

Was geht in den Kanzellen einer Bluesharp vor sich?

Alfred Förtsch*

November 2021

Bewegte Luftmoleküle und schwingende Luft

Wenn wir auf der Bluesharp spielen, regen wir in unserem Vokaltrakt, im Inneren der Kanzelle, in den Zungen, in den Spalten zwischen Zungen und Stimmplatte und nicht zuletzt in unserer Umgebung und in den Ohren des Publikums *Schwingungen* an.

Aus unserer Lunge heraus (bei einem Blaston) oder in unsere Lunge hinein (bei einem Ziehton) fließt durch die Öffnung zwischen den Stimmlippen im Kehlkopf und durch die Schlitze zwischen den Zungen und der Stimmplatte *Luft*. Die Luft in der Luftröhre und vor allem im Mund- und Rachenraum (kurz: im Vokaltrakt) bewegt sich dabei im Rhythmus der schwingenden Zungen hin und her, ebenso wie die Trommelfelle in den Ohren des Publikums. Das Gehirn macht schließlich aus der Bewegung der Trommelfelle das subjektive Erlebnis, *Musik* zu hören.

Luft besteht aus *Luftmolekülen*. Was machen die Luftmoleküle, wenn wir Bluesharp spielen? Schunkeln sie alle zusammen im Rhythmus der schwingenden Zungen hin und her? Eine schöne Vorstellung, aber leider ziemlich falsch. Tatsächlich herrscht in der Mikrowelt auf den ersten Blick das pure Chaos.

Jedes *einzelne* Luftmolekül erreicht Durchschnittsgeschwindigkeiten von fast zwanzigtausend Kilometern pro Stunde, mit denen es in irgendeine Raumrichtung fliegt. Dabei kommt es im Schnitt zwei zehntausendstel Millimeter weit, bevor es mit einem anderen Molekül zusammenstößt, dadurch Geschwindigkeit und Flugrichtung ändert, wieder losfliegt, wieder zusammenstößt... .

Unsere *Sinne* reagieren nur auf Ansammlungen von *unvorstellbar vielen* Luftmolekülen. Ein *Kubikmillimeter* Luft beispielsweise enthält ungefähr 30 Millionen Milliarden Luftmoleküle (eine Drei mit 16 Nullen). Diesen Kubikmillimeter voller umeinander wuselnder Moleküle nehmen wir als kleine Menge „Luft“ wahr.

Die Bewegung der einzelnen Moleküle erscheint zunächst beliebig und chaotisch. Die Einzelbewegungen aller Moleküle können aber, obwohl sie für sich gesehen

*www.bluesharpscience.de

chaotisch sind, einen *gemeinsamen Trend* aufweisen. Und das tun sie tatsächlich, wenn wir Bluesharp spielen. Ein anschauliches Beispiel ist eine Gruppe von Fußballern, die auf engem Raum hitzig um den Ball kämpfen, die sich aber dabei insgesamt und als Gruppe abwechselnd immer wieder langsam auf das eine und dann auf das andere Tor zubewegen.

Faszinierenderweise nehmen wir die Einzelbewegung der Luftmoleküle untereinander und die möglicherweise überlagerte Kollektivbewegung mit unseren Sinnen *völlig unterschiedlich* wahr. Die Bewegung der Luftmoleküle untereinander empfinden wir nicht als Bewegung, die vielleicht irgendwie an unserer Haut kratzt, sondern als *Wärme*. Je schneller die Luftmoleküle im Schnitt sind, desto höher ist die *Temperatur* der Luft. Die *möglicherweise* vorhandene *Gruppenbewegung* dagegen nehmen wir tatsächlich als *Luftbewegung* wahr, vom Lufthauch bis zum Wind oder Sturm. Oder aber, womit wir wieder beim Thema dieses Vortrags angekommen wären, über unser Trommelfell als *Schall!*

Die chaotische Einzelbewegung der Luftmoleküle spüren wir in unserer Makrowelt nicht nur als Temperatur. Im Kombipack mit der kollektiven Gesamtbewegung macht sie sich auch als *Druck* bemerkbar. Wenn ein bewegtes Molekül auf die Membran eines Druckmessgeräts prallt, wird es reflektiert. Dadurch wird auf die Membran eine Kraft ausgeübt. Die Kräfte sämtlicher aufprallender Moleküle addiert sich schließlich zu einer Druckkraft auf die Membran, und das Messgerät zeigt einen entsprechenden Luftdruck an.

