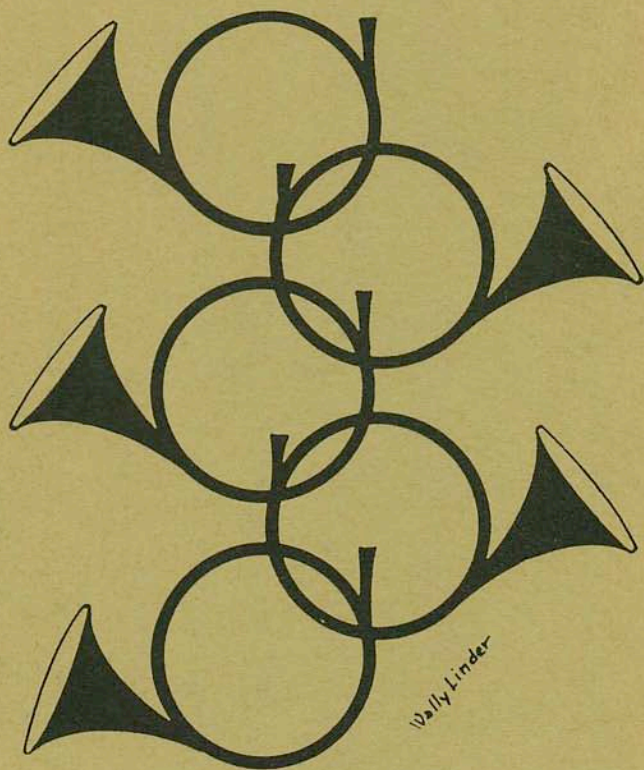


The Horn Call



Journal of the

International Horn Society

Internationale Horngesellschaft

La Société Internationale des Cornistes

Spring 1974

Stopped Horn

— Willi Aebi
Burgdorf, Switzerland

In the "Horn Call" Autumn 1973 the phenomenon of hand-stopping the bell of the horn is treated by Marvin C. Howe and by professor Malcolm C. Henderson. I refrain from discussing these two articles but would like to confront them with the results of my acoustical researches on the horn which I made as a hobby during several years. In 1968 I found the explanation for the phenomenon of the change of pitch caused by hand-stopping the bell.

My results were published in the "Schweizerische Bauzeitung" in September 1969. In June 1970 I presented them in a lecture on the occasion of the "Horn Workshop" in Tallahassee. After having completed the results on the base of further experiments I gave a lecture on the "7th International Congress on Acoustics" in Budapest in August 1971 which was published in the periodical "Brass Bulletin" edited by Jean-Pierre Mathez in Moudon, Switzerland in German, French and English. Jean-Pierre Mathez has granted permission to place this latter article at the disposal of the "Horn Call" for print.

The physical process occurring in the horn as well as in all the other wind instruments when the instrument is played is usually not clear for the musician. During the last years scientists, as for example the physicist Arthur H. Benade in the USA, have successfully investigated this process. The publications on their results are not easily comprehensible for the non-scientist, i.e. the horn player. We have tried to give a simple, generally comprehensible explanation of the vibrations in the horn in the essay "The Inner Acoustic of the Horn." To facilitate the reading of the whole essay, we found it useful to give a preliminary explanation of the phenomenon of the stopped horn.

The sound of the horn is produced by the lips of the horn player and generates a standing sound wave in the instrument. In the bell the standing sound wave is changed into a moving sound wave which is propagated through the ambient air in all directions at a velocity of 343.8 m/sec.

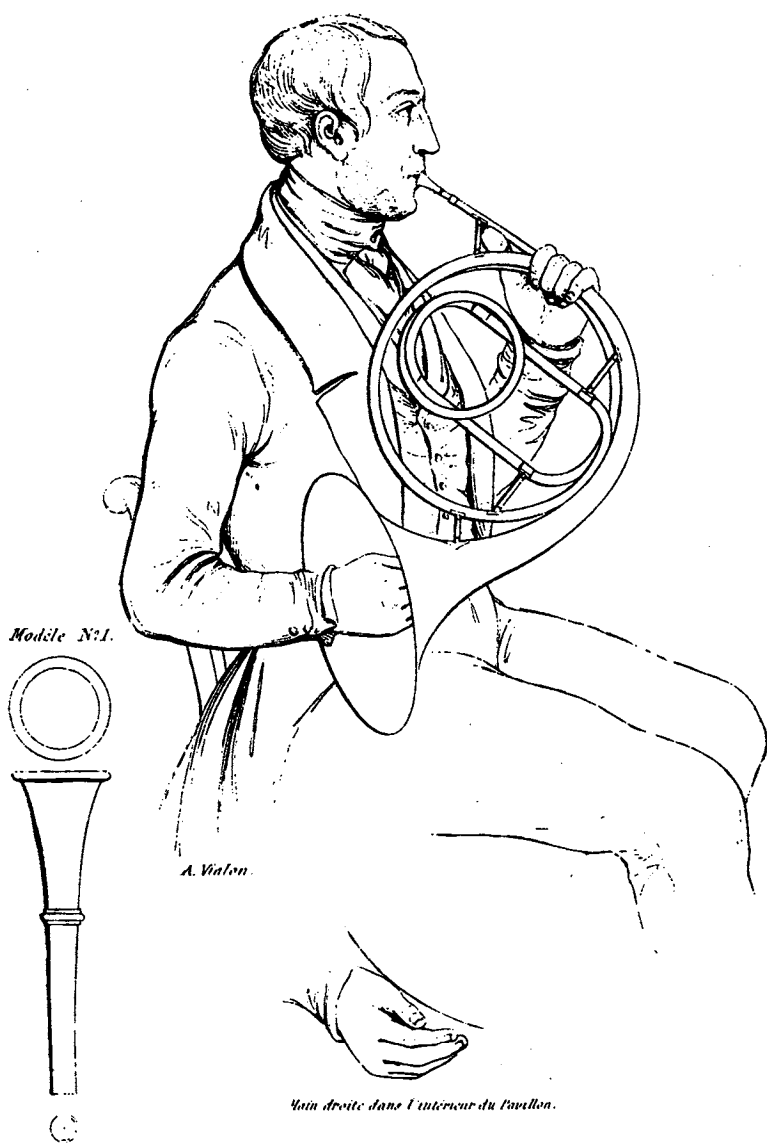
As the name says, the standing sound waves stand still in a fixed place. All air particles vibrate to and fro in the same rhythm and are compressed and decompressed at the point of minimum vibration (vibration node). The variation of pressure (sound pressure) may be measured with a microphone by means of an appropriate electrical equipment. The curve in figure 1 shows the variation of the sound pressure along the longitudinal axis when the 8th harmonic is played. Figure 2 shows the variation of this curve in the bell: drawn-out line when the tube is open, dashed line when using a mute, and line in dots and dashes when the horn is fully hand-stopped. In

