

# Organ pipes

## A physicist's view

**Neville Fletcher**

Research School of Physical Sciences  
Australian National University

Pipe organs have been part of the musical life of Western Europe for more than one thousand years, and the basic design and construction of organ pipes has varied little over most of that period. It would be reasonable to expect, therefore, that all the details of the way in which they produce sound would be well understood. Surprisingly, this is not so, and it is only in the past 30 years of so that even the basic air-jet mechanism has been thoroughly studied. A detailed discussion is given in reference [1], which shows what we now understand reasonably reliably, and what remains to be done.

Of course, organ builders have known how to design pipes to produce the desired pitch and tonal quality for centuries, but some traditional beliefs underlying this art do not stand up to careful examination. In this short article I would like to set out our present understanding of some of these matters. These studies, it is true, are generally pursued by physical scientists interested in the organ, rather than by organ builders, but it is hoped that they will prove both interesting and useful. The discussion falls naturally into three parts: flue pipes, reed pipes, and pipe materials.

### Flue Pipes

The operation of a flue pipe, as with other organ pipes, is conveniently divided into two parts. First there is the passive acoustics of the pipe resonator, which determines the pitch and, to a large extent, the basic tone quality, and then there is the physics of the pipe mouth and the interaction between the air jet and the pipe lip that produces the sound. Let us treat these in turn.

Les orgues à tuyaux font partie depuis plus de mille ans de la vie musicale de l'Europe Occidentale; la conception et la fabrication des tuyaux d'orgue ont fondamentalement peu varié sur la plus grande partie de cette période. On pourrait donc s'attendre à ce que tous les détails concernant la façon dont ils produisent le son soient parfaitement compris. De façon surprenante, ce n'est pas le cas, et ce n'est qu'au cours des trente dernières années environ que le mécanisme de base de la lame d'air a été étudié de façon exhaustive. Je donne en bibliographie les références [1] d'un ouvrage détaillé, qui montre l'état des connaissances correctes et fiables sur la question et le chemin qui reste à parcourir.

Bien évidemment, les facteurs d'orgues savent depuis des siècles comment concevoir des tuyaux pour qu'ils produisent le son désiré au diapason souhaité, cependant certaines croyances qui sous-tendent cet art ne résistent pas à un examen attentif. Dans ce court article, je souhaiterais exposer l'état de compréhension actuel de certains de ces éléments. Ces études, il est vrai, sont plutôt le fait de scientifiques intéressés par l'orgue, que de facteurs d'orgues, mais il est à espérer qu'elles se révèlent à la fois intéressantes et utiles. La discussion se divise naturellement en trois parties: les tuyaux à bouche, les tuyaux d'anche, et le métal.

### Les tuyaux à bouche

Le fonctionnement d'un tuyau à bouche, comme pour les autres tuyaux d'orgue, est commodément divisé en deux volets. Il y a d'abord la résonance acoustique passive du résonateur, qui détermine la hauteur du son et, dans une large mesure, les caractéristiques sonores de base, puis il y a la réaction physique de la bouche et l'interaction entre la lame d'air et la lèvre supérieure qui produit le son. Envisageons chaque chose

Pfeifenorgeln sind seit mehr als tausend Jahren Teil des musikalischen Lebens in Westeuropa und Grundbauform sowie Konstruktion von Orgelpfeifen haben sich seither nur geringfügig verändert. Aus diesem Grund ist zu erwarten, daß alle Details der Art der Klangerzeugung leicht zu verstehen sind. Überraschenderweise ist dies aber nicht so, und erst etwa in den letzten 30 Jahren wurde das Prinzip des Luftdruckmechanismus gründlich erforscht. Eine ausführliche Erläuterung wird im Anhang [1] gegeben, die unseren heutigen Wissenstand zeigt und was noch zu tun bleibt.

Selbstverständlich haben Orgelbauer seit Jahrhunderten gewußt wie eine Pfeife konstruiert sein muß, um die gewünschte Tonlage und Klangqualität zu erzeugen, aber einige traditionelle Überzeugungen dieser Kunst halten einer gründlichen Untersuchung nicht stand. In diesem kurzen Aufsatz möchte ich mich mit unserem derzeitigen Wissen über einige dieser Dinge auseinandersetzen. Allerdings sind diese Studien eher von an der Orgel interessierten Physikwissenschaftlern durchgeführt worden als von Orgelbauern, aber es ist zu erwarten, daß die Studie interessant und aufschlußreich sein wird. Die Erörterung teilt sich naturgemäß in drei Teile, Labialpfeifen, Zungenstimmen und Pfeifenmaterial.

### Labialpfeifen

Die Funktion einer Labialpfeife, wie auch anderer Orgelpfeifen, ist naturgemäß in zwei Teile aufgeteilt. Zum einen ist es die passive Akustik des Pfeifenkörpers, die die Tonhöhe bestimmt, und zum großen Teil die Grundtonqualität, während andererseits die Physik des Zusammenwirkens von Labium, Kern und Luftdruck den Klang erzeugt. Lassen Sie uns dies der Reihe nach bearbeiten.

Eine zylindrische Pfeife, wie zum Beispiel ein Principal, ist an beiden Seiten offen, und die Tonhöhe ist festgelegt

To a first approximation, a cylindrical pipe such as a diapason is open at both ends, and the pitch is determined by the requirement that the sound wavelength will be just twice the length of the pipe. This is, however, only a rough approximation, because there is an end-correction at the open end that effectively extends its length by about 0.3 times the pipe diameter, and a much more severe end-correction at the mouth. This mouth-correction  $M$  depends upon the width  $w$  and cut-up  $h$  of the mouth, in relation to the pipe diameter  $d$ . An approximate expression, derived by Ingerslev and Frobenius [2] for the usual case in which the cut-up is about one quarter of the mouth width, is

$$M = \frac{0.6d^2}{\sqrt{wh}}$$

For a typical diapason pipe, this mouth correction is nearly 1.5 times the pipe diameter, and so completely overshadows the correction at the open end. For narrow-mouthed flute pipes, the difference is even greater. Inserting numbers into these relations allows the sounding length  $L$  of the pipe to be determined from its physical dimensions. If  $l$  is the physical length and  $d$  the diameter of the pipe, then  $L = l + M + 0.3d$  for an open pipe, and  $L = l + M$  for a stopped pipe, as illustrated in Figure 1. In the lower part of the figure is shown the nominal resonance series for each type of pipe, assuming the same value of  $L$  in each case. The frequencies of these resonances are given by  $nc / 4L$  where  $c$  is the speed of sound in air, about 343 m/s at ordinary room temperature, and  $n$  takes on the values 2,4,6,... for an open pipe and 1,3,5,... for a stopped pipe. An open pipe must therefore have a sounding length twice as long as that of a stopped pipe to produce the same note, and it is more usual to think of its resonance series as  $nc / 2L$ , with  $n$  taking the values 1,2,3,...

If the pipe behaved ideally, then its resonance frequencies would all be exact integer multiples of the fundamental, a complete series for an open pipe and just the odd multiples for a stopped pipe. These resonances would reinforce the harmonics of the sound produced by the air jet. It turns out, however, that the end-correction at the pipe mouth decreases at high

l'une après l'autre.

Disons comme première approximation qu'un tuyau cylindrique, tel un principal, est ouvert aux deux extrémités et que la hauteur du son est déterminée par la nécessité que la longueur de l'onde sonore soit juste le double de la longueur du tuyau. Cela n'est cependant qu'une approximation grossière car il y a une correction à appliquer à la partie supérieure, et cette correction agrandit la longueur du tuyau d'environ 0,3 fois le diamètre. Il y a une correction bien plus importante à la bouche. La correction à la bouche  $M$  dépend de la largeur  $w$  et de la hauteur de bouche  $h$ , en relation avec le diamètre  $d$  du tuyau. Il existe une formule approximative, dérivée par Ingerslev et Frobenius [2] pour le cas courant où la hauteur de bouche est environ au quart de sa largeur, c'est

$$M = \frac{0.6d^2}{\sqrt{wh}}$$

Pour un tuyau de principal-type cette correction à la bouche est d'environ 1,5 fois le diamètre du tuyau, et eclipse ainsi complètement la correction à l'extrémité supérieure du tuyau. Pour les tuyaux de flûtes à bouche étroite, la différence est encore supérieure. En utilisant la formule, on peut déterminer la longueur sonore  $L$  du tuyau à partir de ses dimensions physiques. Si  $l$  est la longueur physique et  $d$  le diamètre du tuyau, alors  $L = l + M + 0,3d$  pour un tuyau ouvert, et  $L = l + M$  pour un tuyau bouché, comme il est indiqué sur la figure 1. Sur la partie inférieure de la figure on voit les séries de résonance nominales pour chaque sorte de tuyau, en supposant la même valeur de  $L$  dans chaque cas. Les fréquences de ces résonances sont données par la formule  $nc / 4L$ , dans laquelle  $c$  est la vitesse du son dans l'air, autour de 343 m/s à température ambiante ordinaire, et  $n$  correspond aux valeurs 2,4,6... pour un tuyau ouvert et 1,3,5... pour un tuyau bouché. Un tuyau ouvert doit de ce fait être doublement plus long qu'un tuyau bouché pour produire la même note, et on pense habituellement à ses séries de résonance comme correspondant à la formule  $nc / 2L$ ,  $n$  ayant les valeurs 1,2,3...

Si le tuyau se comportait de façon idéale, ses fréquences seraient toutes des multiples entiers de la fondamentale, une série complète pour un tuyau ou-

durch die Bedingung, daß die Klangwellenlänge genau zweimal die Pfeifenlänge ist. Dies ist nur eine grobe Annäherung, weil eine Endkorrektur am offenen Ende der Pfeife entsteht, die tatsächlich ihre Länge um zirka 0,3 mal den Pfeifendurchmesser verlängert, und eine noch größere Endkorrektur durch die Unterbrechung am Labium. Diese Mündungskorrektur  $M$  hängt von der Weite  $w$  und dem Aufschnitt  $h$  des Labiums ab, in Relation zu dem Pfeifendurchmesser  $d$ . Eine ungefähre Formel, aufgestellt von Ingerslev und Frobenius [2], für den Normalfall, bei dem der Aufschnitt zirka 1/4 der Labienbreite beträgt, ist

$$M = \frac{0.6d^2}{\sqrt{wh}}$$

Für eine typische Principalpfeife beträgt diese Mündungskorrektur nahezu 1,5 mal den Pfeifendurchmesser, und überdeckt so komplett die Korrektur am offenen Ende. Für eng labierte Flöten ist die Differenz sogar noch größer. Setzt man Zahlen für diese Bezüge ein, so ist es möglich die physikalische Tonlänge  $L$  einer Pfeife zu errechnen. Wenn  $l$  die theoretische Länge und  $d$  der Durchmesser der Pfeife ist, dann ist  $L = l + M + 0,3d$  für eine offene Pfeife und  $L = l + M$  für eine gedeckte Pfeife wie in Abbildung 1 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung werden die nominalen Schwingungsreihenfolgen für jeden Pfeifentyp gezeigt, ausgehend von der selben Größe  $L$  für alle. Die Frequenzen dieser Resonanzen sind gegeben in  $nc / 4L$ , wo  $c$  die Geschwindigkeit des Klangs in der Luft ist, zirka 343 m/s bei normaler Raumtemperatur, und  $n$  steht für die Größen 2,4,6... für eine offene Pfeife und 1,3,5... für eine gedeckte Pfeife. Eine offene Pfeife muß daher eine zweimal so lange Tonlänge haben wie eine gedeckte Pfeife, um denselben Ton zu erzeugen, und es ist eher üblich an die Resonanzreihenfolgen zu denken als  $nc / 2L$  mit  $n$  nimmt die Werte 1,2,3... zu benutzen.

Wenn die Pfeife ideal funktioniert, dann würden ihre Resonanzfrequenzen alle exakt gleiche Vervielfältigungen des Grundtones sein, eine komplette Serie für eine offene Pfeife und die ungeraden Zahlen für eine gedeckte Pfeife. Diese Resonanzen verstärken die durch den Luftdruck erzeugten Harmonien des

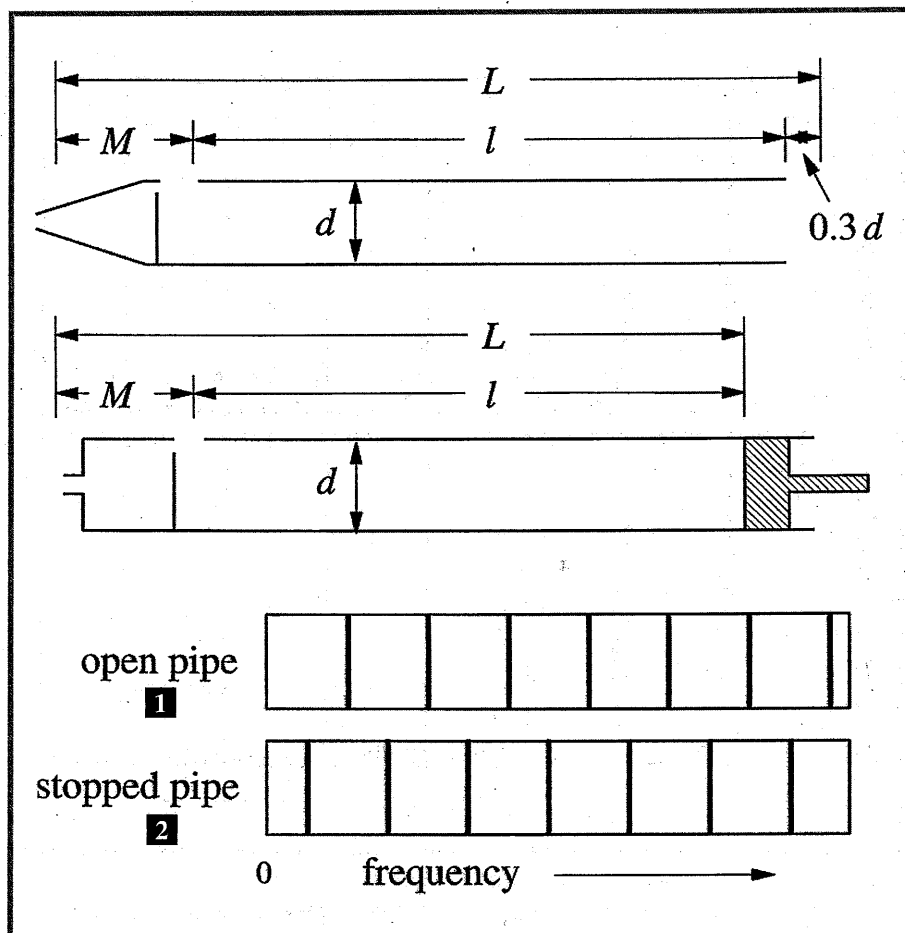


Figure 1

- 1 Tuyau ouvert
- 2 Tuyau bouché

- 1 Offene Pfeife
- 2 Gedeckte Pfeife

frequencies and so puts these upper pipe resonances out of tune so that they can no longer reinforce harmonics of the sound. A good measure of this misalignment of the resonances, and thus of the "dullness" of the tone, is the ratio of the end-correction  $M$  at the mouth to the total pipe length  $L$ . For a pipe with a cut-up that is about one-quarter of the mouth width, we find that

$$\frac{M}{L} \approx \frac{1.2d^2}{wL}$$

and this quantity varies from about 0.1 for narrow-scale string pipes, through about 0.2 for diapasons, to as much as 1 for wide-scale dull-toned flutes.

