenten unterschiedlich, je nachdem, ob sie alle brav in Phase schwingen wie beim Knall oder völlig unkorreliert sind wie beim Geräusch. Physikalische Schallintensitäten und subjektiv empfundene Lautstärke sind nicht dasselbe: Wer sagt, dass doppelt so viel Schallintensität als doppelt so laut empfunden wird? Das ist auch tatsächlich nicht so: Eine Verdopplung der Intensität wird im allgemeinen nicht als Verdopplung der Lautstärke empfunden, die subjektive Lautstärkeänderung fällt deutlich moderater aus, denn unser Gehör gleicht ein drastisches Anwachsen aus, indem die Wahrnehmung nicht proportional sondern nur logarithmisch mit dem akustischen Reiz mitwächst. Im Klartext bedeutet das, dass es einen großen Unterschied bezüglich Lärmbelästigung macht, ob kein Auto, ein Auto oder zwei Autos vorbeirauschen an uns, aber schon egal ist, wenn wir den Lärm von 100 Autos auf 101 steigern.

Es gibt Tabellen und Diagramme, die mühsam empirisch im Tonstudio mit Hilfe von vielen jungen und gesunden Versuchspersonen erarbeitet worden sind, wo man nachschauen kann, wie viel Lautstärke in *phon* einer bestimmten Schallintensität (genauer: einem bestimmten Schalldruckpegel in *dezibel*) entspricht. Um das Ganze noch etwas zu verkomplizieren, hängt dieser Zusammenhang nämlich auch noch von der Frequenz ab. Sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen werden nur schlecht wahrgenommen und brauchen entsprechen eine höhere Schallintensität für gleiche Lautstärkeempfindung.

Am empfindlichsten sind unsere Ohren bei 3,5 – 4 kHz, also bei etwa 4000 Schwingungen pro Sekunde. Bei diesen Frequenzen liegt die Hörschwelle in einem Bereich, der in der Größenordnung von  $20\text{ }\mu\text{Pa}$  (1 Pascal =

1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) Schalldruck entspricht. Man muss sich das einmal vorstellen: dieser Druck entspricht ungefähr dem Gewicht einer Vogelfeder von 1 g Masse auf einer Fläche von 500 m<sup>2</sup>. So empfindlich ist unser Gehör. Die Schmerzschwelle andererseits, das heißt die niedrigste Stärke eines Schallreizes der von einer typischen Versuchsperson als schmerzhaft empfunden wird (bei der gleichen Frequenz), liegt bei Schallintensitäten von 200 Pa, das entspricht einer unglaublichen Anzahl von 7 Zehnerpotenzen (= Verzehnfachungen) über der Hörschwelle, was den Schalldruck betrifft. Die Technik kann von einem derartigen Dynamikumfang (*dynamic range*) im allgemeinen nur träumen.

Und was bedeutet Stille jetzt in diesem Kontext? Fest steht, dass alles, was unterhalb der Hörschwelle liegt, nicht wahrgenommen werden kann (*per definitionem!*) - und damit getrost als Stille verbucht werden kann. Aber das ist zu simplistisch gedacht: Was wir letztendlich als „still“ oder „vollkommen still“ oder umgekehrt als „laut“, „störend laut“ oder sogar „krankmachend laut“ empfinden, hängt natürlich nicht nur von der Sensitivität unserer Sinnesorgane ab, sondern auch von der weiteren neuronalen Verarbeitung.

### **Schaffen wir uns Stille**

Wenn wir nicht gerade in die totale Stille hineinhorchen, kann „Es ist still“ unter Umständen auch heißen, dass bestimmte, als unwichtig, unbedrohlich oder schlichtweg als „normal“ empfundene akustische Reize weggeblendet und gar nicht wirklich wahrgenommen werden – eigentlich ein totales Ignorieren der physikalischen Tatsachen. (Im Gegensatz dazu steht übrigens der *Cocktail Party Effect*, der es uns erstaunlicherweise erlaubt, mitten im akustischen Dschungel einer lauten Party genau das zu hören, was die *eine* wichtigste und interessanteste Person uns gegenüber gerade sagt. Keine triviale Aufgabe für unsere Sinnesorgane, wahrscheinlich müssen sich dafür auch mehrere zusammentun.)

Doch manchmal genügt dies nicht, und wir wollen uns tatsächlich eine künstliche Stille erschaffen. Kein Problem seit es Antischall gibt, auf Englisch als *Active Noise Reduction* oder *Active Noise Cancellation* (ANC) bekannt. Die Idee dahinter ist ganz einfach und damit wunderschön: wir besinnen uns darauf, dass Schall ja eine Welle ist, und Wellen haben die Eigenschaft, dass sie sich überlagern und je nach gegenseitiger Phasenlage lokal verstärken oder auslöschen können, das heißt zwei aufeinandertreffende Wellenberge verstärken sich und Wellenberg auf Wellental heben sich auf am Ort des Zusammentreffens, letzteres nennt man destruktive Interferenz.

Das können wir jetzt verwenden, um störende Geräusche sozusagen direkt vor unseren Ohren wegzuzaubern (was an anderen Orten passiert, ist uns egoistischer Weise egal), wenn wir uns über Kopfhörer Musik anhören oder mit jemandem sprechen. Entwickelt wurde dieses System als Lärmschutz für Personen in schallbelasteten Umgebungen, wie zum Beispiel Piloten im Cockpit eines Flugzeugs.

Vereinfacht gesagt: die Kopfhörer nehmen die Hintergrundgeräusche über Mikrophone auf, berechnen welchen „gegenpoligen“ Schall (Täler zu Berge und Berge zu Tälern machen) wir zur Musik dazugeben müssen, schicken dieses veränderte akustische Signal in unsere Ohren - und die destruktive Interferenz macht die Drecksarbeit für uns und vernichtet die Umgebungsgeräusche weitgehend. In Wirklichkeit ist alles (wie immer!) etwas komplizierter.... ANC funktioniert eigentlich nur für tiefe Frequenzen mit Wellenlängen, die groß gegen die Abmessungen des Kopfhörers sind, gut, denn nur bei diesen Schallfrequenzen hat der Schall über die gesamte Kopfhörerfläche die gleiche Phasenlage. Und der Schallleitung über die Knochen ist dies natürlich alles egal.

Und wem das alles jetzt zu kompliziert wird, der muss in den Baumarkt gehen und Schalldämmung kaufen, die den Umgebungsschall in Wärme umwandelt. Damit es wirklich still wird.

### **Kommen wir mit einem überstrapazierten Zitat zum Ende**

„*And the rest is silence*“, Shakespeare, Hamlet, Act V, Scene II.