the open horn and in the muted horn the pitch is the same and the maxima of pressure (pressure loops) stay in the same place. When using a mute the sound pressure decreases more rapidly towards the bell, reaches a minimum of pressure (the lowest point of the curve) and rises again to a maximum at the bottom of the mute. This rise of sound pressure was found by our experiments and led to the explanation of the phenomenon of hand-stopping. Full-stopping the horn with the hand causes the following shifts towards the mouthpiece: $\Delta l''$ for the last maximum of sound pressure, $\Delta l'$ or the new pressure minimum, Δl for the pressure maximum in the palm of the hand, corresponding to the pressure maximum at the bottom of the mute. The acoustical length which determines the pitch is shortened by this distance and therefore the pitch rises accordingly. On the F-horn the distance Δl is equal to the length of the second valve, and if this second valve is depressed the corresponding piece of tube cancels out the shortening Δl , and we have again pitch F. It is possible to stop partially and then the pitch is lowered by half a tone and more. Obviously, in this case the widening of the bell is cancelled out and the tube is lengthened accordingly. E.g. the pitch on the partially hand-stopped horn is D or E-flat or E, on the open horn and on the muted horn it is F, and on the fully hand-stopped horn it is F-sharp. In all these cases we have the vibration pattern of the same member of the harmonic series, i.e. 8th. By loosening the stopping hand and retracting it out of the bell the pitch rises continuously up to g, the next higher member of the harmonic series, i.e. the 9th.

And now we can proceed to the essay

The Inner Acoustic of the Horn

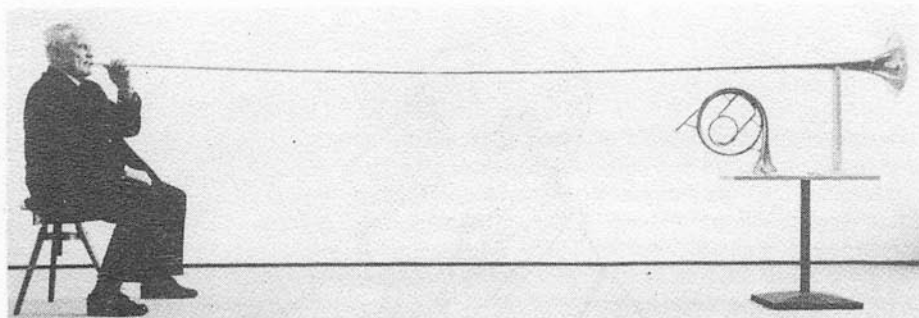




Aus "Méthode pour le Cor" par Gallay, Professeur au Conservatoire, Premier Cor solo de la Musique particulière du Roi et de l'Opéra Italien. Verlag Schönenberger, Paris, um 1845.

DIE INNERE AKUSTIK DES WALDHORNES

W. AEBLI, Burgdorf (Schweiz)



Das Waldhorn, von Schumann als die Seele des Orchesters bezeichnet, hat seit seiner Einführung im Orchester um 1660 durch Lully zwei wesentliche technische Aenderungen erfahren, die beide in der Art der musikalischen Verwendung deutlich zum Ausdruck kommen.

1. Epoche

Das Corno da caccia bei Bach und Händel, das heutige Jagdhorn, wurde offen, ohne Hand im Schallbecher geblasen.

2. Epoche

Um 1750 erfand der Dresdener Hornist Josef Hampel das Stopfen mit der rechten Hand im Schallbecher. Schliesst die Hand die Schallöffnung nur teilweise, dann vertieft sich der Ton bis zu einer ganzen Stufe und mehr. Schliesst die Hand die Oeffnung gänzlich ab, dann springt der Ton um eine halbe Stufe nach oben. Auf Grund dieser Vermehrung der möglichen Töne erfuhr das Horn reiche Verwendung durch die Klassiker Haydn, Mozart und Beethoven, durch die Romantiker Weber und Schubert, und in ihrer frühen Schaffensperiode auch durch Wagner, Schumann und Brahms. Diese Epoche wird als das goldene Zeitalter des Hornes bezeichnet. Die Tonverschiebung mit der rechten Hand konnte bisher physikalisch nicht erklärt werden. Unsere Experimente haben die Lösung des Rätsels gebracht.

3. Epoche

Nach 1820 wurde das Ventil erfunden und eingeführt, welches den Blechinstrumenten die Möglichkeit der Erzeugung aller chromatischen Töne brachte.

Die Akustik, schon den Griechen des Altertums eine Wissenschaft, erfuhr seit 1800 eine grosse Entwicklung, die in einer umfangreichen Fachliteratur in Erscheinung tritt. Die vielen theoretischen und mathematischen Abhandlungen sowie die Analogien aus der Elektrizitätslehre sind dem Laien meist unverständlich. Mit unseren Experimenten suchten wir, ausgehend von einfachen Vorstellungen, die Schwingungsvorgänge im Rohr der Blasinstrumente zu ergründen und sie für den Hornisten und den Instrumentenmacher verständlich darzustellen.