This is illustrated in Figure 2, in which we plot calculated resonance curves (actually the acoustic admittance seen by the jet) for a narrow-scale string-toned pipe and for a wide-scale narrow-mouth open flute pipe of the same pitch. Clearly the resonance peaks extend to high frequencies for the

vert et simplement les multiples impairs pour un tuyau bouché. Ces résonances renforceraient les harmoniques du son produit par la lame d'air. Il apparaît cependant, que la correction à la bouche diminue avec les hautes fréquences et rend ainsi fausses les résonances des tuyaux des dessus, de sorte qu'elles ne peuvent plus renforcer les harmoniques du son. On peut mesurer ce mauvais alignement de résonances, et ainsi le caractère sourd et étouffé du son, par le ration de la correction  $M$  à la bouche sur la longueur totale du tuyau  $L$ . Pour un tuyau ayant une hauteur de bouche correspondant environ au quart de sa largeur, nous trouvons que

$$\frac{M}{L} \approx \frac{1.2d^2}{wL}$$

et le résultat varie d'environ 0,1 pour un tuyau de gambe de taille étroite, en passant par 0,2 pour les principaux, jusqu'à 1 pour une flûte sourde de grosse taille.

The sounding length  $L$  of an organ pipe is determined by the physical length  $l$ , the end correction  $0.3d$  at the open end, and the much larger end correction  $M$  at the pipe mouth. The nominal resonances of the two types of pipe are shown in the lower part of the figure, and go in a 2,4,6... sequence for an open pipe and a 1,3,5... sequence for a stopped pipe. Because the end corrections decrease with increasing frequency, the higher pipe resonances are generally sharp in relation to these ideal frequencies.

La longueur sonore  $L$  d'un tuyau d'orgue est déterminée par la longueur physique  $l$ , la correction  $0,3d$  à l'extrémité supérieure ouverte, et la correction bien plus importante  $M$  à la bouche du tuyau. Les résonances nominales des deux types de tuyaux sont montrées sur la partie inférieure de la figure et se décomposent en une séquence de type 2,4,6... pour un tuyau ouvert et 1,3,5... pour un tuyau bouché. Du fait que les corrections sont de moins en moins importantes quand monte la fréquence, les résonances aigues des tuyaux sont généralement plus hautes que ces fréquences idéales.

Die klingende Länge  $L$  einer Orgelpfeife ist festgelegt durch die physikalische Länge  $l$ , die Endkorrektur  $0,3d$  am offenen Ende, und die sehr viel größere Endkorrektur  $M$  am Pfeifenlabium. Die nominellen Resonanzen der zwei Typen von Pfeifen werden im oberen Teil der Abbildung gezeigt und verlaufen in einer 2,4,6... Sequenz für eine offene Pfeife und in einer 1,3,5... Sequenz für eine gedeckte Pfeife. Weil die Endkorrekturen sich bei ansteigenden Frequenzen verringern, sind die höheren Pfeifenresonanzen generell scharf im Verhältnis zu diesen idealen Frequenzen.

Klages. Das zeigt, daß die Endkorrektur am Pfeifenlabium bei hohen Frequenzen geringer wird und so diese Resonanzen aus der Stimmung bringt, so daß sie die Harmonien des Klages nicht mehr verstärken können. Ein gutes Maß dieser Fehlanordnungen der Resonanzen, und gleichermaßen die „Trägheit“ des Tones, ist das Verhältnis der Endkorrektur  $M$  am Labium zur ganzen Länge der Pfeife  $L$ . Für eine Pfeife mit einem Aufschnitt von zirka 1/4 der Labienbreite sehen wir, daß

Calculated resonance curves for (a) a narrow-scaled diapason pipe with a normal mouth, and (b) a broad-scaled flute pipe with a narrow mouth. Note the general shape of the curve joining the peaks in each case, and the extent of the misalignment of these peaks with the harmonics of the fundamental, shown as broken lines.

Courbes de résonance calculées pour un principal de taille étroite avec une bouche normale (a), et pour un tuyau de flûte de taille large et de bouche étroite (b). Il faut noter la forme générale de la courbe formée par les points les plus élevés de chaque schéma, et comment ces points ne sont pas alignés avec les harmoniques de la fondamentale, apparaissant comme des lignes brisées.

Errechnete Resonanzkurven für (a) eine eng mensurierte Prinzipalpfeife mit einem normalen Labium, und (b) eine weit mensurierte Flöte mit engem Labium. Bemerkenswert die generelle Form der Kurve im Schnittpunkt aller Scheitelpunkte und den Abstand von diesen Punkten der Harmonien des Fundaments, als getrickelte Linie dargestellt.

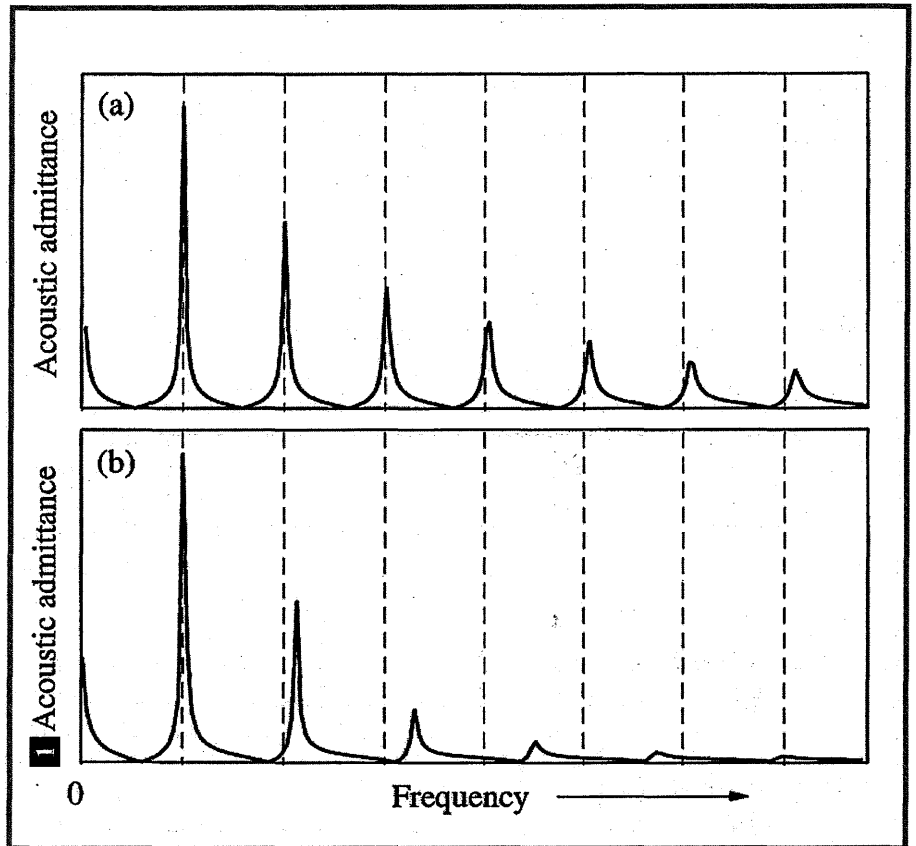


Figure 2

1 Tolérance acoustique

1 Akustischer Eintritt

narrow pipe, and are fairly well aligned with the harmonics of the fundamental. For the wide pipe, the upper resonances are weak and are quite misaligned with the harmonics of the fundamental, and so fail to reinforce them.

Actually this is far from being the whole story, even for cylindrical flue pipes, for many of them are tuned, not by means of a cylindrical sleeve that simply extends their length, but rather by means of a slot that is partly closed by a metal sleeve or by an adjustable tongue. Such a tuning slot behaves rather like the rectangular opening at the pipe mouth, and has a large end-correction, although this is in parallel with the smaller open-end correction for the main bore of the pipe. A detailed understanding can be arrived at only by considering particular cases. Even a cone-tuned pipe has a slightly complicated open-end correction, particularly if the pipe diameter is substantially reduced.

Taken together, these principles, which have been embodied in traditional rules by pipemakers, serve to determine the design for a prototype pipe of any rank. The next problem is to

C'est illustré par la figure 2, sur laquelle nous avons calculé point par point les courbes de résonance (en fait l'admission acoustique vue par la lame) pour un tuyau de gambe de taille étroite et pour un tuyau de flûte ouvert de taille large et de bouche étroite. Il est clair que les courbes de résonance montent très haut, y compris pour les hautes fréquences, dans le cas du tuyau de taille étroite, et sont plutôt bien alignées avec les harmoniques de la fondamentale. Pour le tuyau de taille large, les résonances supérieures sont faibles et complètement désordonnées par rapport aux harmoniques de la fondamentale; elles sont de ce fait incapables de les renforcer.

De fait, c'est loin d'être tout car, même pour les tuyaux de fond cylindriques, beaucoup d'entre eux sont accordés, non par l'intermédiaire de manchons cylindriques qui ne font qu'augmenter leur longueur, mais plutôt au moyen d'un pavillon partiellement fermé par un manchon métallique ou muni d'une entaille roulée ajustable. Un tel pavillon d'accord se comporte à peu près comme l'ouverture rectangulaire à la bouche du tuyau, et demande une grande correction à l'extrémité, bien

$$\frac{M}{L} \approx \frac{1.2d^2}{wL}$$

und diese Menge variiert von zirka 0,1 für einen eng mensurierten Streicher, über zirka 0,2 für Principale, bis zu 1 für weit mensurierte dumpf klingende Flöten.

Dieses wird dargestellt in Abbildung 2, in der wir errechnete Resonanzkurven grafisch darstellen (die tatsächliche Akustik beim Einlaß des Drucks) für eine eng mensurierte Streicherpfeife und für eine weit mensurierte eng labierte offene Flöte der gleichen Tonlage. Natürlich liegen die Resonanzscheitelpunkte bei den hohen Frequenzen der engen Pfeife, sie sind in einer Reihe bei den Harmonien des Gruntons. Für die weite Pfeife sind die hohen Resonanzen schwach und sehr unausgeglichen mit den Harmonien des Grundtones, sie sind so nicht in der Lage diese zu verstärken.

Dies ist jedoch längst noch nicht alles. Sogar zylindrische Labialpfeifen, die nicht nur mit Hilfe eines zylindrischen Schiebers intoniert sind, der nur ihre Länge vergrößert, sondern auch durch Setzen eines Schlitzes, der teil-

scale the whole rank so that the bass pipes are in balance with the trebles [3]. This balance relates primarily to tone quality, though loudness must also be considered.

The most obvious approach would appear to be to make all the pipes with the same ratio of diameter to length, but this results in treble pipes that are too shrill and bass pipes that are too loud and dull. The solution is therefore to make the bass pipes rather narrow relative to the trebles, and a typical design solution is to halve the pipe diameter about every 15 to 18 semitones when ascending the scale, rather than doing so every octave. Another way of expressing this is to give the diameter ratio for pipes an octave apart. For proportional scaling the ratio is 2:1, while for typical practical scalings it is around 1.6 to 1.7. Various numerical reasons have been suggested, for example relating this number to the golden ratio, 1.618, but there is actually an acoustical reason for the scaling [4]. Assuming that the mouth width and cut-up remain constant fractions of the pipe diameter, then the main determinant of the tone is the acoustic loss to the pipe walls, which varies with frequency and affects the height of the pipe resonances. Analysis on this basis suggests an octave diameter ratio of

$$2^{5/6} = 1.78$$

to achieve tonal balance, but pipe ranks scaled by this rule are still rather too dull in the bass, and a modern scaling of about

$$2^{3/4} = 1.68$$

is usually adopted. As in most things musical, the human ear is the final judge!

Of course, not all flue pipes are simple cylinders. There is little acoustic difference between a pipe with a round section and one with a square section, though there can be a difference because of the necessarily thick walls of the square wooden pipe and the influence of this on the mouth geometry. Tapering pipes, however, and pipes with perforated stoppers have their own characteristic resonance properties that can be calculated fairly easily. In particular, chimney flutes have displaced

que ce soit en parallèle avec la plus petite correction nécessaire à la partie ouverte en haut du tuyau. On ne peut arriver à une compréhension du phénomène qu'en étudiant des cas particuliers. Même un tuyau coupé au ton demande une correction relativement compliquée, en particulier si son diamètre est étroit.

L'ensemble de ces principes, que les tuyautiers ont exprimés sous la forme de règles traditionnelles, servent à concevoir n'importe quel tuyau type de n'importe quel rang. Le problème suivant consiste à calculer la progression de taille de tout le rang de sorte que les basses soient équilibrées par rapport aux dessus [3]. Cet équilibre met avant tout en jeu la qualité du son, bien que la force soit aussi concernée.