Die chaotische Einzelbewegung der Moleküle äußert sich als atmosphärischer Luftdruck, falls es absolut windstill und still (im Sinn von „kein Schall“) ist. Wenn es stürmt, ist dem atmosphärischen Luftdruck der Druck der bewegten Luftmassen überlagert. In einem beschallten Raum kann man an jeder Stelle akustische Druckschwankungen messen, die dem atmosphärischen Luftdruck überlagert sind. Diese Druckschwankungen bewegen dann Trommelfell oder Mikrofonmembran. *Akustische Druckschwankungen* sind die wichtigste Größe, mit der in der physikalischen Akustik gearbeitet wird.

Verbunden mit den akustischen Druckschwankungen sind *Verdichtungen und Verdünnungen* der Luft. Im anschaulichen Bild von den Luftmolekülen als einer Gruppe von um den Ball kämpfenden Fußballern sind die Fußballer abwechselnd auf engerem und auf weiterem Raum versammelt. Sind die Moleküle eng zusammen, sind Dichte und Druck hoch. Die Dichte ist hoch, weil viel Masse auf engem Raum versammelt ist. Der Druck ist hoch, weil viele Moleküle auf die Membran eines Druckmessgeräts trommeln würden.

Wenn wir einen Einzelton auf der Bluesharp spielen, wird die Luft im Vokaltrakt und in der entsprechenden Kanzelle zu Schwingungen angeregt, gleichzeitig schwingen die beiden Zungen in der Kanzelle, und es werden Schallschwingungen in die Umgebung abgestrahlt. *Physikalische Modelle* von Musikinstrumenten beschreiben die Schallschwingungen mit Hilfe der entsprechenden akustischen Luftdruckschwankungen.

Hoher Schalldruck im Inneren

Für akustische Druckschwankungen wird die physikalische Einheit $1Pa$ = ein *Pascal* für den Druck verwendet. Für den Luftdruck in Autoreifen gibt es noch die veraltete Einheit Bar, die in der Physik allerdings seit einigen Jahrzehnten abgeschafft wurde. Vor allem wenn es um die Beurteilung von Lärm geht, wird für den Schalldruck alternativ die Einheit *Dezibel* verwendet, abgekürzt *dB*. Dahinter steht die Tatsache, dass unser Gehör nicht einfach doppelte Druckschwankungen als doppelt so „laut“ empfindet. Die Umrechnung von *Pa* in *dB* ist so gemacht, dass eine Zunahme um $10dB$ von Versuchspersonen in etwa als eine Verdoppelung der subjektiv empfundenen „Lautstärke“ wahrgenommen wird. Eine Zunahme um $20dB$, $30dB$, ... wird dann (wegen $2 \cdot 2 = 4$ und $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$... als 4-fache bzw. als 8-fache ... Lautstärke empfunden.

Der atmosphärische Luftdruck beträgt rund $1000hPa$, das sind hunderttausend Pascal. Wenn wir uns mit normaler Lautstärke unterhalten, empfinden wir eine Lautstärke von $60dB$. Umgerechnet in Pascal sind dies winzige zwei hundertstel Pascal, die dem atmosphärischen Druck von hunderttausend Pascal überlagert sind. Die Hörschwelle mit $0dB$ liegt noch einmal um den Faktor Tausend niedriger bei zwei hunderttausendstel Pascal. Bei derart leisen Geräuschen bewegt sich unser Trommelfell weniger als einen Atomdurchmesser hin und her. Die Schmerzgrenze liegt bei $35Pa$ ($125dB$), ab ca. $200Pa$ ($140dB$) hat auch kurzzeitige Schalleinwirkung dauerhafte Schäden zur Folge.

Der Schalldruck an unseren Trommelfellen hängt empfindlich vom Abstand zur Schallquelle ab. Eine Violine erzeugt ca. $6Pa$ ($110dB$) am Ohr des Spielenden, in sechs Meter werden im Fortissimo ca. $0,2Pa$ ($80dB$) gemessen. In einem Abstand von $1cm$ beträgt der von der Bluesharp abgestrahlte Schalldruck¹ zwischen $0,01Pa$ ($55dB$, normaler Blaston) und $0,04Pa$ ($65dB$, Drawbend), wobei je nach Spielweise, Instrument und Abstand von Mikrofon zu Instrument andere Werte zu erwarten sind.