Schall, wie er vom Gehörsinn wahrgenommen wird, beruht auf Druck- und Bewegungsschwankungen der Luft, die sich bei 20° mit einer Geschwindigkeit von 343,8 m/sec

fortbewegen. Dies ist die **fortlaufende Schallwelle**. Folgen sich die Druckstöße in regelmässigen Abständen, dann erklingt ein Ton, dessen Höhe von der Frequenz der Impulse abhängt. Der Normalton a' , nach welchem die Instrumente gestimmt werden, hat 440 Schwingungen in der Sekunde. Die in der Zeiteinheit zurückgelegte Strecke von 343,8 m enthält 440 Schallwellen. Das akustische Grundgesetz in der freien Luft besagt, dass die Länge einer Welle multipliziert mit der Frequenz die Schallgeschwindigkeit ergibt. In der Akustik unterscheidet man von der soeben beschriebenen laufenden die **stehende Schallwelle**. Nach der üblichen Auffassung entsteht sie durch Ueberlagerung gegenläufig fortschreitender Schallwellen gleicher Frequenz. Sie ist dadurch charakterisiert, dass die Luftteilchen an ihrem Ort eine stationäre Schwingung in gleicher Phase ausführen. D. h. sie befinden sich immer gleichzeitig in der Mittellage oder in einer der Endlagen. Die Schwingungsweite nimmt vom Maximum im Schwingungsbauch bis zum Minimum im Schwingungsknoten ab. Während der Schwingung erleidet jedes Teilchen von seinen Nachbarn einen wechselnden Druck, welcher die Beschleunigung bzw. die Verzögerung bewirkt. Die Druckkräfte addieren sich in der Längsachse der Schallwelle bis zum nächsten Schwingungsknoten und erzeugen darin maximale Druckschwankung. Es bestehen Druckschwankungen an jeder Stelle der Schallwelle. Man bezeichnet sie als Schalldruck. In den Schwingungsknoten erreicht der Schalldruck ein Maximum, weshalb man diese Stellen auch Druckbäuche nennt.

A. Akustische Messungen des Horns

Der Schalldruck und seine Veränderung lässt sich mit einem Mikrophon messen und über eine geeignete elektrische Apparatur auf einem Registrierstreifen als Kurve festhalten. Fig. 1 zeigt den Verlauf des Schalldruckes in der Längsachse eines F-Hornes beim 8. Naturton. Die arkadenförmige Kurve weist 8 Maxima auf, in welchen die Schwingungsknoten liegen. In den nach unten gerichteten Spitzen befinden sich die Schalldruckminima oder die Schwingungsbauche. Der Abstand zweier benachbarter Minima entspricht der halben Schallwelle. Die Länge dieser Strecke doppelt genommen und mit der Frequenz multipliziert gibt eine Zahl, mit der Dimension einer Geschwindigkeit die von der Schallgeschwindigkeit abweicht. Sie ist immer zwischen zwei Punkten auf der Abszissenachse eingeschrieben. Wir werden bei Fig. 4 auf diese Abweichung zurückkommen.

Die Schalldruckkurve Fig. 1 zeigt in den am Mundstück anliegen Lippen einen Schwingungsknoten K_1 und im Schallbecher einen Schwingungsbauch B_8 in unbestimmter Lage. Steckt man den die Tonhöhe nicht verändernden Dämpfer in den Schallbecher, dann zeichnet sich in der gestrichelten Kurve ein Druckminimum (Schwingungsbauch) ab, und anschliessend steigt der Schalldruck im Dämpferboden wieder bis zum Maximum K_9 an. In Fig. 2 sind diese beiden Kurven ergänzt durch eine strichpunktierte Linie, welche den Verlauf des Schalldruckes beim gänzlichen Stopfen mit der Hand angibt. In der Handfläche bildet sich ein Druckmaximum, das, um die Länge Δ vom Maximum im Dämpferboden entfernt, gegen das Mundstück hin verschoben ist. Die akustische Länge des Hornes wird um diese Strecke verkürzt, weshalb der Ton ansteigt. Beim F-Horn macht der Anstieg etwa eine halbe Tonstufe aus. Das 2. Ventil verlängert das Horn wiederum soviel, dass die Tonhöhe des offenen Hornes erklingt.

Durch das gänzliche Stopfen verändert sich der Charakter des Klanges; er ist leise, gedämpft wie ein Echo. Das unvollständige Einführen der Hand, bei welchem sich der Ton senkt, bewirkt eine Verlängerung der schwingenden Luftsäule.

Fig. 3 zeigt für die Naturtöne 2 bis 12, durch kleine Kreise markiert, die Lage der Schwingungsbauche in der Achse des Hornes. Das Produkt aus dem doppelten Abstand

zweier benachbarter Bäume und der Frequenz des Tones gibt eine Zahl, die vom Mundstück zum Schallbecher hin zunimmt. In Fig. 4 sind diese Zahlen in entsprechendem Abstand vom Mundstück durch Punkte angegeben. Die Messungen nach Fig. 1 sind als Kreuze eingetragen. Durch die Schar der Punkte ist gefühlsmässig eine mittlere Kurve gezeichnet. Zum Vergleich ist die Schallgeschwindigkeit in der freien Luft durch eine gestrichelte Linie markiert. Die Abweichung der ansteigenden Kurve, der Produkter 2 mal Abstand zweier benachbarter Schwingungsbäume mal Frequenz, von der horizontalen Linie der Schallgeschwindigkeit in der freien Luft ist physikalisch nicht geklärt.

B. Kommentar für den Hornisten

Um dem Praktiker die physikalisch-akustischen Erscheinungen näher zu bringen, heben wir hier nachfolgend die wichtigsten Vorgänge heraus, wobei wir aus dem vorangehenden Vortrag einige Feststellungen wiederholen.

Die Entdeckung des Dresdener Hornisten Josef Hampel, um 1750, wonach die stopfende Hand im Schallbecher den Ton bei beschränktem Einführen vertieft und bei gänzlichem Stopfen um einen Halbton erhöht, wirkte sich hinsichtlich der Verwendung des Instrumentes durch die Komponisten epochemachend aus. Dadurch wurde es möglich, das Horn nicht nur mit den Naturtönen einzusetzen, sondern chromatisch. Allerdings musste man eine erhebliche Veränderung der Klangfarbe der gestopften Töne in Kauf nehmen. Das Phänomen dieser Tonverschiebung blieb bis in die heutigen Tage hinein physikalisch ungeklärt. Morley Pegge schreibt in seinem ausgezeichneten Buch **The French Horn** (London 1960) auf Seite 132: « For all their laboratory paraphernalia none of the acousticians has offered a convincing explanation of the rise of pitch that occurs when we « stop » a note. » (Bei all den vielen Laboratoriumseinrichtungen war noch kein Akustiker imstande, uns zu erklären, weshalb der Ton beim gänzlichen Stopfen ansteigt.) Unsere Versuche haben 220 Jahre nach der Entdeckung des Phänomens die physikalische Erklärung gebracht.