L'approche la plus évidente serait a priori de fabriquer tous le tuyaux avec le même rapport entre diamètre et longueur, mais on arrive ainsi à des dessus trop criards et des basses trop fortes et ternes. La solution est donc de faire les basses relativement plus étroites que les dessus. La solution classique, lorsqu'on diapasonne un jeu, est de diviser par deux le diamètre des tuyaux tous les 15 à 18 demi-tons, plutôt que de le faire toutes les octaves. On peut aussi exprimer cela en faisant un rapport des diamètres d'une octave sur l'autre. Dans le cas d'un diapasonnage proportionnel le rapport est de 2:1, alors que le diapasonnage pratique traditionnel est d'environ 1,6 ou 1,7. Des explications numérologiques diverses ont été avancées, notamment en rapprochant ce chiffre du nombre d'or, 1,618, mais il y a en fait une raison acoustique au diapasonnage [4]. En présumant que la largeur et la hauteur de bouche restent des fractions constantes du diamètre, alors le déterminant principal du ton est la perte acoustique des parois du tuyau, qui varie avec la fréquence et affecte la hauteur des résonances du tuyau. Une analyse de ce phénomène permet de suggérer un rapport de diamètre à l'octave de

$$2^{5/6} = 1.78$$

pour parvenir à un équilibre tonal, mais les jeux diapasonnés selon cette formule sont encore plutôt trop ternes dans la basse, et on adopte généralement un diapasonnage moderne de

weise durch einen Metallschieber oder durch eine verschiebbare Lasche geschlossen ist. Ein solcher Stimm Schlitz verhält sich genau so wie eine rechteckige Öffnung am Pfeifenlabium, und hat eine große Endkorrektur, er ist gleichzusetzen mit einer kleineren Korrektur am offenen Ende für die Bohrung der Pfeife. Ein detailliertes Verständnis kann nur erreicht werden unter Berücksichtigung verschiedener Umstände. Sogar eine mit Stimmhorn intonierte Pfeife hat eine etwas schwierige Korrektur, besonders wenn der Pfeifendurchmesser erheblich reduziert ist.

Diese Grundsätze, die entstanden sind aus traditionellen Regeln von Pfeifenmachern, dienen zusammenfassend dazu, die Bauform eines Pfeifenprototyps einer Pfeifenreihe festzulegen. Das nächste Problem ist, das ganze Register zu mensurieren, so daß die Baßpfeifen mit den Diskantpfeifen im Einklang stehen [3]. Dieses Gleichgewicht bezieht sich hauptsächlich auf die Tonqualität, darum muß auch die Lautstärke berücksichtigt werden. Es scheint am naheliegendsten zu sein, alle Pfeifen mit dem gleichen Verhältnis von Durchmesser und Länge zu machen, aber dieses führt bei Diskantpfeifen dazu, daß diese zu schrill und die Baßpfeifen zu laut und zu träge sind. Die Lösung ist daher, die Baßpfeifen im Verhältnis zu den Diskantpfeifen enger zu machen, eine typische Konstruktionslösung ist, den Pfeifendurchmesser zirka jeden 15. bis 18. Halbton zu halbieren beim Ansteigen der Mensur, eher als dies jede Oktave zu tun. Ein anderer Weg dieses zu erreichen ist, das Durchmesser Verhältnis jeder Oktave einzeln anzugeben. Für die proportionale Mensurierung ist das Verhältnis 2:1, während es in der Praxis um 1,6 bis 1,7 liegt. Verschiedene rechnerische Möglichkeiten wurden geprüft, zum Beispiel die Zahl ins Verhältnis zum goldenen Schnitt 1,618 zu setzen, aber es gibt eigentlich einen akustischen Grund für diese Mensurierung [4]. Vorausgesetzt, daß die Labierung und der Aufschnitt konstante Teile des Pfeifendurchmessers sind, dann ist am entscheidendsten für den Ton der akustische Verlust der Pfeifenresonanzen. Daraus ist zu schließen, daß ein Durchmesser Verhältnis von

$$2^{5/6} = 1.78$$

resonances in the vicinity of the resonance of the chimney itself that can be adjusted to give prominence to a higher harmonic of the basic sound by tuning a particular pipe resonance to an exact multiple of the fundamental frequency.

### Air-Jet Drive and Pipe Voicing

The body of the pipe essentially serves as a resonator that is driven by the air jet from the pipe flue, so it is important to understand how this drive works and how it is affected by voicing adjustments. The mechanism is complex, since it involves the aerodynamics of an air jet, and has still not been completely worked out. We do, however, now have a reasonable understanding of what goes on [1].

The air jet emerging from the flue is unstable, as can be seen by adding smoke. Very small transverse disturbances of the jet as it emerges from the flue grow in size as the jet travels and ultimately roll up as vortices. With the pipe body and the upper lip in place, we now have a mechanism by which the pipe oscillations can control the flow of the jet. The role of vortices is not yet clear, but the transverse displacements of the jet provide the drive for the organ pipe.

When the pipe is sounding, the sound drives air into and out of the mouth (and the open end, if there is one) at the frequency of the pipe fundamental. This flow disturbs the jet at the flue opening, and these disturbances grow as they are carried by the jet towards the pipe lip, so that the jet flows alternately into and out of the pipe at that lip. These disturbances travel along the jet at just about half the speed of the air in jet itself (given in metres per second by

$$13\sqrt{p}$$

if  $p$  is in centimetres water gauge) and, if the cut-up is correct, will reach the lip at just the right part of the cycle to reinforce the acoustic flow in the pipe and maintain its sound. If they arrive at the wrong part of the cycle because the cut-up is not correctly matched to the blowing pressure, they will oppose the pipe flow and the sound will die, or

$$2^{3/4} = 1.68$$

Comme pour la plupart des choses qui touchent à la musique, l'oreille humaine est le dernier juge!

Bien sûr tous les tuyaux de fond ne sont pas de simples cylindres. Il y a peu de différence acoustique entre un tuyau rond et un tuyau de section carrée, bien qu'il puisse y avoir une différence du fait des parois nécessairement épaisses des tuyaux carrés et de l'influence de ce paramètre sur la géométrie de la bouche. Les tuyaux bouchés, cependant, et les tuyaux à cheminée ont cependant leurs propres propriétés de résonance qui peuvent être calculées assez facilement. Les flûtes à cheminée, en particulier, ont des résonances déplacées au voisinage de la résonance de la cheminée elle-même qui peuvent être alignées pour faire dominer une harmonique supérieure de la fondamentale en accordant la résonance particulière d'un tuyau sur un multiple exact de la fréquence fondamentale.

### Trajet de la lame d'air et harmonisation du tuyau

Le corps du tuyau est principalement un résonateur dans lequel l'onde stationnaire est excitée par la lame d'air, il est donc important de comprendre comment fonctionne ce phénomène et dans quelle mesure il peut être affecté par l'harmonisation. Le phénomène est complexe puisqu'il fait entrer en ligne de compte les principes aérodynamiques d'une lame d'air, et n'a pas encore été étudié de façon exhaustive. Nous avons cependant à présent la quasi-certitude de comprendre ce qui se passe [1].

La lame d'air issue de la lumière est instable, comme on peut le voir en la colorant avec de la fumée. De très petites perturbations transversales de la lame grossissent pendant le trajet alors qu'elle sort de la lumière pour s'enrouler en tourbillons. Le corps et la lèvre supérieure étant dans la situation qui est la leur, ils permettent d'obtenir un mécanisme par lequel les oscillations du tuyau peuvent contrôler le flux de la lame. Le rôle des tourbillons n'est pas encore clair, mais les déplacements transversaux de la lame apportent de l'énergie au tuyau d'orgue.

Lorsque le tuyau sonne, le son con-

empfehlenswert ist, um die klangliche Ausgewogenheit zu erreichen, aber Pfeifenreihen, die mit dieser Regel mensuriert sind, sind noch immer zu träge im Baßbereich, und eine moderne Mensurierung wie etwa

$$2^{3/4} = 1.68$$

ist normalerweise angenommen. Wie bei den meisten musikalischen Dingen, trifft das menschliche Ohr die letzte Entscheidung!

Selbstverständlich sind nicht alle Pfeifen einfach zylindrisch. Es gibt geringe klangliche Unterschiede zwischen einer Pfeife mit einem runden Körper und einer mit einem eckigen Körper. Ebenso kann ein Unterschied aufgrund der nötigen Wandstärke einer eckigen Holzpfeife und deren Einfluß auf die Labiengeometrie entstehen. Konische Pfeifen und Pfeifen mit Deckeln mit Löchern haben ihre eigenen charakteristischen Resonanzeigenschaften, die sehr leicht kalkuliert werden können. Im Einzelnen, Rohrflöten haben versetzte Resonanzen in der Nähe der Resonanz des Rohres selbst, die benutzt werden können, um einen harmonischeren Grundton beim Stimmen einer einzelnen Pfeife zu einer exakten Kopie der Fundamentalfrequenz zu erhalten.

### Bewegung des Luftbandes und Intonation der Pfeife

Der Körper einer Pfeife dient hauptsächlich als Schallbecher, der durch das aus der Kernspalte austretende Luftband zum Schwingen gebracht wird. Es ist wichtig, dieses Phänomen zu verstehen, und zu wissen, wie es durch die Intonation beeinflusst werden kann. Dieser, die Aerodynamik des Luftbandes betreffende Vorgang, ist sehr komplex und wurde noch nicht gänzlich erforscht. Wir haben jetzt aber schon ein ganz gutes Verständnis für den Ablauf der Dinge [1].

Das aus der Kernspalte austretende Luftband ist instabil, wie man sehen kann, wenn man Rauch hinzugibt. Wenn das Luftband aus der Spalte austritt, treten sehr geringe transversale Störungen auf, die sich mit ihrer Entfernung von der Spalte verstärken und letztlich zu Wirbeln werden. Sind Pfeifenkörper und Oberlabium am richtigen Platz, er-

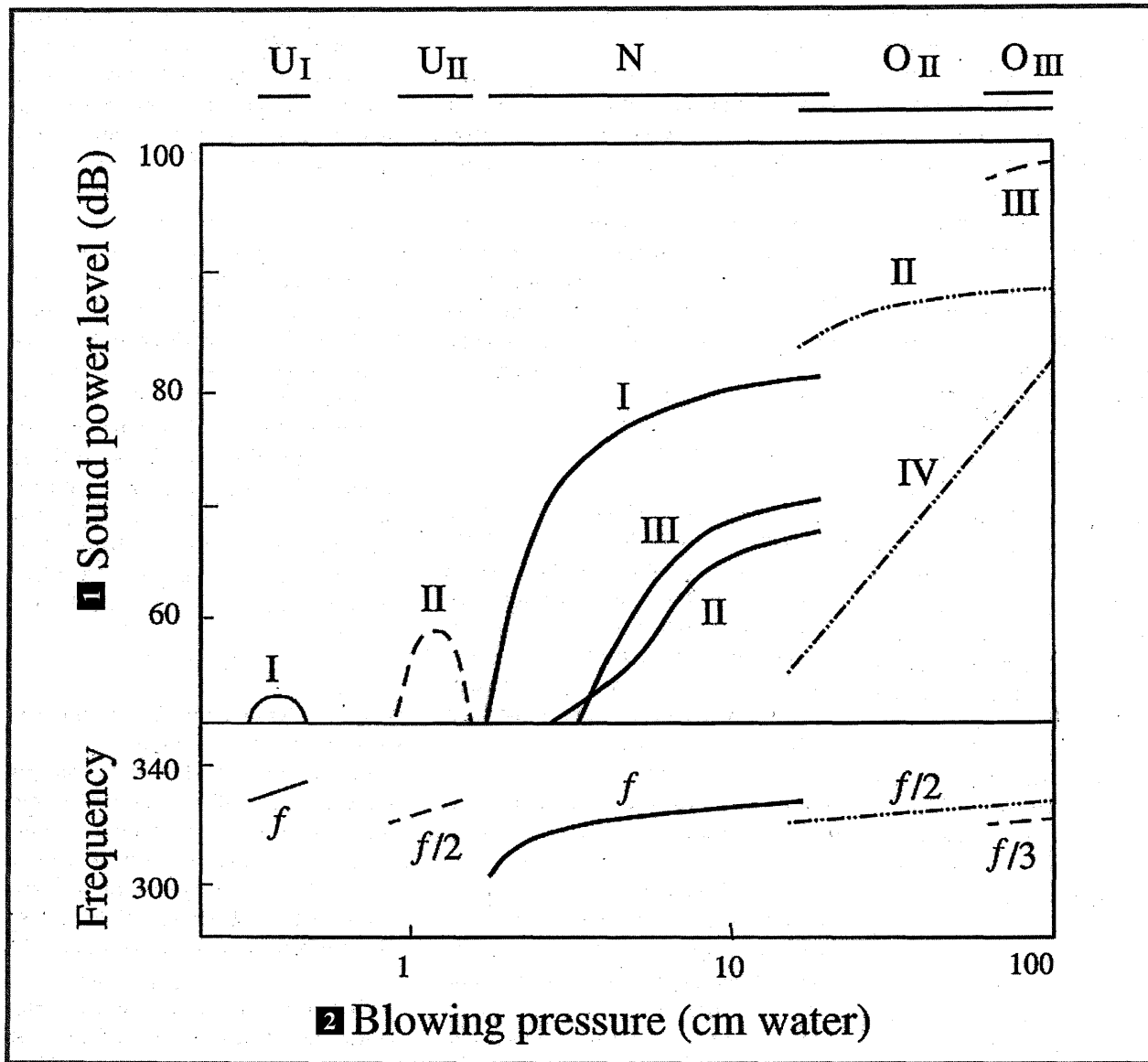


Figure 3

Measured sound output of a typical diapason pipe as a function of blowing pressure. The pipe is designed to be blown with about 10cm water gauge pressure, where the frequency is fairly stable. Levels of the fundamental I, and the harmonics II and III are shown in each regime. In the primary sounding regime N, shown with heavy lines, there are between one-half and three-halves of a disturbance wavelength on the air jet. In the underblown regimes U<sub>I</sub> and U<sub>II</sub> at low pressure, there are about one-and-a-half wavelengths on the air jet at the frequency I or II that sounds. In the overblown regimes O<sub>I</sub> and O<sub>II</sub> there is less than one-half wavelength of the fundamental on the jet, and somewhere between one-half and three-halves of a wavelength of the higher mode II or III that sounds.