Die Schalldruckschwankungen im *Inneren der Kanzelle* sind wesentlich größer. Für einen normalen Blaston wurden als Amplitude $130Pa$ gemessen, für einen Ziehend $400Pa$ (die Amplitude einer Schwingung ist ihr Maximalwert). Damit ist es im Kanzelleninneren ca. $80dB$ lauter als außerhalb der Bluesharp. Dem entspricht eine 2^8 -fache, also eine ca. 250-fache „Lautstärke“. Entsprechend herrscht auch im benachbarten Vokaltrakt ein „Höllenslärm“.

Dies ist nichts Ungewöhnliches. Auch beim *Sprechen* oder *Singen* treten im Mund ähnliche Druckschwankungen und damit „Lautstärken“ auf. Den Schall im Vokaltrakt können wir hören, wenn wir die Ohren fest verschließen und dabei sprechen oder (mit einem Mundharmonikahalter um den Hals) auf der Bluesharp spielen.

¹Millot (Acta 87)

Schallabstrahlung an den Schlitzen

Beim *Sprechen* dringt ein sehr geringer Anteil der Schallenergie im Vokaltrakt durch den dabei geöffneten Mund und breitet sich als *Schall* im Raum aus. Ähnlich ist es bei *Blasinstrumenten* wie Saxophon oder Trompete. Im Instrumentenkörper werden kräftige Druckschwankungen gemessen. Ein vergleichsweise geringer Teil dringt durch die Öffnung im Schalltrichter nach außen.

Bei der *Bluesharp* ist es völlig *anders*. Physikalische Modelle der Tonerzeugung auf der Bluesharp gehen davon aus, dass die Luft auf dem vielleicht einen Millimeter langen Weg durch die Schlitze zwischen Zunge und Stimmlatte konstante Dichte hat. In einer Schallwelle breiten sich Dichteschwankungen der Luft aus. Schallwellen mit konstanter Dichte kann es folglich nicht geben. Daher gibt es durch die Schlitze zwischen Zunge und Stimmlatte keine Schallausbreitung im herkömmlichen Sinn. Stattdessen bildet die Luft in den Schlitzen einen „Pfropfen“ konstanter Dichte, der als Quelle von Schall wirkt. Bei der Bluesharp dringt also kein Teil des Schalls von innen nach außen. Vielmehr wird Schall an der Außenseite der Schlitze *neu erzeugt*. Voraussetzung dafür ist, dass die Luft zwischen den Schlitzen bei ihrer Hin- und Herbewegung hohe Spitzengeschwindigkeiten erreicht.

Welche Spitzengeschwindigkeiten treten bei Schall auf? Wenn wir mit Zimmerlautstärke, also etwa mit 60dB spielen, bewegt sich die *Luft im Raum* unvorstellbar langsam hin und her. In einer Stunde würde sie nur ungefähr 18 Zentimeter zurücklegen. Soweit kommt sie allerdings nicht, weil sich im Rhythmus der schwingenden Zungen fortlaufend die Bewegungsrichtung umkehrt. Bei einem Blaston auf Kanal #4 einer C-Harp schwingt die Luft etwas mehr als 500mal pro Sekunde hin und her. Die schwingende Luft kommt also nur ungefähr fünfzehn Millionstel Millimeter weit, bevor sich die Bewegungsrichtung wieder umdreht. Im *Kanzelleninneren* werden gleichzeitig beispielsweise 140dB gemessen. Hier erreicht die Maximalgeschwindigkeit immerhin Fußgängertempo, und die Luft kommt in beide Richtungen 0,3 Millimeter weit.

Der Luft in den Schlitzen zwischen Zungen und Stimmlatte erreicht im Gegensatz dazu Spitzengeschwindigkeiten von ca. 100km/h . Und das reicht aus, um kräftig Schall zu erzeugen! Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Luft hinter den Schlitzen trotz ihrer hohen Geschwindigkeiten nicht weit kommt. Stattdessen bilden sich dicht hinter dem Aushang der Schlitze Wirbel, und die verwirbelte Luft breitet sich hauptsächlich in seitliche Richtungen aus. Dies hindert aber den „Luftpumpfen“ in den Schlitzen nicht, als Schallquelle zu funktionieren.