In Fig. 2 zeigen die gezeichneten Kurven des Schalldruckes 3 verschiedene Schwingungssituationen.

1. Beim offenen Horn schwingen die Luftteilchen im Ende des Schallbechers mit maximaler Schwingungsweite und minimalem Schalldruck; man spricht von einem Schwingungsbauch oder einem Druckknoten. Die Schallwelle wird hier von einer Schwingung reflektiert, was man als weiche Reflexion bezeichnet. Der Druckverlauf ist in Fig. 2 durch eine ausgezogene Linie dargestellt. Im Ende des Schallbechers sinkt der Schalldruck in unbestimmter Lage gänzlich ab.

2. Durch einen richtig dimensionierten Dämpfer wird die Tonhöhe nicht verändert. Die Schalldruckkurve des gedämpften Tones (gestrichelte Linie) weist im Gegensatz zur Kurve des offenen Tones (ausgezogene Linie) im Schallbecher ein Minimum wie im Innern des Hornes auf und nach diesem Minimum steigt der Druck zu einem zusätzlichen Maximum im Dämpferboden an. An der abschliessenden Wand können die Luftteilchen nicht schwingen, sie erleiden maximale Druckschwankung (Druckbauch oder Schwingungsknoten) und die Schallwelle wird hier in einer harten Reflexion ins Horn zurück reflektiert. Die Lage der stehenden Wellen im Innern des Hornes ist beim gedämpften Ton gleich wie beim offenen Ton.

3. Schliesst man mit der Hand den Schallbecher gänzlich ab, dann entsteht in der Handfläche eine harte Reflexion wie im Dämpferboden (strichpunktierte Linie). Das Schalldruckmaximum in der Handfläche ist gegenüber dem Schalldruckmaximum im Dämpferboden um die Strecke Δl in das Horn hinein geschoben. Die schwingende Luftsäule wird um diese Länge verkürzt, weshalb der Ton um einen entsprechenden Betrag ansteigt. Beim F-Horn macht der Anstieg einen Halbton aus und durch das Einschalten des 2.

Ventils wird die schwingende Luftsäule um die Strecke Δ^1 verlängert, womit sich wiederum die Stimmung des offenen Hornes oder des Hornes mit Dämpfer ergibt. Der gestopfte Ton klingt wie ein Echo. Dieser Klangeffekt wird oft von Komponisten benutzt, um Echowirkung zu erzeugen. Beim F-Horn muss die gestopfte Stelle mit Echowirkung auf E-Horn, $\frac{1}{2}$ Ton tiefer, transponiert werden. Bei Verwendung des Dämpfers bleibt die Stimmung gleich wie beim offenen Horn.

4. Neben den 3 vorstehend beschriebenen Situationen hat der Hornist die Möglichkeit, die Hand im Schallbecher nur beschränkt einzuschieben, womit die Stimmung bis zu einem Ganzton und mehr absinkt. Der physikalische Grund liegt darin, dass durch die Hand die Erweiterung der Stürze ausgeschaltet und so das Rohr verlängert wird. Die Distanz zwischen zwei benachbarten Schwingungsbäuchen, die entspricht der Hälfte einer ganzen Schallwelle, vergrößert sich. Das akustische Grundgesetz besagt, dass das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz immer die Schallgeschwindigkeit ergibt. Wird die Welle länger, wie in vorliegendem Fall beim unvollständigen Stopfen, dann muss die Frequenz der Schwingung und damit die Tonhöhe absinken. Diese Manipulation mit der Hand erlaubt, die Töne der Naturtonskala zu verschieben. Die Komponisten der Klassik und der Romantik benutzten diese Möglichkeit um das Naturhorn chromatisch zu verwenden, wobei auch die Erhöhung des Tones durch gänzlich Stopfen angewendet wurde. Allerdings wird bei dieser Spielart der Klang stark verändert, was man heute im Konzert als mangelhaft empfinden würde. Man hatte aber seinerzeit keine andere Möglichkeit, die Zwischentöne der Naturtonreihe zu erzeugen. Beispielsweise sind in den Hornpassagen im **Fidelio** von Beethoven in der Arie der Leonore im 1. Aufzug von 70 Tönen 30 gestopft. Dank der nach 1820 eingeführten Ventile ist heute der Hornist nicht mehr darauf angewiesen, diese Zwischentöne durch Stopfen mit der Hand zu erzeugen. Aber auch heute korrigiert der Hornist kleine Differenzen der Stimmung mit der Hand. Er kann ebenfalls durch Aenderung des Ansatzes, durch Veränderung der Spannung der Lippen die Tonhöhe beeinflussen.

5. Zum Problem der reinen Intonation. Die Tonreinheit der Blechbläser ist aus 2 Gründen unsicher. Vorerst ist zu bedenken, dass das Orchester nicht den Kompromiss der temperierten Stimmung praktiziert. Das Ohr des Orchestermusikers empfindet in harmonischer Stimmung. Der gleiche Ton, d. h. ein Ton mit gleicher Bezeichnung im Notensystem, liegt bei verschiedenen harmonischen Tonarten nicht genau in der gleichen Höhe. Weiter ist das System der 3 Ventile mangelhaft, wenn mehrere Ventile bei einem Griff kombiniert werden. Das erste Ventil vertieft um einen Ganzton, das 2. um einen Halbton und das 3. um eine kleine Terz. 1. und 2. Ventil kombiniert gibt nicht ganz eine kleine Terz, 2. und 3. Ventil nicht ganz eine grosse Terz und 1. und 3. Ventil nicht ganz eine Quarte. Der Ganztonschritt vom 8. zum 9. Naturton ist entsprechend dem Verhältnis der Schwingungszahlen grösser als der Ganztonschritt vom 9. zum 10. Naturton. Der Hornist muss diese Fehler nach dem Gehör entweder durch den Ansatz oder durch entsprechende Verschiebung der Hand im Schallbecher ausgleichen. Deshalb benötigt der Hornist ein feines musikalisches Gehör und eine gute Tonvorstellung, denn sein Ohr muss bereits auf den genau richtigen Ton eingestellt sein, bevor er erklingt.