Mesure du rendement sonore d'un tuyau de principal type montrant l'effet de la pression. Le tuyau est conçu pour parler à une pression de 100 mmCE, dans une zone où la fréquence est assez stable. Les niveaux de la fondamentale I, et des harmoniques II et III sont montrés pour chaque régime. Pour le premier régime sonore N, qui apparaît en ligne continue, il y a entre une demi-longueur et une longueur d'onde et demie de perturbation de la lame d'air. Dans les régimes en sous-pression U<sub>I</sub> et U<sub>II</sub> il y a environ une longueur d'onde et demie de la lame d'air à la fréquence I ou II qui sonne. Dans les régimes en surpression O<sub>I</sub> et O<sub>II</sub> ce qui sonne correspond à moins d'une demi-longueur d'onde de la fondamentale de la lame, et à quelque chose entre une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde et demie du mode II ou III plus aigu.

Gemessener Klangaustritt einer typischen Prinzipalpfeife als Funktion durch Luftdruck. Die Pfeife ist konstruiert, um mit einem Winddruck von ca. 10 cm Wassersäule zu sprechen, wo die Frequenz recht stabil ist. Die Ebenen des Grundtons I und der Harmonien II und III sind in jedem Bereich zu sehen. Im hauptsächlich Klangbereich N, markiert durch dicke Linien, gibt es zwischen 1/2 und 3/2 einer unterbrochenen Wellenlänge im Luftstrahl. In den unterblasenden Bereichen U<sub>I</sub> und U<sub>II</sub> bei niedrigem Druck, sind etwa eineinhalb Wellenlängen im Luftstrahl auf der Frequenz I oder II die klingen. In dem überblasenden Bereich O<sub>I</sub> und O<sub>II</sub> ist es weniger als eine halbe Wellenlänge des Fundaments im Strahl, und etwas zwischen 1/2 und 3/2 einer Wellenlänge der höheren Tonlage II oder III, die klingen.

rather not start in the first place. In the correct relation there is somewhere between about one quarter and three quarters of a wavelength of the disturbance on the jet between the flue and the lip. This corresponds to a pressure range of nearly 10 to 1, but outside this range the pipe will not sound in this mode.

This behaviour is illustrated in Figure 3, which shows the measured sound output from a typical diapason pipe, designed to be blown at a pressure of about 10 cm water gauge. (It is interesting to note that we have now progressed far enough in our understanding that the calculated results are very similar.) In addition to the primary sounding regime at around this pressure, there are various underblown and overblown regimes at which other modes of the pipe can sound. Within the primary regime, the sound output increases with blowing pressure and, in addition, so do the strengths of the higher harmonics in the sound. We note that the sounding frequency is more stable in the higher part than it is in the lower part of the allowed pressure range, and that the levels of the upper harmonics, which add brightness to the sound, increase as the blowing pressure is increased.

Once the blowing pressure has been decided in the pipe design, the next thing is to determine the lip cut-up. Because of the relation between blowing pressure and jet velocity, an increase in the cut-up by a factor  $x$  requires an increase of blowing pressure by a factor  $x^2$  if a "standard" condition is to be maintained. If the blowing pressure is not increased, then this has a similar effect to moving to the left in the diagram of Figure 3, so that the loudness is decreased and, more importantly, so are the levels of the upper harmonics, making the tone less bright. If the blowing pressure is increased to match the increased cut-up, then the loudness also increases, because more energy is being supplied to the pipe, but the tone still becomes duller because the jet spreads as it travels, and so produces a smoother flow into and out of the pipe mouth than if it were narrow, resulting in reduced generation of high harmonics.

This harmonic generation requires further comment. When the jet flows in

duit l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la bouche (et de l'extrémité supérieure ouverte, s'il y en a une) à la fréquence de la fondamentale du tuyau. Ce flux dérange la lame à la lumière, et ces perturbations grandissent à mesure qu'elles sont transportées par la lame vers la lèvre supérieure, de sorte que la lame s'écoule alternativement à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau au niveau de cette lèvre. Ces perturbations voyagent le long de la lame à peu près à la moitié de la vitesse de l'air de la lame (exprimée en mètres par seconde par

$$13\sqrt{p}$$

si  $p$  est en centimètres CE), et, si la hauteur de bouche est correcte, elles atteindront la lèvre juste au bon moment du cycle pour renforcer le flux acoustique et maintenir le son. Si elles arrivent à un mauvais moment du cycle parce que la hauteur de bouche n'est pas correctement proportionnée à la pression du vent, elles s'opposeront au flux du tuyau et le son s'étouffera, ou plutôt l'attaque se fera avec retard. Lorsque la relation est correcte il y a entre le quart et trois quarts, environ, d'une longueur d'onde de perturbation de la lame entre la lumière et la lèvre. Cela correspond à un écart de pression de un à dix, mais en dehors de cette zone le tuyau ne sonnera pas dans ce mode.

Ce comportement est illustré sur la figure 3, qui montre l'évaluation chiffrée du rendement sonore d'un tuyau caractéristique de principal, conçu pour parler à une pression d'environ 100 mmCE. (Il est intéressant de noter à présent que nous avons suffisamment progressé dans notre compréhension du problème que les résultats obtenus sont très similaires). Outre ce premier régime sonore à la pression indiquée, le tuyau peut parler à différents régimes de pression supérieure ou inférieure à 100 mmCE. Dans le premier cas, la production sonore augmente avec la pression et, en outre, la force des harmoniques supérieurs augmente aussi. Nous remarquons que la fréquence sonore est plus stable à forte pression, et que croît en même temps que cette dernière le niveau des harmoniques supérieurs, qui ajoutent de la brillance au son.

Une fois la pression déterminée dans la conception du tuyau, il faut déterminer la hauteur de bouche. Du fait de la

hält man einen Mechanismus, durch den die Pfeifenschwingungen das Luftband steuern können. Der Einfluß der Wirbel ist nicht ganz klar, aber die transversalen Verlagerungen des Luftbandes sorgen für die Klangenergie der Orgelpfeife.

Wenn die Pfeife klingt, drückt der Schall Luft in das Labium hinein und heraus (und das offene Ende, falls es eines gibt) auf der Frequenz der Pfeife. Der Fluß wird unterbrochen an der Kernspalte und diese Unterbrechungen wachsen an während sie mit dem Luftstrom zum Pfeifenlabium getragen werden, so daß der Strom abwechselnd hinaus und herein fließt am Labium. Diese Unterbrechungen gehen den Strahl entlang mit etwa der halben Geschwindigkeit des Luftstroms selbst (angegeben in Metern pro Sekunde durch

$$13\sqrt{p}$$

wenn  $p$  in Zentimetern Wassersäule ist) und wenn der Aufschnitt korrekt ist, erreichen sie das Labium genau an der richtigen Stelle des Zyklus, um die Akustik der Pfeife zu verstärken und ihren Klang zu erhalten. Wenn sie an der falschen Stelle des Zyklus ankommen, dadurch daß der Aufschnitt nicht korrekt dem Winddruck entsprechend gemacht wurde, wirken sie entgegen dem Fluß und der Klang stirbt, oder er setzt erst gar nicht ein. Das korrekte Verhältnis ist irgendwo zwischen 1/4 und 3/4 der Wellenlänge der Unterbrechung des Luftstrahls zwischen Kernspalte und Labium. Dies entspricht einem Druck von nahezu 10 zu 1, aber außerhalb dieses Maßes klingt die Pfeife nicht in diesem Modus.

Diese Arbeitsweise wird gezeigt in Abbildung 3, die den gemessenen Klangaustritt einer typischen Principalpfeife zeigt, konstruiert um auf einer Wassersäule von ca. 10 cm zu spielen. (Es ist interessant festzustellen, daß wir jetzt genug Erfahrung gesammelt haben, um zu verstehen, daß die berechneten Ergebnisse sehr ähnlich sind.) Zusätzlich zu diesem Hauptklangbereich um zirka diesen Winddruck, gibt es verschiedene unterblasende und überblasende Bereiche in denen die Pfeife in anderen Tonlagen klingt. Innerhalb des Hauptklangbereichs läßt der Klangaustritt den fließenden Druck anwachsen und ebenso die Stärke der höheren Har-

(a) The acoustic response curve of a highly damped woodwind reed as a function of frequency and for two different blowing pressures, one below (i) and one above (ii) the threshold. When the response curve lies in the shaded region, the reed can act as an acoustic generator. Above the threshold pressure, the reed can act as a generator with a fairly smooth response at any frequency below its resonance, and the sounding frequency is primarily determined by the pipe resonator. (b) Two response curves for a lightly damped metal reed, as in an organ pipe. There is a strong resonance behaviour and a peak in generating efficiency just below the mechanical resonance frequency of the reed. This reed resonance essentially determines the sounding frequency of the pipe to which it is coupled.

(a) Courbe de réponse acoustique d'une anche à bouche fortement amortie permettant de voir la fréquence à deux niveaux de pression différents, un en dessous (i) et un au-dessus (ii) du seuil. Quand la courbe de réponse se trouve dans la zone ombragée, l'anche agit comme générateur acoustique. Au-dessus de la pression limite, l'anche peut agir comme générateur avec une réponse assez régulière à n'importe quelle fréquence en dessous de sa résonance, et la fréquence sonore est déterminée en premier lieu par le résonateur du tuyau.

(b) Deux courbes de réponse pour une languette de métal peu amortie, comme c'est le cas pour un tuyau d'orgue. Il y a une forte résonance et un maximum d'efficacité juste en dessous de la fréquence de résonance mécanique de l'anche. Cette résonance de l'anche détermine essentiellement la fréquence sonore du tuyau avec lequel elle fonctionne.

- 1 Amortissement
- 2 Amorçage
- 3 Fréquence de résonance de l'anche

(a) Die akustische Schallkurve eines stark gedämpften Holzzungentones als Funktion einer Frequenz und für zwei verschiedene Luftdrücke, einer unter-

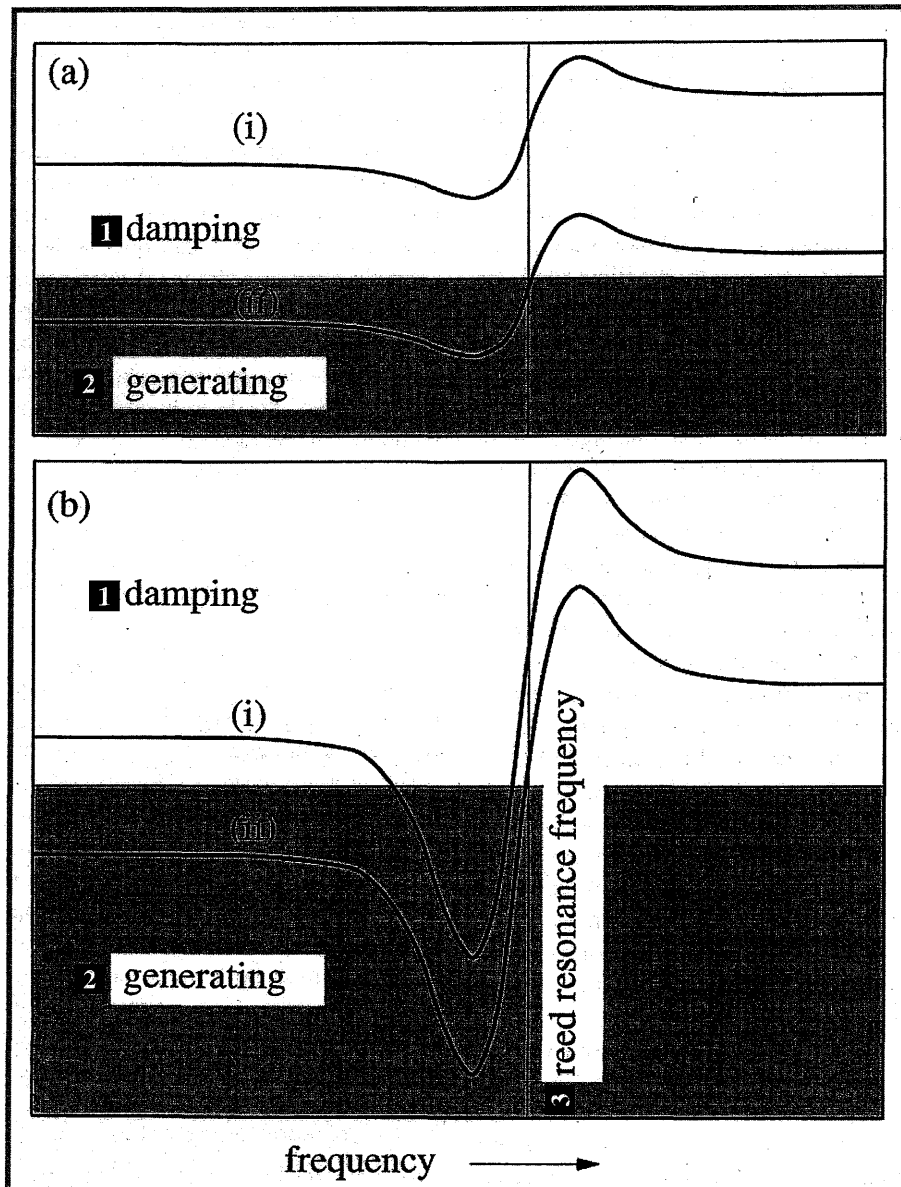


Figure 4

halb (i) und einer oberhalb (ii) der Schwelle. Wenn die Schallkurve in der schattierten Region liegt, kann die Zunge als akustischer Antrieb arbeiten. Oberhalb der Druckschwelle kann die Zunge als Antrieb mit einem sehr weichen Widerhall in jeder Frequenz unterhalb ihrer Resonanz arbeiten, die Klangfrequenz ist hauptsächlich herauszufinden durch den Schallbecher. (b) Zwei Schallkurven für eine leicht gedämpfte Metallzungenstimme, wie bei

einer Orgelpfeife. Es gibt ein starkes Resonanzverhalten und einen großen Nutzungsbereich direkt unter der mechanischen Resonanzfrequenz der Zunge. Diese Zungenresonanz ist hauptsächlich entscheidend für die Klangfrequenz der Pfeife, mit der sie verbunden ist.