Kanzellendruck und Zungenbewegung

Bluesharpzungen sind elastisch. Falls man sie vorsichtig ein bis zwei Millimeter anzupft, „wollen“ sie wieder in ihre Ruheposition zurück. Beim Auslenken spürt man die elastischen Kräfte der Zungen, die sie anschließend in ihre Ruhelage zurückbringen. Ist es denkbar, dass die Zungen in der Bluesharp durch ein

Wechselspiel zwischen Kanzellendruck und elastischen Zungenkräften hin- und herschwingen?

Die Idee klingt zunächst gut - schließlich hatten wir ja gesehen, dass in der Kanzelle vergleichsweise hohe Druckschwankungen auftreten. Aus mindestens zwei Gründen ist diese Idee aber völlig irreführend und *falsch*.

Erstens darf man nicht vergessen, dass Bluesharpzungen *fast von alleine* schwingen. Wenn man einen Ton spielt und das Instrument anschließend schnell vom Mund wegnimmt klingt der Ton ungefähr eine halbe Sekunde nach (wobei tiefe Töne länger nachklingen als hohe Töne). Dies zeigt, dass Harpzungen auch ohne Kanzellendruck schwingen. Was tatsächlich dabei abläuft ist ein Wechselspiel zwischen den elastischen Zungenkräften und dem Trägheitsverhalten der Zungen. Zungen haben Masse, und wenn Masse einmal in Bewegung ist, will sie sich weiterbewegen. Wenn die Zunge durch ihre Ruhelage schwingt, ist sie schnell. Aufgrund der Massenträgheit bewegt sie sich so lange weiter, bis sie von den elastischen Kräften abgebremst ist. Anschließend wird sie von den elastischen Kräften Richtung Ruhelage beschleunigt, nimmt dabei wieder Geschwindigkeit auf, und das Spiel kann weitergehen.

Zweitens sind die vom Kanzellendruck auf die Harpzunge ausgeübten Kräfte zwar entscheidend für die Tonerzeugung, und sie sind auch vergleichsweise groß. Allerdings sind sie *wesentlich kleiner* als die elastischen Kräfte, die in der Zunge auftreten.

Bei einem normalen Blaston schwingt die Blaszunge gut einen Millimeter um ihre Ruhelage. Wenn man den Deckel abnimmt, kann man sehen oder mit dem Finger fühlen, wie die Zunge dabei durch die Öffnung in der Stimmlatte nach außen schwingt. Um die Zunge so weit auszulenken braucht man eine Kraft, die ungefähr dem Gewicht eines 10ct-Stücks entspricht. Bei einem normalen Blaston erreicht der Druck im Kanzelleninneren Maximalwerte von ca. 130Pa . Daraus kann man die maximale Druckkraft auf die Blaszunge berechnen. Das Ergebnis: Die vom Kanzellendruck ausgeübte Kraft ist im Vergleich zur elastischen Zungenkraft ca. 30mal kleiner. Von einem Wechselspiel zwischen gleich starken Partnern - dem Kanzellendruck und den elastischen Zungenkräften - kann also beim besten Willen keine Rede sein.

Die Tonerzeugung beim Bluesharpenspiel läuft vielmehr über einen *Rückkopplungsprozess* zwischen Kanzellendruck und Zungenbewegung ab. Beim Anblasen wird die Zunge leicht angeschubst und beginnt minimal zu schwingen. Dadurch variiert der Abstand zur Stimmlatte. Dies hat Einfluss auf den Kanzellendruck, was wiederum die Zungenbewegung beeinflusst, und so fort. Leichtes Anschubsen genügt, um eine fast von selbst ablaufende kräftige Zungenschwingung aufzubauen. Gleichzeitig bauen sich dabei auch die kräftigen Druckschwankungen in der Kanzelle auf.

Wenn der dabei abgestrahlte Ton schließlich eine konstante Lautstärke hat, schwingt die Zunge fast von selbst in einem *Wechselspiel zwischen elastischer Zungenkraft und Massenträgheit der Zunge*. Die Druckschwankungen in der Kanzelle müssen jetzt nur noch *Energieverluste* ausgleichen, die beispielsweise

se im Zungenmaterial oder durch die Schallabstrahlung entstehen. Leichtes Ein- oder Ausatmen genügt, um den Ton aufrecht zu erhalten.