Wer sich näher mit diesem Problem befassen will, dem sei das ausgezeichnete wissenschaftliche Buch von Martin Vogel, **Die Intonation der Blechbläser** (Düsseldorf 1961. Band I der Orpheus Schriftenreihe zu Grundfragen der Musik. Herausgegeben von der Gesellschaft zur Förderung der systematischen Musikwissenschaft), empfohlen.

L'ACOUSTIQUE INTERNE DU COR

Dr WILLI AEBI, Berthoud (Suisse)

Exposé écrit à l'occasion

du 7e Congrès international d'acoustique,
Budapest 1971.

Le cor a subi deux modifications techniques essentielles depuis son introduction dans l'orchestre par Lully, vers 1660, modifications qui se sont traduites chacune par un langage musical particulier.

1re époque : Le corno da Caccia chez Bach et Haendel — l'actuel cor de chasse — se jouait ouvert, sans mettre la main dans le pavillon.

2e époque : Vers 1750, le corniste de Dresde, Joseph Hampel introduisit la technique des sons bouchés au moyen d'un jeu de main dans le pavillon de l'instrument. Si la main ne bouche que partiellement l'ouverture du pavillon, le son descend d'un ton et plus. Si la main bouche complètement l'ouverture, le son montera d'un demi-ton. A la suite de cette augmentation considérable du nombre des sons, l'instrument connut une période extrêmement riche de par l'usage qu'en firent les classiques, Haydn, Mozart et Beethoven, puis les romantiques Weber et Schubert, puis — dans leurs premières œuvres — les Wagner, Schumann et Brahms. Cette période est considérée comme l'âge d'or du cor. Les changements de sons obtenus ainsi par la technique du « bouché » avec la main, sont restés inexplicables physiquement, jusqu'à nos jours. Nos expériences nous ont permis de résoudre ce problème.

3e époque : Après 1820, avec l'invention et l'introduction des pistons (barillets), les cuivres deviennent entièrement chromatiques.

L'acoustique, déjà considérée comme science par les Grecs, a connu, depuis 1800, un développement spectaculaire qui s'est concrétisé par d'innombrables ouvrages. Les nombreux développements théoriques et mathématiques, ainsi que les analogies tirées des connaissances acquises en électricité sont, le plus souvent, incompréhensibles pour le profane.

Nos expériences tentaient, en partant de représentations simples, de suivre et d'analyser le phénomène de la vibration dans les tuyaux des instruments à vent et de le rendre compréhensible aux cornistes et aux facteurs d'instruments.

Le son, tel qu'il est perçu par l'ouïe, provient d'une pression et de mouvements oscillatoires (vibratoires) de l'air qui se déplacent à la vitesse de 343,8 m/sec. par une température de 20°. Ceci est l'onde sonore continue. Si les pulsions se suivent à intervalles réguliers, il se forme un son dont la hauteur dépend de leurs fréquences. Le la du diapason d'après lequel s'accordent les instrumentistes, est formé de 440 vibrations (pulsions) à la seconde. Sur cette distance de 343,8 m. parcourue durant cette unité de temps, il y a 440 ondes sonores. La loi fondamentale d'acoustique à l'air libre nous apprend que la longueur d'une onde multipliée par la fréquence donne la vitesse du son. En acoustique, on différencie entre l'onde sonore continue et l'onde sonore statique. D'après la conception habituelle, elle se crée par superposition d'ondes sonores de fréquences égales progressant à contre-courant. Elle se caractérise par le fait que les particules d'air provoquent en même temps une vibration stationnaire, c'est-à-dire qu'ils se trouvent toujours au même moment dans une position médiane ou terminale. L'amplitude d'une vibration se mesure à partir de la cote maximale de son ventre jusqu'à la cote minimale de son nœud. Pendant la vibration, toutes les parties des avoisinantes reçoivent une pression changeante qui provoque l'accélération ou la décélération. Les forces de pression s'additionnent le long de l'axe horizontal de l'onde sonore jusqu'au nœud de vibration suivant et produisent des fluctuations de pression maximales. Il se produit des fluctuations de pression sur toutes les parties de l'onde sonore. C'est la pression du son. La pression du son atteint à son maximum dans les nœuds de vibrations, c'est la raison pour laquelle on nomme ces endroits des ventres de pression.

A. Mensurations acoustiques du cor

La pression du son et ses fluctuations se laissent mesurer au moyen d'un microphone. On peut également les enregistrer graphiquement sur bande au moyen d'appareils électriques appropriés. La **figure 1** montre le déroulement de la pression du son le long de l'axe d'un cor en fa, sur la 8e harmonique. Sur l'espèce d'arcade que forme le graphique, on relève 8 maxima dans lesquels se trouvent les nœuds de vibration. Dans les pointes orientées vers le bas se trouvent les pressions de son minima, ou ventre de vibrations. La distance qui sépare deux minima voisins correspond à une demi-onde sonore. La longueur de cette distance multipliée par deux et multipliée par la fréquence donne un chiffre qui se différencie de celui de la vitesse du son. Ce chiffre est toujours indiqué entre deux points de l'axe d'abscisse. Nous reviendrons à cette différence avec la figure 4.

Le graphique de la ligne de pression du son (**Fig. 1**), montre un nœud de vibration (K^1), à la hauteur du contact des lèvres avec l'embouchure et un ventre de vibration (B^a) placé de façon indéfinie dans le pavillon. Si l'on place une sourdine qui ne déforme pas la hauteur des sons dans le pavillon, il y aura une pression minima (ventre de vibration) en moins, en suite de quoi la pression du son montera jusqu'au fond de la sourdine, jusqu'au maximum (K^2).

Dans la **figure 2**, ces deux graphiques sont complétés par une ligne de trait-pointillé qui indique le tracé de la pression du son lorsqu'on bouche complètement la sortie du pavillon avec la main. Dans la paume de la main se forme une pression minima, qui, distante de la longueur Δ^1 du maximum placé au fond de la sourdine, se déplace en direction de l'embouchure. La longueur acoustique du cor est ainsi raccourcie de cette distance, d'où un son ascendant. Sur le cor en fa, cette ascension est d'environ un demi-ton. Le 2e piston abaissant le cor de la même distance, on obtient donc la même hauteur qu'avec le cor ouvert.