- 1 Dämpfung
- 2 Erzeugung
- 3 Zungenresonanzfrequenz

a pulsating manner into and out of the pipe at the lip, it normally generates all harmonics of its basic frequency, which is the sounding frequency of the pipe. These harmonics are reinforced by the pipe resonances, provided that they line up well in frequency (as do only the odd resonances in the case of a stopped

relation entre la pression et la vitesse de l'air de la lame, une augmentation de la hauteur de bouche d'un facteur  $x$  demande une augmentation de la pression d'un facteur  $x^2$ , toutes conditions égales par ailleurs. S'il n'y a pas d'augmentation de la pression, cela revient à un déplacement vers la gauche sur le

monien des Klanges. Wir stellen fest, daß die Stimmfrequenz im oberen Teil des Druckbereichs stabiler ist als im unteren Teil, und daß die Höhen der oberen Harmonien, die dem Klang Glanz geben, anwachsen, wenn der Windfluß stärker ist. Zum einen muß der Winddruck beim Konstruieren einer Pfeife

pipe), and so contribute to the pipe sound. There are, however, several voicing adjustments that can be made that affect this. If the undisturbed jet blows directly at the lip of the pipe, then its motion will be nearly symmetrical when it starts to oscillate and, since a symmetrical motion contains only odd harmonics, the pipe sound will have predominantly odd harmonics, whether it is open or stopped. This is borne out by experiment [4]. If, however, the languid is adjusted so that the undisturbed jet blows predominantly into or outside the pipe lip, then the jet motion will not be symmetrical, and all harmonics will be produced. This is a rather subtle voicing adjustment, but is important to the tone quality of the pipe [5-7]. It also affects the promptness of the initial speech.

Another thing that can be adjusted in the voicing process is the width of the flue slit. Clearly a broader slit will lead to a greater flow of air in the jet, which will in turn carry more energy and lead to a louder pipé sound. The pneumatic power input to the organ pipe is the product of the blowing pressure and the volume flow, and the sound output of the pipe is nearly, but not quite, proportional to this quantity. A large blowing pressure associated with a large cut-up thus produces a loud but somewhat dull sound. Actually only about 1 percent of the input power is converted to sound, the rest being dissipated in the spreading jet and in viscous losses to the pipe walls. This efficiency is about the same as that of most other musical instruments.

Transients are, of course, important in all musical sounds, and study of the initial transient of a flue pipe, apart from being important in itself, explains how the pipe is made to begin sounding. The air jet must be adjusted so that part of it blows inside the upper lip of the pipe. When air enters the pipe foot and starts the jet, this applies a pressure shock to the air column inside the pipe, rather like slapping a finger across its mouth, and activates all the pipe modes to small amplitude. These modes then interact back on the jet and the sound builds up in a way that depends upon the rate of rise of blowing pressure in the foot of the pipe [7]. This is, of course, only one of the adjustments that effect the

diagramme de la figure 3, de sorte que la force est diminuée, et, de façon plus notable, les harmoniques supérieurs sont atténués, ce qui rend le son moins brillant. Si la pression est montée pour compenser l'augmentation de la hauteur de bouche, alors la force augmente également, davantage d'énergie étant apportée au tuyau. Mais la couleur sonore devient alors plus sombre car la lame d'air s'étend, ce qui produit un flux plus égal à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la bouche du tuyau que si elle était plus basse. Cela produit une moindre génération d'harmoniques supérieurs.

La production de ces harmoniques nécessite un commentaire plus approfondi. Quand la lame d'air ondoie par intermittence à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau au niveau de la lèvre supérieure, cela produit normalement tous les harmoniques de sa fréquence de base, ce qui donne la fréquence sonore du tuyau. Ces harmoniques sont renforcés par la résonance du tuyau, s'ils s'intègrent à la fréquence de base (il n'y a que les résonances impaires qui puissent le faire dans le cas d'un tuyau bouché); elles participent ainsi à la sonorité du tuyau. Il y a cependant différentes manipulations dans l'harmonisation qui peuvent modifier cela. Si la lame d'air non perturbée s'écoule directement à la lèvre supérieure du tuyau, alors son mouvement sera quasiment symétrique quand elle commencera à osciller, et, un mouvement symétrique ne contenant que des harmoniques impaires, le tuyau aura de façon prédominante des harmoniques impaires, qu'il soit ouvert ou bouché. Cela a été démontré par des expériences [4]. Si, cependant, le biseau est positionné de façon que la lame d'air non perturbée s'écoule de façon prédominante à l'intérieur ou à l'extérieur de la lèvre supérieure du tuyau, alors son mouvement ne sera plus symétrique, et toutes les harmoniques seront produits. C'est une technique d'harmonisation assez subtile, mais importante quant à la qualité sonore du tuyau [5-7]. Cela affecte aussi la promptitude de l'attaque.

On peut également au cours de l'harmonisation jouer sur la largeur de la lumière. Evidemment, une lumière plus large engendre un flux plus important d'air dans la lame, qui a de ce fait davantage d'énergie, ce qui fait produire au tuyau un son plus fort. La puissance

berücksichtigt werden, zum anderen ist der Aufschnitt entscheidend. Aufgrund des Verhältnisses zwischen Winddruck und Windgeschwindigkeit erfordert ein Ansteigen des Aufschnitts um Faktor  $x$  eine Erhöhung des Winddrucks um einen Faktor  $x^2$ , wenn eine Standardbedingung beibehalten werden soll. Wenn der Winddruck nicht angehoben wird, dann ergibt sich ein ähnlicher Effekt wie auf der linken Seite des Diagramms von Abbildung 3, so daß die Lautstärke abnimmt und, noch wichtiger, ebenso die Höhen der oberen Harmonien, der Ton hat weniger Glanz. Wenn der Winddruck entsprechend dem höheren Aufschnitt angehoben wird, dann steigt die Lautstärke ebenfalls an, weil die Pfeife mit mehr Kraft versorgt wird, aber der Ton wird schleppender, weil der Luftstrom sich während des Laufs ausbreitet, dadurch entsteht ein glatterer Fluß hinein und heraus aus dem Labium als wenn er enger wäre. Daraus resultiert eine geringere Erzeugung von hohen Harmonien.

Diese Erzeugung von Harmonien erfordert eine weitere Erklärung. Wenn der Luftstrahl in pulsierender Weise hinein und heraus aus dem Labium fließt, erzeugt er normalerweise alle Harmonien der Grundfrequenz, dies ist die Klangfrequenz der Pfeife. Diese Harmonien werden unterstützt von den Resonanzen der Pfeife, so daß sie sich gut aneinanderreihen in der Frequenz (wie es nur die ungewöhnlichen Resonanzen bei gedeckten Pfeifen tun) und so zum Pfeifenklang beitragen. Es gibt verschiedene Intonationsmaßnahmen, um dies zu beeinflussen. Wenn der ungestörte Strahl direkt auf das Labium der Pfeife trifft, dann ist seine Bewegung nahezu symmetrisch, wenn sie anfängt sich zu drehen und, da eine symmetrische Bewegung keine gängigen Harmonien hat, wird der Klang der Pfeife vorwiegend auch keine gängigen Harmonien haben, egal ob die Pfeife offen oder gedeckt ist. Dieses ist durch Versuche belegt. Wenn jedoch der Kern so angepaßt ist, daß der ungestörte Luftstrom hauptsächlich innerhalb oder außerhalb des Pfeifenlabiums bläst, dann ist der Lauf des Strahls nicht symmetrisch und alle Harmonien werden erzeugt. Dies ist eine wirklich raffinierte Art des Intonationsausgleichs, aber wichtig für die Tonqualität der Pfeife [5-6]. Sie beein-

transient, another important one being nicking of the languid, if this is done, which induces turbulence in the jet flow. Other more subtle adjustments lie outside the scope of this brief survey.

## Reed Pipes

Reed-pipe resonators differ from flue-pipes in that the pipe is effectively closed at the reed end, so that the resonance frequencies are different. This statement is not exactly true, but the reed does require to be located at a pressure maximum in the pipe, since this is what drives its motion. A conical pipe closed at its narrow end has resonance frequencies that are the same as those of an open cylindrical pipe of the same length (ignoring the end-correction at the mouth). Such conical pipes produce "full-length" resonators. A cylindrical pipe closed at the reed end, on the other hand, behaves like a stopped flue pipe, so that reed pipes can also be given "half-length" cylindrical resonators. As with stopped flue pipes, these cylindrical pipes reinforce only the odd harmonics of the fundamental, giving a clarinet-like tone. There are, of course, subtleties about both of these statements. For conical pipes we have to worry about corrections at the reed end, because the pipe does not come to an ideal point. The best approximation is to make the volume inside the shallot equal to the volume of the section removed from the apex of the cone, since this preserves most nearly the harmonic resonances of the pipe. More subtle adjustments relate to the constriction of the shallot where it joins the pipe. For cylindrical pipes there is a similar geometrical approximation involved. Scaling rules for reed pipes have not been discussed in detail, but generally follow those for flue pipes for much the same reasons.

The reed of an organ pipe is of the variety that can be described as "blown closed", rather like the reeds of woodwind instruments [1]. The sound-generating characteristics of such a reed valve are shown in Figure 4, which also shows the distinction between woodwind reeds and the metal reeds of organ pipes. In a woodwind instrument, the free vibration frequency of the reed is much higher than the frequency of the note being played, and the reed is

pneumatique introduite dans le tuyau est le produit de la pression du vent et du volume du flux. Le résultat sonore du tuyau est à peu près, mais pas tout à fait, proportionnel à ce produit. Une pression élevée associée à une hauteur de bouche élevée produit ainsi un son fort mais quelque peu terne. De fait, seulement environ 1% de l'énergie introduite est convertie en son, le reste étant dissipé dans la lame d'air qui s'étire, et dans les frottements avec les parois du tuyau. Ce taux d'efficacité est à peu près comparable à celui d'autres instruments de musique.

Les transitoires sont bien entendu importants dans tout son musical, et l'étude du transitoire d'attaque d'un tuyau de fond, outre le fait d'être importante en soi, permet d'expliquer comment le tuyau est poussé à parler. La lame d'air doit être dirigée de façon qu'une partie passe à l'intérieur du tuyau. Quand l'air pénètre à l'intérieur du pied et engendre la lame, cela provoque un choc de pression sur la colonne d'air à l'intérieur du tuyau, un peu comme lorsqu'on frappe sa bouche du doigt, ce qui donne naissance à tous les harmoniques du tuyau à une faible amplitude. Ces harmoniques ont alors une influence sur la lame et le son se construit d'une façon qui dépend de la croissance de la pression à l'intérieur du pied [8]. Ceci n'est bien sûr qu'un des paramètres qui affectent le transitoire, le fait de faire des dents sur le biseau en étant un autre. Ces dents, lorsqu'elles sont faites, entraînent des turbulences dans la lame d'air. D'autres pratiques plus subtiles sortent du cadre de cette brève étude.

## Les anches

Les résonateurs de tuyaux d'anches sont différents de ceux des fonds en ce que le tuyau est effectivement fermé au bout de l'anche, de sorte que les fréquences de résonance sont différentes. Cela n'est pas tout à fait exact, mais l'anche demande un maximum de pression dans le tuyau, puisque c'est ce qui produit le mouvement. Un tuyau conique bouché dans sa partie étroite a des fréquences de résonance qui sont les mêmes que celles d'un tuyau cylindrique ouvert de même longueur (sans parler des corrections de longueur nécessaires à la bouche). De tels tuyaux coniques donnent des tuyaux de lon-

fluit auch die prompte Ansprache.

Eine andere Sache, die ausgleichend beim Intonationsprozeß wirken kann, ist die Labienbreite. Sicherlich führt eine breitere Öffnung zu einem größeren Durchlaß an Luft, der seinerseits mehr Kraft hat und zu einem lauterem Ton führt. Der pneumatische Druckeinlaß in die Orgelpfeife ist das Ergebnis von Winddruck und Menge des Flusses, und der Klangauswurf der Pfeife ist nahezu, aber nicht ganz, proportional zu dieser Menge. Ein höherer Winddruck, verbunden mit einem großen Aufschnitt, erzeugt einen lauten, aber etwas schleppenden Klang. Tatsächlich wird nur zirka 1% der einströmenden Kraft umgesetzt in Klang, der Rest geht verloren im sich ausbreitenden Strahl und bei langsamem Verlust an der Pfeifenwandung. Diese Effizienz ist etwa die gleiche wie bei den meisten anderen Musikinstrumenten.

Vorläufertöne sind sicherlich wichtig bei allen musikalischen Klängen, und Untersuchungen des beginnenden Vorläufertones einer Labialpfeife zeigen wie sie gemacht ist, um zum Klingen zu kommen. Der Luftstrom muß so geregelt sein, daß ein Teil davon in das Oberlabium der Pfeife strömt. Wenn Luft in den Pfeifenfuß strömt und der Druck ansteigt, löst dies einen Stoß auf die Luftsäule in der Pfeife aus, ähnlich als ob man mit dem Finger über das Labium klopft und damit viele kleine Schwingungen erzeugt. Diese Schwingungen gehen dann zurück auf den Luftstrahl und der Klang wächst an entsprechend der Menge des in den Fuß strömenden Luftdrucks [7]. Dies ist sicherlich nur eine Möglichkeit den Vorläuferton zu regulieren, eine andere wichtige Art ist der Kernstich, der Turbulenzen im Luftstrom hervorruft. Andere ausgefeilte Reguliermöglichkeiten liegen außerhalb des Rahmens dieser kurzen Betrachtung.

## Zungenstimmen

Zungenstimmen unterscheiden sich von Labialpfeifen dadurch, daß die Pfeife effektiv geschlossen ist am Rohrwirkende, so daß die Becherfrequenzen unterschiedlich sind. Diese Behauptung ist nicht ganz richtig, aber die Zunge muß an der Stelle mit dem höchsten Druck in der Pfeife plaziert sein, da dieses die Bewegung bringt. Eine konische

heavily damped by the player's lips, giving a response such as that shown in Figure 4(a). There is a threshold pressure below which the reed will not speak at all at a pressure about equal to one third of that required to blow the reed completely closed but once this threshold has been exceeded the reed will oscillate at any frequency below its resonance. Under these conditions, the resonances of the instrument air column dominate the behaviour (except for occasional squeaks!) and the player controls the pitch by opening finger holes to change the effective length of the instrument air-column.

An organ reed, on the other hand, is made of metal and clamped with a metal wire, so that there is very little mechanical damping. Under these circumstances there is a strong undamped resonance of the reed, as shown in Figure 4(b), and it is energetically favourable for the reed to vibrate at a frequency very close to this resonance and to drive the pipe at this frequency. The actual sounding frequency is just below that of the reed resonance in the blown configuration, but may be a little removed from the frequency at which the reed itself vibrates in the absence of air pressure. Consideration of the acoustics of the situation also shows that the sounding frequency must be below the resonance frequency of the pipe mode that is being driven [1]. All this explains why we adjust the free length of the reed, and thus its resonance frequency, to tune a reed pipe. Figure 5 shows the behaviour as the vibrating length of a reed is shortened, and its mechanical resonance frequency raised, during this tuning process. If the reed is tuned flat, then the pipe will still sound, though rather weakly because the reed frequency does not match the pipe resonances, but there is a frequency region just above the pipe resonance where no sound can be produced at all.

The vibrating reed introduces a pulsating air flow into the foot of the pipe, the shape of the pulses being determined by the curvature of the reed and the shape of the opening in the face of the shallot. If the reed actually closes against the face of the shallot and the opening is short, then the pulses will begin and end sharply, giving an output that is rich in high harmonics. The

gueur réelle. Un tuyau cylindrique fermé en haut de l'anche, par ailleurs, se conduit comme un tuyau de fond bouché, de sorte qu'on peut aussi faire des jeux d'anche avec des résonateurs cylindriques en demi-longueur. De même que pour les tuyaux de fond bouchés, ces tuyaux cylindriques ne renforcent que les harmoniques impairs de la fondamentale, donnant un son apparenté à celui de la clarinette. Il y a bien sûr quelques subtilités à propos de ces deux faits. Pour les tuyaux coniques, il faut faire attention aux corrections en haut de la rigole car le cône est toujours tronqué à la base. La meilleure approximation est celle qui consiste à faire en sorte que le volume intérieur de la rigole soit égal au volume de la partie tronquée du cône, cela permettant de conserver au mieux les résonances harmoniques du tuyau. Les ajustements sont encore plus subtils concernant le resserrement de la rigole à l'endroit où elle rejoint le tuyau. Pour les tuyaux cylindriques on utilise de la même manière une approximation géométrique. Les règles de diapasonnage des anches n'ont pas été traitées en détail, mais elles suivent en général celles des fonds, pour les mêmes raisons.

L'anche d'un tuyau d'orgue peut être décrite comme "battante", à l'image de l'anche des bois de l'orchestre [1]. On peut voir les caractéristiques de génération du son d'une telle soupape sur la figure 4, qui montre également la différence entre les anches des bois et les languettes métalliques des tuyaux d'orgue. Pour les bois de l'orchestre, la fréquence de vibration libre de l'anche est beaucoup plus haute que la fréquence de la note jouée, et la languette est grandement amortie par les lèvres du musicien. Elle réagit comme montré sur la figure 4(a). Il y a un seuil de pression en dessous duquel l'anche ne parlera pas du tout et qui correspond à peu près au tiers de la pression nécessaire pour maintenir l'anche plaquée. Mais une fois ce seuil dépassé, la languette vibrera à n'importe quelle fréquence en dessous de sa résonance. Dans ces conditions, les résonances de la colonne d'air de l'instrument dominant le comportement (à part pour quelques canards occasionnels!) et le musicien contrôle la hauteur du son en ouvrant avec ses doigts les ouvertures qui permettent de changer la longueur effective de la colonne d'air de l'instrument.

Pfeife, die am engen Ende geschlossen ist, hat Resonanzfrequenzen, die die gleichen sind wie die bei offenen zylindrischen Pfeifen in der gleichen Länge (nicht berücksichtigt dabei die Endkorrektur am Labium). Solche konischen Pfeifen haben „volle Länge“ Schallbecher. Eine zylindrische Pfeife, die am Rohrwerkende geschlossen ist, verhält sich andererseits wie eine gedeckte Labialpfeife, so daß die Zungenpfeife ebenso einen „halbe Länge“ Becher erhalten kann. Ebenso wie bei gedeckten Labialpfeifen verstärken diese zylindrischen Pfeifen nur die ungeradzahigen Harmonien des Grundtones, sie geben einen klarinettenartigen Ton. Es gibt sicherlich feine Unterschiede zwischen diesen beiden Behauptungen. Für konische Pfeifen ist zu überlegen die Korrekturen am Becherende vorzunehmen, weil die Pfeife nicht auf einen idealen Punkt kommt. Die beste Annäherung ist es, das Volumen in der Kehle gleich zu nehmen mit dem Volumen des gekürzten Teils des Konus, da dieses am ehesten die harmonischen Resonanzen der Pfeife erhält. Wesentlich feinere Abstimmungen hängen mit der Konstruktion der Kehle zusammen, an dem Punkt an dem sie mit dem Becher verbunden ist. Für zylindrische Pfeifen gilt eine ähnlich komplizierte geometrische Annäherung. Regeln für die Mensurierung von Zungenstimmen wurden im einzelnen nicht diskutiert, aber sie unterliegen generell den gleichen wie für Labialpfeifen aus ähnlichen Gründe.

Die Zunge einer Orgelpfeife ist von der Art, die man als „dicht angeblasen“ bezeichnen kann, ebenso wie auch die Zungen von Holzblasinstrumenten [1]. Die klangerzeugenden Charakteristiken eines solchen Zungen-Ventils werden in Abbildung 4 gezeigt, die ebenso den Unterschied zwischen Holzblasinstrumenten und den Metallzungenstimmen von Orgelpfeifen zeigt. In einem Holzblasinstrument ist die frei schwingende Frequenz der Zunge viel höher als die Frequenz der gespielten Note und die Zunge ist stark gedämpft durch die Lippen des Bläusers, eine Reaktion wie in Abbildung 4 (a) gezeigt. Es gibt eine Druckschwelle unterhalb derer die Zunge nicht mehr anspricht — ein Druck fast genau von 1/3 des benötigten um die Zunge ganz zu schließen — aber wenn diese Schwelle einmal überschritten ist, wird die Zunge in irgendeiner

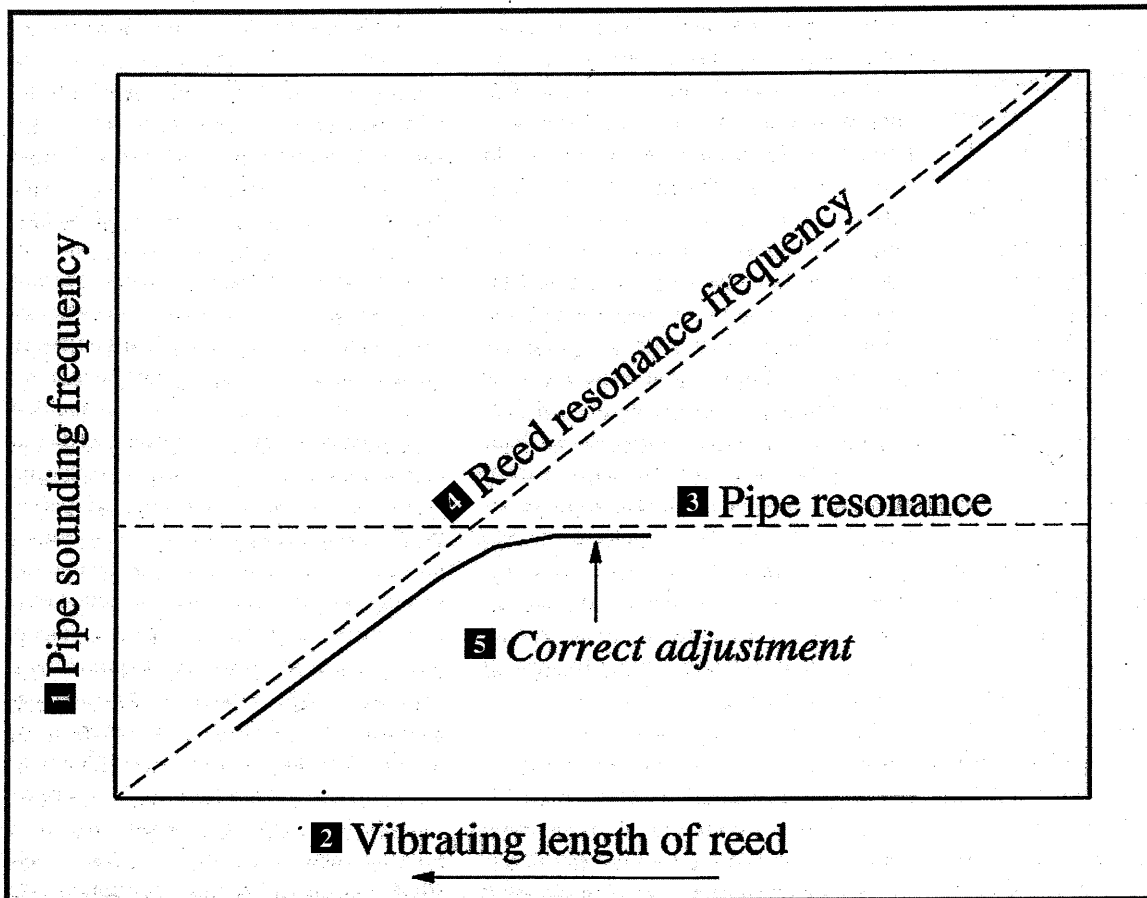


Figure 5

Behaviour of the sounding frequency of a reed pipe as the reed length is shortened. The pipe cannot be made to sound above its resonance frequency until the sound jumps to a higher mode.

Comportement de la fréquence sonore d'un tuyau d'anche lorsque la longueur de la languette est raccourcie. On ne peut faire sonner le tuyau au-dessus de sa fréquence de résonance; au-delà d'un certain point, il saute.

Fréquence du son du tuyau  
Longueur vibratoire de l'anche  
Résonance du tuyau  
Fréquence de résonance de l'anche  
Correction

Verhalten der Klangfrequenz einer Zungenpfeife wenn die Zungenlänge verkürzt ist. Die Pfeife kann nicht zum Klingen gebracht werden oberhalb ihrer Resonanzfrequenz, bis der Ton in eine höhere Tonlage springt.

Pfeifenklangfrequenz  
Schwingende Länge der Zunge  
Pfeifenresonanz  
Zungenresonanzfrequenz  
Korrekte Anordnung

opposite is true if the reed curve is adjusted so that it does not close completely, and if the shallot opening is long. These characteristics of the reed drive are modified by the properties of the pipe resonator, as mentioned above.

The metal from which the reed is made has some influence on its behaviour, and thus on the pipe sound. This is because the motion of the reed depends upon its mass and its elastic stiffness. These can both be altered by changing the shape of the reed and its thickness, but the relationship between them is generally different for different metals.

Un tuyau d'anche d'orgue, par ailleurs, est métallique et maintenu grâce à une rasette, de sorte qu'il y a très peu d'amortissement mécanique. Dans ces conditions, il y a une très forte résonance non amortie de l'anche, comme le montre la figure 4(b), ce qui est favorable du point de vue de l'énergie à la mise en vibration de la languette à une fréquence très proche de cette résonance et à la mise en fonctionnement de ce tuyau à cette fréquence. La fréquence sonore véritable est juste inférieure à celle de la résonance de la languette dans le cas où elle est actionnée par la pression du vent, mais peut être un peu éloignée de la fréquence à laquelle la languette elle-même vibre en l'absence de pression.

Frequenz unterhalb ihrer Resonanz schwingen. Unter diesen Bedingungen bestimmen die Resonanzen der Pfeife ihr Verhalten (außer bei gelegentlichem Piepsen!) und der Spieler kontrolliert die Tonhöhe durch das Öffnen von Fingerlöchern, um die effektive Länge der Wassersäule des Instruments zu wechseln.

Auf der anderen Seite ist die Zunge einer Orgelpfeife aus Metall gefertigt und wird durch eine Metallkrücke befestigt, so daß es sehr wenig mechanische Dämpfung gibt. Unter diesen Umständen gibt es eine starke, ungedämpfte Resonanz der Zunge, wie in Abbildung 4(b) gezeigt, und es ist äußerst vorteilhaft für die Zunge, in einer

## Pipe Materials

With most musical instruments, there is a feeling that the materials from which they are made have an important influence on tonal quality. For stringed instruments such as violins, the arguments are conclusive. The body of the instrument vibrates and it is the body, rather than the strings themselves, that radiate the sound. Wood is elastically very anisotropic, being as much as 15 times stiffer along the grain than across it, and this has a large effect on the frequencies of the vibrational modes of the completed instrument. Something similar is true for gongs and bells, where the density, elastic modulus and internal losses of the material from which they are made have significant tonal influence.

Choice of materials for the pipes of an organ is dictated largely by tradition, and tradition itself was dictated by practical necessity. The metals that were readily available a thousand, or even five hundred years ago were essentially those found native in the earth, such as gold, or iron from occasional meteorites, and those that could be readily smelted from their ores using a charcoal fire, namely silver, copper, zinc, lead and tin. Silver and gold were too expensive for the construction of organ pipes; copper and tin in the form of bronze made an alloy excellent for armour but too hard to work easily by hand, and machinery was not available to roll it into sheets, and similar difficulties existed for copper-zinc brass alloys. Alloys of lead and tin, however, had low enough melting points that they could be easily cast into sheets; they were strong enough to be reasonably self-supporting when made into pipes, yet soft enough that they could be cut and shaped by hand. They were the ideal materials, with the eutectic at 61.9% tin melting at 183°C, compared with 232°C for pure tin and 327°C for lead. The alloys used were not, of course, pure tin-lead mixtures, but contained a variety of other impurities, depending upon their source, or even deliberately added, which generally had the desirable effect of somewhat hardening the material.

Today, of course, the choice of materials is vastly wider, and one could contemplate making organ pipes from copper, aluminium, stainless steel, or

En prenant en considération les caractéristiques acoustiques de la situation, on se rend compte également que la fréquence sonore doit être inférieure à la fréquence de résonance du mode du tuyau qu'on fait fonctionner [1]. Tout cela explique pourquoi on ajuste l'extrémité libre de la languette, et ainsi sa fréquence de résonance, pour accorder un tuyau d'anche. La figure 5 montre ce comportement lorsque la longueur vibrante de la languette est raccourcie, et que la fréquence de résonance mécanique monte au cours du processus d'accord. Si l'anche est accordée trop bas, le tuyau sonnera encore, bien que plutôt faiblement, car la fréquence de la languette ne sera plus en rapport avec les résonances du tuyau; il y a cependant une zone de fréquence juste au-dessus de la résonance du tuyau où aucun son ne peut être produit.