En bouchant complètement avec la main, le timbre du son change ; il est doux, atténué comme un écho. En n'introduisant que partiellement la main — ce qui fait baisser le ton — on produit un rallongement de la colonne d'air.

La **figure 3** montre la place qu'occupent les ventres de vibrations dans l'axe du cor pour les harmoniques 2 à 12 (marqué par des petits ronds). La somme de deux fois la distance de deux ventres voisins, fois la fréquence des sons, donne un chiffre qui grossit à mesure, de l'embouchure au pavillon. Sur la **figure 4**, ces chiffres sont portés à la distance correspondante depuis l'embouchure par des points. Les mesures, d'après la **Fig. 1**, sont indiqués au moyen de croix. Un trait a été tiré au jugé à travers la constellation de points. Afin de comparer, nous avons tiré un pointillé qui indique la vitesse du son à travers l'air libre. Les fluctuations de la ligne ascendante (la somme de deux fois la distance de deux ventres de vibrations voisins, fois la fréquence) par rapport à la ligne horizontale de la vitesse du son à travers l'air libre, n'est physiquement pas expliqué.

B. Commentaire pour le corniste

Afin de rendre les phénomènes physico-acoustiques plus accessibles au musicien pratiquant, nous allons développer certains éléments essentiels du précédent exposé et redéfinir quelques constatations.

En découvrant le phénomène des sons ascendants ou descendants suivant la manière de boucher le cor avec la main dans le pavillon, le corniste de Dresde Joseph Hampel provoqua dès 1750 une véritable révolution. Les compositeurs firent largement usage de ce nouveau procédé. Il était désormais possible de sortir des limites des sons naturels pour entrer dans le chromatisme. Toutefois, il fallut accepter un changement radical

de la sonorité et du timbre de l'instrument. Le phénomène proprement dit était resté physiquement inexpliqué jusqu'à nos jours ! Morley Pegge écrit, dans son remarquable ouvrage **The French Horn** (London 1960), page 132 : « For all their laboratory paraphernalia none of the acousticians has offered a convincing explanation of the rise of pith that occurs when we « stop » a note ». (Malgré toutes les installations que l'on trouve dans les nombreux laboratoires, il n'a pas encore été possible à un seul acousticien de nous expliquer pourquoi le son monte lorsqu'on « bouche » complètement le cor.) Nos expériences nous ont permis d'éclaircir ce phénomène 220 ans après la découverte du système.

En **Fig. 2**, les graphistes de la pression du son nous montrent 3 situations de vibrations différentes.

1. Le cor ouvert : les particules d'air vibrent à la fin du pavillon avec une amplitude maximale et une pression de son minimale ; on parle d'un ventre de vibration ou d'un nœud de pression. L'onde sonore est réfléchie par vibration que l'on qualifie de réflexion tendre. Le tracé de la pression est indiqué par une ligne dans la Fig. 2. Au bout du pavillon, la pression du son baisse complètement en un endroit indéfini.

2. Avec une sourdine aux dimensions exactes, on n'altère pas la hauteur des sons. Le tracé de la pression des sons avec une sourdine (ligne traitillée), à l'encontre de celui du son ouvert (ligne continue), indique une pression minimale dans le pavillon comme à l'intérieur du cor. Après ce minimum, la pression augmente jusqu'à un maximum supplémentaire au niveau du fond de la sourdine. Les particules d'air ne peuvent pas vibrer au fond de la sourdine, ils subissent des fluctuations de pression maximale (ventres de pression ou nœud de vibration) et l'onde sonore est ici brutalement réfléchie à l'intérieur du cor. La position des ondes statiques, à l'intérieur du cor, est pareille, que le son soit ouvert ou avec sourdine.

3. Si l'on bouche complètement le pavillon avec la main, il s'ensuit une brutale réflexion au niveau de la paume de la main, comme sur le fond de la sourdine (ligne trait-pointillée). La pression maximale du son sur la paume est — par rapport à celle que l'on trouve au fond de la sourdine — décalée de la distance Δl vers l'intérieur du cor. La colonne d'air est ainsi raccourcie d'autant, raison pour laquelle le son monte. Avec le cor en fa cela représente un demi-ton. En actionnant le 2^e piston, on rallonge cette colonne d'air de la distance Δl , obtenant ainsi la même hauteur de note qu'avec le cor ouvert. Le son bouché sonne faiblement, comme un écho. Cet effet est souvent employé par les compositeurs. Le cor en fa transpose un demi ton plus bas pour obtenir l'effet d'écho. En employant la sourdine, la tonalité reste la même que sans sourdine.

4. A part ces 3 situations, le corniste a encore la possibilité de ne boucher que partiellement le pavillon, faisant ainsi baisser le son jusqu'à un ton et plus. L'explication physique se dégage du fait que la main détruit l'évasement du pavillon, prolongeant ainsi le tuyau. La distance entre deux ventres de vibrations voisins (la moitié d'une onde sonore) s'agrandit. La loi acoustique fondamentale nous apprend que la somme des longueurs d'ondes et la fréquence indiquent la vitesse du son. Si l'onde devient plus longue — ainsi que cela se produit en ne bouchant que partiellement le cor — la fréquence de vibration (et par conséquent la hauteur du son) doit baisser. Cette manipulation permet de dévier des sons de l'échelle harmonique naturelle. Les compositeurs classiques et romantiques exploitèrent cette nouvelle possibilité afin d'avoir le chromatisme avec le cor naturel, tout en faisant usage du système ascendant (boucher complètement). Cette sonorité — passablement altérée ! — serait aujourd'hui considérée comme défectueuse et ne remplirait pas les exigences du concert. A l'époque, il n'y avait pas d'autres solutions pour extraire les sons intermédiaires. Un exemple : dans *Fidelio* de

Beethoven, les passages de cor dans l'air de Leonore (1er acte) comprennent 30 sons bouchés sur 70. Grâce à l'invention et à l'introduction des pistons (après 1820), le corniste d'aujourd'hui n'est plus obligé d'obtenir les sons intermédiaires en bouchant avec la main, mais il **corrige** son intonation. Il la corrige également avec la tension labiale.