La languette vibrante permet l'entrée dans le pied du tuyau d'un flux d'air pulsatif, la forme des pulsations étant déterminée par la courbure de la languette et la forme de l'ouverture de la face antérieure de la rigole. Si la languette obture effectivement la rigole et que l'ouverture soit courte, alors les pulsations commenceront et finiront de façon abrupte, le son obtenu étant riche en harmoniques aigus. L'inverse est vrai à la condition que la courbure de la languette soit faite de sorte que cette dernière n'obture pas complètement la rigole, et que l'ouverture de la rigole soit longue. Ces caractéristiques du fonctionnement de l'anche sont modifiées par les propriétés du résonateur, comme c'est indiqué plus haut.

Le métal dans lequel est confectionnée l'anche a quelque influence sur son comportement, et donc sur la sonorité du tuyau. En effet le mouvement de la languette dépend de sa masse et de son élasticité. Ces deux éléments peuvent être modifiés en changeant la forme de la languette et son épaisseur, mais la relation entre ces deux éléments est généralement différente selon les métaux.

### Les matériaux de fabrication des tuyaux.

Pour la plupart des instruments de musique, il existe un sentiment selon lequel les matériaux dans lesquels ils sont fabriqués ont une influence importante sur la qualité sonore. Pour les instru-

Fréquence très proche de cette résonance à osciller et à jouer la flûte sur cette fréquence. La véritable fréquence de résonance est directement sous la résonance de la langue dans la configuration, mais elle peut être éloignée de la fréquence, au point que la langue elle-même vibre pendant l'expiration de la pression de l'air. La prise en compte de la situation acoustique montre que la fréquence de résonance de la flûte doit être inférieure à la fréquence de résonance de la langue, ce qui explique pourquoi on ajuste l'extrémité libre de la languette, et ainsi sa fréquence de résonance, pour accorder un tuyau d'anche. La figure 5 illustre ce comportement lorsque la longueur vibrante de la languette est raccourcie, et que la fréquence de résonance mécanique augmente au cours du processus d'accord. Si l'anche est accordée trop bas, le tuyau continuera à sonner, bien que faiblement, car la fréquence de la languette ne sera plus en rapport avec les résonances du tuyau; il y a cependant une zone de fréquence juste au-dessus de la résonance du tuyau où aucun son ne peut être produit.

La languette vibrante permet l'entrée dans le pied du tuyau d'un flux d'air pulsatif, la forme des impulsions étant déterminée par la courbure de la languette et la forme de l'ouverture de la face antérieure de la rigole. Si la languette obture effectivement la rigole et que l'ouverture soit courte, alors les pulsations commenceront et finiront de façon abrupte, le son obtenu étant riche en harmoniques aigus. L'inverse est vrai à la condition que la courbure de la languette soit faite de sorte que cette dernière n'obture pas complètement la rigole, et que l'ouverture de la rigole soit longue. Ces caractéristiques du fonctionnement de l'anche sont modifiées par les propriétés du résonateur, comme c'est indiqué plus haut.

Le métal dans lequel est confectionnée la languette a quelque influence sur son comportement, et donc sur la sonorité du tuyau. En effet le mouvement de la languette dépend de sa masse et de son élasticité. Ces deux éléments peuvent être modifiés en changeant la forme de la languette et son épaisseur, mais la relation entre ces deux éléments est généralement différente selon les métaux.

Pour la plupart des instruments de musique, il existe un sentiment selon lequel les matériaux dans lesquels ils sont fabriqués ont une influence importante sur la qualité sonore. Pour les instru-

even galvanised iron. Some of these materials have indeed been used for display pipes, but none of them combines the practical advantages of the tin-lead alloys. The question is: does the material affect the tonal quality? For a traditionalist, the answer is "Yes", as it is also for flutes made from gold rather than silver, or trumpets of brass rather than nickel-silver. A scientific study of the question, however, fails to support these views.

The material from which a pipe is made can affect the tone quality in two ways, firstly by imposing constraints on physical dimensions or interior surface finishes, and secondly by vibrating and radiating sound. The first influence is inescapable. Pipes made from wood necessarily have very thick walls and are generally square, and this imposes constraints upon the geometry of the pipe mouth and lip, which can certainly affect tonal quality. Even the differences in geometry caused by thick and thin pipe-metal sheeting at the lip of the pipe may be tonally significant, but for geometrical rather than any other sort of reason. Equally, a wall material that was so rough as to present a felt-like texture to the pipe interior would certainly contribute damping to the pipe modes and so affect the air vibrations, but all reasonable pipe materials are smooth. How, then, about wall vibrations?

Once again, it is inescapable that wall vibrations can have an effect on sound quality, but only in circumstances rather different from those in conventional organ pipes. Miller [9] in 1909 demonstrated an effect of this kind with a hollow-walled organ pipe when he progressively filled the space between the walls with water. If a builder were to make a large wooden pedal pipe from 3mm plywood, then its walls would vibrate a great deal, and could well influence the sound, quite apart from rattling against their mounts. But surely no builder would build a rank of pipes like this! What happens in real organ pipes?

The walls of an organ pipe do, indeed, have their own vibrational modes, as we can hear by flicking the pipe with a finger nail. Can these modes contribute to the sound of the pipe? Actually, the air vibrations in the pipe cannot really interact easily with these wall modes, since a circular pipe is very

ments à cordes tels les violons, les arguments sont irréfutables. Le corps de l'instrument vibre et c'est lui plutôt que les cordes elles-mêmes qui développe le son. Le bois est très anisotropique du point de vue de l'élasticité, puisqu'il est 15 fois plus rigide dans le sens du fil que dans l'autre sens, et cela à un effet important sur les fréquences des modes vibrationnels de l'instrument final. Il se passe quelque chose de semblable avec les gongs et les cloches, pour lesquels les coefficients de densité et d'élasticité ainsi que les pertes internes des matériaux dans lesquels ils sont fits ont une influence sonore importante.

Le choix des matériaux pour les tuyaux d'orgues se fait principalement suivant le critère de la tradition, et la tradition elle-même a été dictée par les contingences pratiques. Les métaux qui étaient facilement disponibles il y a mille ou même cinq cents ans étaient essentiellement ceux qu'on trouvait naturellement dans le sol, tels l'or, ou le fer provenant de météorites occasionnelles, et ceux qui pouvaient être extraits facilement à partir du minerai et en utilisant un feu de charbon, c'est à dire l'argent, le cuivre, le zinc, le plomb et l'étain. L'argent et l'or étaient trop chers pour la construction de tuyaux d'orgues; le cuivre et l'étain sous la forme de bronze faisaient un alliage excellent pour les armures mais trop dur à travailler à la main; il n'y avait pas de moyen mécanique d'en faire des feuilles. Il existait les mêmes difficultés concernant le laiton formé de zinc et de cuivre. Les alliages de plomb et d'étain cependant, avaient un point de fusion suffisamment bas de sorte qu'ils pouvaient être facilement coulés en feuilles; ils étaient suffisamment rigides pour avoir une tenue convenable une fois transformés en tuyaux, et cependant suffisamment mous pour pouvoir être coupés et formés à la main. C'était le matériau idéal, avec une eutectique à 61,9% d'étain fondant à 183°C, ce qu'il faut comparer aux 232°C nécessaires à la fusion de l'étain pur et aux 327°C nécessaires au plomb. Les alliages utilisés n'étaient bien sûr pas des alliages purs étain-plomb, mais contenaient une quantité d'impuretés, provenant de l'extraction ou même sciemment ajoutées, ce qui avait généralement pour effet de durcir le matériau dans une certaine mesure.

Aujourd'hui, bien sûr, le choix des

## Pfeifenmaterial

Es wird angenommen, daß bei den meisten Musikinstrumenten das Material, aus dem diese angefertigt sind, eine wichtige Rolle für die Tonqualität spielt. Für Streichinstrumente wie zum Beispiel Geigen, sind diese Argumente zutreffend. Der Körper des Instrumentes schwingt und es ist der Körper, mehr als die Saiten selbst, der den Klang abstrahlt. Die Elastizität von Holz ist entlang der Maserung etwa 15 mal steifer als quer zu dieser, welches einen großen Effekt auf die Frequenzen der schwingenden Tonart des Instrumentes ausübt. Ähnlich ist es bei Gongs und Glocken, wo Dichte, Modulation und Eigenverlust des Materials, aus dem sie angefertigt sind, die Tongebung entscheidend beeinflussen.

Die Wahl des Materials für Orgelpfeifen ist traditionell festgelegt, und dies resultiert aus praktischen Erfahrungen. Die Metalle, die bereits vor 1000 oder 500 Jahren zur Verfügung standen, waren die hauptsächlich im Boden vorkommenden, wie Gold, oder Eisen von vereinzelt Meteoriten, und jene, die im Holzkohlenfeuer geschmolzen werden konnten, wie Silber, Kupfer, Zink, Blei und Zinn. Silber und Gold waren zu teuer zum Bau von Orgelpfeifen, Kupfer und Zinn in Form von Bronze waren gut geeignet für Rüstungen, jedoch zu hart zur Bearbeitung von Hand, und Maschinen zum Aufrollen gab es nicht. Ähnliche Schwierigkeiten ergaben sich bei Messing, Kupfer-Zink Legierungen. Zinn-Blei Legierungen hatten niedrig genug liegende Schmelzpunkte, so daß sie leicht in Tafeln gegossen werden konnten. Sie waren aber stabil genug, um zu stehen, wenn sie zu Pfeifen verarbeitet wurden, dabei aber weich genug, um von Hand geschnitten und geformt zu werden. Selbstverständlich waren die benutzten Legierungen keine reinen Zinn-Blei Verbindungen, sie enthielten eine Vielzahl anderer Beimischungen, je nach Vorhandensein, oder es wurden benutzt solche Beimischungen vorgenommen, die das Material etwas härten.

Heutzutage ist die Auswahl des Materials selbstverständlich größer, und man kann in Erwägung ziehen Orgelpfeifen aus Kupfer, Aluminium, rostfreiem Stahl oder sogar aus galvanisiertem Eisen zu bauen. Einige dieser Materialien wurden sogar für

stiff against change in its diameter, but there is always the possibility of excitation of vibrations by the impulsive action of the jet at the pipe lip, which acts on only one side of the pipe. It is conceivable that these make a minor contribution to pipe sound, but measurements of the wall vibration amplitude in typical pipes [10,11] show that the sound radiated from this is all but undetectable compared with the normal sound radiation from the mouth and open end. Even pipes made from material as unexpected as cardboard (though with conventional pipe-metal mouths) cannot be distinguished from traditional pipes by listening.

It is not hard to see the reason for this. A pipe wall is extremely rigid in comparison with the air that it encloses, so that its vibration level is correspondingly small. More than this, the main effect of changing wall material is to change mass density and elastic rigidity, and these in turn affect the resonant mechanical frequencies of the pipe. If any such adjustment were indeed optimal, then it could just as easily be produced by simply changing the wall thickness, using some other arbitrary material.

All in all, then, we conclude that the sound of an organ is not significantly affected by the materials from which the pipes are made, provided we do not go to ridiculous extremes. Although modern metal rolling techniques allow the production of pipes of nearly any material, traditional pipe-making and voicing techniques require a material that is soft enough for hand working, yet strong enough to endure in a typical organ environment. It is difficult to think of anything better than a near-eutectic tin-lead alloy, with perhaps some other metals added in trace amounts to improve mechanical strength.

## Conclusion

The role of physical science in musical instrument acoustics is largely one of understanding the principles underlying traditional practice. This has several purposes. One is to preserve the essentials of the tradition by identifying those practices that are really important to the functioning of the instrument and eliminating those that are of no value.

matériaux est bien plus vaste, et on pourrait envisager la construction de tuyaux d'orgues en cuivre, en aluminium, en acier inoxydable ou même en fer galvanisé. Quelques uns de ces matériaux ont été utilisés pour faire des tuyaux de façade, mais aucun d'eux ne combine les avantages pratiques des alliages étain-plomb. Le problème est de savoir si le matériau a une influence sur la qualité sonore. Pour un traditionaliste la réponse est affirmative, dans le même esprit qu'on fait des flûtes en or plutôt qu'en argent ou des trompettes en cuivre plutôt qu'en maillechort. Une étude scientifique ne peut cependant justifier de tels points de vue.

Le matériau constitutif d'un tuyau peut affecter la qualité sonore d'un tuyau de deux façons, d'abord en imposant des contraintes de dimensions physiques, ou de finition des parois intérieures et ensuite de par le rayonnement et la vibration du son. La première influence est incontestable. Les tuyaux de bois ont nécessairement des parois très épaisses et sont généralement carrés, ce qui entraîne des contraintes sur la géométrie des lèvres et de la bouche du tuyau, ce qui peut assurément affecter la qualité sonore. Même les différences géométriques au niveau des lèvres, provenant du coulage plus ou moins épais des feuilles de métal, peuvent avoir des conséquences sonores sensibles, mais pour des raisons géométriques avant toute autre. De même, un matériau qui serait tellement rugueux qu'il donnerait à l'intérieur du tuyau une surface d'une rugosité comparable à celle du feutre aurait certainement pour effet d'amortir la sonorité (modes) du tuyau et d'affecter les vibrations de l'air, mais tout métal à tuyau de bon aloi est lisse. Que dire donc des vibrations des parois?

Une fois de plus, il est incontestable que les vibrations des parois aient une conséquence sur la qualité sonore, mais uniquement dans des conditions différentes de celles réunies par les tuyaux d'orgues traditionnels. Miller [9] a mis en évidence un effet de ce genre en 1909, en remplissant progressivement d'eau les parois creuses d'un tuyau d'orgue expérimental. Si un facteur construisait un grand tuyau de pédale en bois, en contreplaqué de 3mm, ses parois se mettraient à vibrer fortement, et cela pourrait grandement influencer le son, outre le fait que le tuyau se mettrait

Prospektpfeifen verwendet, aber keines von ihnen hat die praktischen Vorzüge von Zinn-Blei Legierungen. Die Frage ist, ob das Material die Tonqualität beeinflusst? Für einen Traditionalisten lautet die Antwort „ja“, und dies trifft auch zu für Flöten, die aus Gold eher als aus Silber, oder Trompeten, die aus Messing eher als aus Nickel, hergestellt sind. Eine wissenschaftliche Studie zu dieser Frage liegt nicht vor.

Das Material, aus dem eine Pfeife gefertigt ist, kann die Tonqualität auf zweifache Weise beeinflussen, zum einen gezwungenermaßen aufgrund physikalischer Werte oder innerer Oberflächenstruktur, und zum zweiten durch Schwingung und Klangabstrahlung. Der erste Faktor ist unvermeidlich. Holzpfeifen haben sehr dicke Wände und sind immer eckig, und dieses bestimmt die Geometrie von Aufschnitt und Labium, was sicherlich die Tonqualität beeinflusst. Sogar geometrische Unterschiede, hervorgerufen durch dickes und dünnes Pfeifenmetall am Labium der Pfeife können klanglich von Bedeutung sein, aber eher aus geometrischen als aus anderen Gründen. Gleichermaßen würde ein Pfeifenmaterial, das innen so rauh wie eine Filzstruktur ist, sicherlich zur Dämpfung der Pfeifentonalage beitragen und so die Luftschwingung beeinträchtigen, aber alle vernünftigen Pfeifenmaterialien sind weich. Was ist also mit den Wandungsschwingungen?

Noch einmal, es ist nicht zu ändern, daß die Wandungsschwingungen einen Einfluß auf die Tonqualität haben, aber nur unter Umständen, die anders sind als bei herkömmlichen Orgelpfeifen. Miller [9] demonstrierte 1909 einen Effekt dieser Art mit einer hohlwandigen Orgelpfeife, indem er den Hohlraum schrittweise mit Wasser füllte. Wenn ein Orgelbauer eine große Holzpfeife für das Pedal aus 3 mm starkem Schichtholz bauen würde, dann würden ihre Wände zum großen Teil schwingen, und könnten den Klang gut beeinflussen, ohne gegen das Gehäuse zu schlagen. Aber sicherlich würde kein Orgelbauer ein derartiges Register bauen! Was geschieht in richtigen Orgelpfeifen?

Sicherlich haben die Wände einer Orgelpfeife ihren eigenen Schwingungsmodus, wie wir es hören können, wenn wir die Pfeife mit dem Fingernagel anschnippen. Kann dieser Modus

Once this has been done, it may be possible for builders to be more adventurous and perhaps to improve on conventional practice. It is also possible that this understanding will lead to new insights and to instruments that sound better and last longer. Over all, there is simply the desire to know, and to appreciate in ever more detail the sound of that king of instruments that we all love.

Neville Fletcher

## References

- 1 N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York (second edition, 1998), chapters 13, 16, 17, 22. [This book is somewhat mathematical, but provides all the background together with extensive references.]
- 2 F. Ingerslev and W. Frobenius, *Some measurements of the end-corrections and acoustic spectra of cylindrical open flue organ pipes*, Trans. Danish Acad. Tech. Sci. 1, 1-44 (1974).
- 3 C. Mahmentholz, *The Calculation of Organ Pipe Scales*, Positil Press, Oxford (1975).
- 4 N. H. Fletcher, *Scaling rules for organ flue pipe ranks*, Acustica 37, 131-138 (1977).
- 5 N. H. Fletcher and L. M. Douglas, *Harmonic generation in organ pipes, recorders, and flutes*, J. Acoust. Soc. Am. 68, 767-771 (1980).
- 6 A. W. Nolle, *Some voicing adjustments of flue organ pipes*, J. Acoust. Soc. Am. 66, 1612-1626 (1979).
- 7 A. W. Nolle, *Flue organ pipes: Adjustments affecting steady waveform*, J. Acoust. Soc. Am. 73, 1821-1832 (1983).
- 8 N. H. Fletcher, *Transients in the speech of organ flue pipes — a theoretical study*, Acustica 34, 224-233 (1976).
- 9 D. C. Miller, *The influence of the material of wind instruments on the tone quality*, Science 29, 161-171 (1909).

à vibrer contre le peigne. Mais certainement qu'aucun facteur ne construirait un tel jeu! Que se passe-t-il à l'intérieur de véritables tuyaux d'orgue?

Les parois d'un tuyau d'orgue ont de fait leurs propres modes vibrationnels, comme on peut le constater en tapotant le tuyau avec l'ongle. Cela a-t-il une influence dans la formation du son? De fait, les vibrations de l'air à l'intérieur du tuyau ne peuvent pas réellement entrer en contact facilement avec les modes vibrationnels des parois, un tuyau circulaire étant très résistant à tout changement de diamètre, mais il y a toujours la possibilité d'excitation des vibrations par l'impulsion de la lame d'air à la bouche, ce qui agit seulement sur une face du tuyau. On peut concevoir que ça ait une influence au moins mineure sur la sonorité, mais les mesures de l'amplitude de la vibration de parois de tuyaux types [10-11] montrent que le son qui s'en propage est complètement indétectable, comparé à la propagation normale du son de la bouche et du haut du corps. Même lorsqu'on fabrique des tuyaux avec des matériaux aussi inattendus que le carton (en faisant cependant une bouche habituelle en métal) on ne peut les distinguer des tuyaux traditionnels à l'oreille.

Il n'est pas difficile d'en comprendre la raison. La paroi du tuyau est extrêmement rigide comparée à l'air qu'elle contient, de ce fait son niveau de vibration est d'autant plus faible. En outre, la conséquence principale du changement de matériau est la modification de la densité et de la rigidité, et cela a une influence à son tour sur les fréquences de résonance mécanique du tuyau. Si une quelconque modification de cet ordre s'avérait véritablement optimale, elle pourrait alors être reproduite aussi facilement en changeant l'épaisseur des parois, et en utilisant n'importe quel matériau de façon arbitraire.

Finalement donc, on peut conclure que le son d'un orgue n'est pas affecté de façon significative par la nature des matériaux dont sont faits les tuyaux, si on se cantonne dans les limites du raisonnable. Bien que les techniques modernes permettent de faire des feuilles de n'importe quel métal ou quasiment, les techniques traditionnelles de fabrication des tuyaux et de mise en harmonie nécessitent un matériau qui soit suffisam-

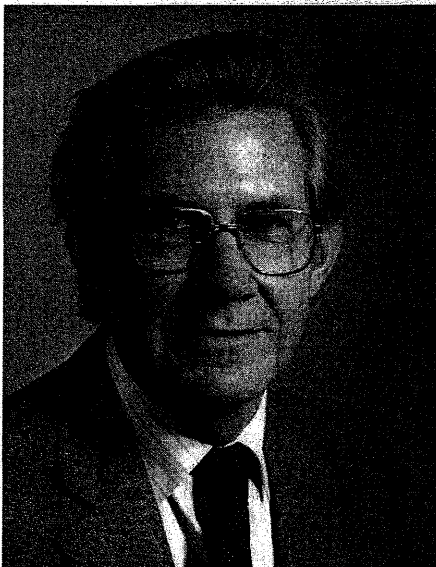
zum Klang der Pfeife beitragen? Bestimmt können die Luftschwingungen in der Pfeife nicht einfach beeinflusst werden von diesem Wandungsmodus, weil eine runde Pfeife sehr stabil ist gegenüber Veränderungen im Durchmesser, aber es gibt immer die Möglichkeit, eine Schwingung hervorzurufen durch eine stoßweise Kraft des Strahls am Labium, was nur an einer Seite der Pfeife geschieht. Aber Messungen der Wandungsschwingungen bei typischen Orgelpfeifen [10, 11] zeigen, daß der hierdurch abgestrahlte Klang nicht nachweisbar mit der normalen Klangabstrahlung am Labium und offenen Ende der Pfeife zu vergleichen ist. Sogar Pfeifen, die aus nicht akzeptierbarem Material wie Pappe (wenn auch mit konventionellem Pfeifenmetall-Labium) gefertigt sind, können durch Hören nicht von herkömmlichen Pfeifen unterschieden werden.

Der Grund hierfür ist nicht schwer zu erkennen. Die Pfeifenwandung ist sehr eng verbunden mit der Luft, die sie einschließt, so daß ihr Schwingungsgrad demzufolge sehr klein ist. Mehr als das, der Haupteffekt das Wandungsmaterial zu ändern, ist die Massendichte und Elastizität, und diese wiederum beeinflussen die klingenden mechanischen Frequenzen der Pfeife. Wenn einer dieser Faktoren wirklich optimal wäre, dann könnte er einfach nur durch das Verändern der Wandstärke erzielt werden, durch Verwendung eines beliebigen Materials.

Letztendlich können wir daraus schließen, daß der Klang einer Orgel nicht bedeutend beeinflusst wird von dem Material, aus dem die Pfeifen hergestellt sind, vorausgesetzt wir gehen nicht ins unsinnig Extreme. Obwohl uns moderne Aufrolltechniken die Herstellung von Pfeifen in nahezu allen Materialien ermöglichen, erfordern traditionelle Pfeifenmacher- und Intonationstechniken ein Material, das weich genug ist, um von Hand bearbeitet zu werden, aber stabil genug, um an einem typischen Orgelstandort von Dauer zu sein. Es ist schwierig an etwas anderes als eine nahezu ideale Zinn-Blei Legierung zu denken, vielleicht unter Zusatz einiger anderer Metalle in geringer Menge, um die mechanische Kraft zu verbessern.

10 C. P. Boner and R. B. Newman, *The effect of wall materials on the steady-state acoustic spectrum of flue pipes*, J. Acoust. Soc. Am. 12, 83-89 (1940).

11 J. Backus and T. C. Hundley, *Wall vibrations in flue organ pipes and their effect on tone*, J. Acoust. Soc. Am. 39, 936-945 (1965).



Neville Fletcher

**N**eville Fletcher was born in Armidale, Australia in 1930 and studied mathematics and physics at Sydney University and at Harvard University. After four years with CSIRO, Australia's national research organisation, he became Professor of Physics at the University of New England in his home town Armidale, and remained in this position for 20 years, after which he returned to CSIRO as Director of the Institute of Physical Sciences. He is now nominally retired, but is a Visiting Fellow at the Australian National University and a Visiting Professor at the Australian Defence Force Academy. His research has been in many fields of physics, principally transistor design, cloud physics, condensed-matter physics, and acoustics, and he has published five books in these various areas. He plays the flute, the bassoon and the organ.

ment malléable pour pouvoir être travaillé à la main, et qui puisse cependant perdurer dans les conditions classiques de vie d'un orgue. Il est difficile d'imaginer quoi que ce soit de mieux qu'un alliage étain-plomb quasiment eutectique, avec peut-être quelques autres métaux à l'état de traces pour améliorer la rigidité mécanique.

### Conclusion

Le rôle de la physique par rapport à l'acoustique des instruments de musique est dans une large mesure de comprendre les principes qui sous-tendent la pratique traditionnelle. Cela a plusieurs buts. L'un d'eux est de préserver l'essentiel de la tradition en identifiant les pratiques qui sont réellement importantes pour le fonctionnement de l'instrument et en éliminant celles qui sont sans objet. Cela fait, il devient possible pour les facteurs d'être plus audacieux et peut-être d'améliorer la pratique traditionnelle de leur métier. Il est possible aussi que cette compréhension conduise à de nouvelles perspectives qui permettent la construction d'instruments qui sonnent mieux et qui durent davantage. Par dessus tout, il y a simplement le désir de savoir, et d'apprécier toujours plus en détail le son du roi des instruments que nous aimons tous.

Traduction: Patric Guilhemjoan

**N**eville Fletcher est né à Armidale en Australie en 1930 et a étudié les mathématiques et la physique à l'Université de Sydney et à Harvard. Après quatre ans passés à la CSIRO, l'organisation nationale de recherche australienne, il est devenu professeur de physique à l'université de Nouvelle-Angleterre dans sa ville natale d'Armidale, et est resté vingt ans à ce poste. Il est ensuite reparti à la CSIRO en tant que directeur de l'Institut de Sciences Physiques. Il est actuellement à la retraite, mais est intervenant à l'Université Nationale Australienne et chargé de cours à l'Australian Defence Force Academy (école militaire australienne). Il a fait des recherches dans de nombreux domaines de la physique, principalement sur la conception des transistors, la physique des nuages, la physique des matières condensées et l'acoustique et a publié cinq livres dans ces différentes matières. Il joue de la flûte, du basson et de l'orgue.

### Ergebnis

Die Rolle der physikalischen Forschung zur Akustik bei Musikinstrumenten dient größtenteils dem Verständnis der Prinzipien, die die traditionelle Praxis unterstreichen. Dies hat verschiedene Gründe. Einer davon ist, die Grundlagen der Tradition zu bewahren durch Festlegung der Praktiken, die wirklich sehr wichtig für das Funktionieren des Instrumentes sind und jene auszuschließen, die nicht von Bedeutung sind. Nachdem dies getan ist, wird es möglicherweise den Instrumentenbauern leichter fallen zu experimentieren und vielleicht die herkömmlichen Praktiken zu verbessern. Es ist auch möglich, daß dieses Verständnis zu neuen Einsichten führt und zu Instrumenten, die besser und letztendlich länger klingen. Über allem steht der Wunsch, den Klang der Königin der Instrumente, die wir alle lieben, in allen Einzelheiten zu ergründen.

Übersetzung: Angelika Hesse

**N**eville Fletcher wurde 1930 in Armidale, Australien, geboren und studierte Mathematik und Physik an der Universität Sydney und an der Harvard Universität. Nach vier Jahren bei CSIRO, Australiens nationaler Forschungsorganisation, wurde er Physikprofessor an der Universität von New England in seiner Heimatstadt Armidale und blieb 20 Jahre lang in dieser Position. Anschließend ging er zurück zu CSIRO als Direktor des Instituts für Physikalische Forschung. Er ist jetzt exmatrikuliert, ist jedoch Gastdozent an der Australian National University und Gastprofessor an der Australian Defence Force Academy. Seine Forschungen liegen in vielen Bereichen der Physik, Kondensationsphysik und Akustik. Er hat fünf Bücher zu den verschiedenen Bereichen veröffentlicht. Er spielt Flöte, Fagott und Orgel.