5. Au sujet des problèmes d'intonation. La pureté d'intonation des cuivres reste incertaine pour deux raisons. D'abord, il faut savoir que l'orchestre ne pratique pas le compromis du système tempéré. L'oreille du musicien d'orchestre perçoit l'intonation harmonique. Le même son — c'est-à-dire noté au même endroit sur la portée — ne se trouve pas exactement à la même hauteur selon les tonalités ou les harmonies employées. De plus, le système des 3 pistons devient insuffisant lorsque les doigtés sont combinés. Le 1er piston baisse d'un ton entier, le 2e d'un demi ton et le 3e d'une tierce mineure. Le 1er plus le 2e piston combinés ne donnent pourtant pas exactement la tierce mineure. Le 2e plus le 3e pas exactement la tierce majeure. Le ton entier du degré situé entre la 8e et la 9e harmonique est — par rapport au nombre de vibrations — plus grand que celui situé entre la 9e et la 10e harmonique. Le corniste doit percevoir ces différences avec son oreille et corriger, soit avec la main, soit avec les lèvres, d'où la nécessité absolue de bénéficier d'une bonne ouïe et d'une bonne représentation intérieure des sons (afin d'anticiper l'écoute de ce qu'il va jouer).

Pour ceux qui se sentent attirés par ces problèmes, je ne peux que recommander le remarquable ouvrage scientifique de Martin Vogel, « *Die Intonation der Blechbläser* » (L'intonation chez les cuivres), volume I de la Collection Orpheus pour les questions fondamentales de la musique. (Publié en allemand seulement par la Gesellschaft zur Förderung der systematischen Musikwissenschaft, Düsseldorf, 1961.)

THE INNER ACOUSTICS OF THE HORN

Dr. WILLI AEBI, Burdorf (Switzerland)

A paper written on the occasion
of the 7th International Congress on Acoustics,
Budapest 1971.

Since its introduction into the orchestra by Lully, around 1660, the horn has experienced two radical changes, both of which express themselves clearly in the musical use to which the horn was put.

First Epoch

Bach's and Handel's corno da caccia, today's hunting horn, was blown open, without the hand in the bell.

Second Epoch

Around 1750 the Dresden hornist, Josef Hampel, invented the stopping of the bell with the right hand. If the hand stops the opening of the bell only partially, the pitch goes down by as much as a whole tone or more. If the hand closes the opening completely, the tone jumps a half step upwards. On the basis of this multiplication of the possible notes, the horn was used liberally by the Classical composers Haydn, Mozart, and Beethoven, by the Romantics Weber and Schubert, and in the early periods of Wagner, Schumann, and Brahms, as well. This epoch has been called the Golden Age

of the horn. Up until now, the variation in pitch caused by the right hand has not been able to be explained physically. Our experiments have brought the solution to the puzzle.

Third Epoch

After 1820, the valve, invented shortly before, was introduced, bringing to all brass instruments the possibility of producing the entire chromatic scale.

Acoustics, already a science during Greek antiquity, became highly developed from 1800 onwards, as is testified to by a rich collection of professional literature. The numerous theoretical and mathematical treatises, as well as the analogies from electricity, are generally incomprehensible to the man in the street. With our experiments, we tried to investigate the processes of vibration in the tubing of brass instruments, using simple constructions as a point of departure, and to present them to hornists and instrument makers in an understandable form.

Sound as perceived by the sense of hearing is based on variations in air pressure and motion; at a temperature of 20° Centigrade it moves through the air at a speed of 343.8 meters per second. This is the **moving sound wave**. If the pressure impulses follow each other at regular intervals, a tone is produced, the pitch of which is in relation to the frequency of the impulses. The normal tone *a'*, to which orchestral instruments are tuned, has 440 vibrations per second; the distance of 343.8 meters traversed during this unit of time contains 440 sound waves. The basic acoustical rule of free air states that the length of a wave multiplied by the frequency gives the speed of sound.

In acoustics, one differentiates between the moving sound wave, described above, and the **standing sound wave**. According to the current conception, it originates in the superposition of sound waves of the same frequency traveling in different directions. It is distinguished by air particles performing a stationary vibration in their place in the same phase. That is to say, they are always to be found at the same time in a median or terminal position. The amplitude of a vibration decreases from its maximum at the antinode to its minimal point at the node. During vibration, every particle receives a changing pressure from its neighbor, provoking acceleration or deceleration, respectively. The pressure forces accumulate in the horizontal axis of the sound wave until the next vibration node, where they exert the maximum variation in pressure. There are pressure variations at every point of the sound wave. These are called sound pressure. Sound pressure is at its greatest in the vibration nodes, for which reason these places are also called pressure loops.

A. Acoustical measurements of a horn

Sound pressure and its fluctuation can be measured with a microphone, passed through the proper electrical equipment, and registered on a moving strip of paper as a curve.

Fig. 1 shows the development of sound pressure in the horizontal axis of an F horn (8th tone of the harmonic series). The arcade-like curve displays 8 maxima, where the vibration nodes are found. In the downward-oriented points are found the pressure minima or vibration loops. The distance between two neighboring minima corresponds to half a sound wave. This distance taken twice and multiplied by the frequency gives a number differing from the speed of sound. This number is always inscribed between two points on the abscissa. We will return to this deviation in Figure 4

The sound pressure curve in Figure 1 shows a vibration node *K'* where the lips touch

the mouthpiece, and a vibration loop B⁰ at an indeterminate point within the bell. If a (non-transposing) mute is inserted in the bell, a minimum pressure point (vibration loop) appears with the dashed curve, and following this the sound pressure in the bottom of the mute rises again until the maximum K⁰.

In Fig. 2 these two curves are supplemented by a line in dots and dashes representing the course of the sound pressure with complete stopping. A maximum pressure point is formed in the palm of the hand at a distance of Δ^1 from the maximum pressure point in the bottom of the mute, and shifted in the direction of the mouthpiece. The acoustical length of the horn is shortened by this distance, for which reason the pitch rises. With the F horn, this pitch rise corresponds to about half a tone. The second valve lengthens the horn, in its turn, by the same amount, so that the pitch of the open horn is sounded. When the horn is stopped completely, its tonal character is changed; it is soft, muted like an echo. Incomplete hand stopping, by means of which the pitch is lowered, causes a lengthening of the vibrating air column.

Fig. 3 shows the position of the vibration loops in the axis of the horn for the 2nd through 12th notes of the harmonic series, designated by tiny circles. The product of the double distance of two neighboring vibration loops and the frequency gives a number which increases from the mouthpiece to the bell end. In Fig. 4 these numbers are given in their corresponding distances from the mouthpiece. The measurements from Figure 1 are shown as x's. A curve has been drawn through the forest of points. For purposes of comparison a line, in dashes, shows the speed of sound in free air. The difference between the ascending curve — the product of twice the distance of two neighboring vibration loops and the frequency — and the horizontal line, representing the speed of sound in free air, has not yet been physically explained.

B. Commentary for the hornist

In order to render the physico-acoustical phenomena more accessible to the practical musician, we wish to emphasize the most important processes in the following remarks, whereby some of the preceding findings will be repeated.

The discovery of the Dresden hornist Josef Hampel, around 1750, according to which the hand lowers the tone when it is partially inserted into the bell and raises the pitch by half a tone when it stops the bell completely, had a revolutionary effect on composers' treatment of the horn. Through his discovery, it became possible to employ the horn chromatically instead of remaining restricted to the notes of the harmonic series. Of course, there was a price to be paid in the radical change of tone color of the stopped tones. The phenomenon of the change of pitch remained unexplained up to the present day. Morley Pegge writes in his excellent book, *The French Horn* (London 1960), p. 132: «For all their laboratory paraphernalia none of the acousticians has offered a convincing explanation of the rise of pitch that occurs when we «stop» a note». Our experiments have brought the physical explanation of the phenomenon, 220 years after its discovery.

In Fig. 2 the sound pressure curves show us three different vibratory situations.

1. **With an open horn**, the air particles in the end of the bell vibrate with maximal vibration amplitude and minimal sound pressure; we speak of a vibration loop or a pressure node. The sound wave is reflected here by a vibration which is termed a soft reflection. The course of the pressure is presented in Figure 2 by a drawn-out line. At an indeterminate point in the bell opening, the sound pressure falls off completely.

2. **With a properly proportioned mute**, pitch is not affected. In comparison with the curve of the open tones (normal line), the sound pressure curve of the muted tones (dashed line) shows a minimal pressure point in the bell, just as it does at various points within the horn itself, after which the pressure increases to a maximal point at the bottom of the mute. The bottom of the mute acts like a wall at which the air particles cannot vibrate; they undergo maximal pressure variation (pressure loop or vibration node), and the sound wave is reflected at this point in a hard reflection back into the horn. The position of the standing waves inside the horn is the same with a muted tone as with an open tone.

3. **When the hand stops the bell completely**, a hard reflection occurs on the palm of the hand (line in dots and dashes), just as with the mute bottom. As opposed to muted tones, the point of maximum sound pressure in the palm of the hand is shifted into the horn by the distance Δ^1 . The vibration air column is shortened by this distance, resulting in a corresponding rise in pitch. With an F horn, this pitch rise is equal to half a tone. When the second valve is depressed, the vibrating air column is lengthened by amount Δ^1 , resulting in the original pitch of the open or muted horn. The stopped tone sounds like an echo. Composers are fond of this effect. On the F horn, a stopped passage with echo effect must be transposed half a tone lower, to E horn. If a mute is used, the pitch remains of course the same as with the open horn.

4. **Besides these three situations**, the hornist has the possibility of introducing his hand only partially into the bell, resulting in a pitch drop up to a full tone. The physical explanation of this is that the widening of the bell is cancelled out by the hand, thus lengthening the tubing. The distance between two neighboring vibration loops, corresponding to half of an entire sound wave, is increased. It is an acoustical law that the product of the wave length and the frequency always results in the speed of sound. If the wave becomes longer, as in the present case of incomplete stopping, then the frequency of vibration must decrease, and with it the pitch. This manipulation with the right hand allows a shifting of the tones of the harmonic series. Classical and Romantic composers used this possibility in order to employ the horn chromatically; they also used full stopping to raise the pitch. Of course, with this manner of playing the tone is changed so much that we would be critical of it in the concert hall today. In those days, however, there was no other possibility of bridging the gap between the available notes of the harmonic series. For example, out of 70 tones in the horn passages of Leonore's aria in the 1st act of Beethoven's *Fidelio*, 30 are stopped. Thanks to valves, introduced after 1820, the hornist of today does not have to resort to hand stopping to produce such intermediate notes. But still today, the hornist corrects small pitch differences with his hand. He can also influence pitch by changes of lip tension.

5. **The problem of just intonation.** Brass players' intonation is uncertain, and for two reasons. First of all, we must realize that the orchestra does not practice the compromise of the well-tempered scale. An orchestral musician's ear hears according to the harmonic scale. A given note in the scale does not lie at exactly the same pitch in various harmonic keys. Furthermore, the system of three valves leaves something to be desired when several valves are combined in a single fingering. The first valve lowers the pitch by a whole tone, the second by half a tone, the third by a minor third. The first and second, combined, do not quite result in a minor third, second and third not in a major third, and first and third not in a perfect fourth. The whole tone step from the 8th to the 9th tone of the harmonic series, according to the vibratory ratio, is larger than the whole tone step from the 9th to the 10th tones. The

hornist must correct these deficiencies by ear, either by a different embouchure setting or by shift of the hand in the bell. For this reason, the hornist needs a fine-tuned musical ear and a good feeling for pitch: his ear must already be adjusted to the exact pitch before it is sounded.

For those who would like to come to closer terms with this problem, we would recommend the excellent scientific study by Martin Vogel, **Die Intonation der Blechbläser** (Düsseldorf 1961. Volume 1 of the Orpheus Schriftenreihe zu Grundfragen der Musik. Edited by the Gesellschaft zur Förderung der systematischen Musikwissenschaft).

Fig. 1 *Schalldruck, F-Horn, 8. Naturton 356 Hz.*

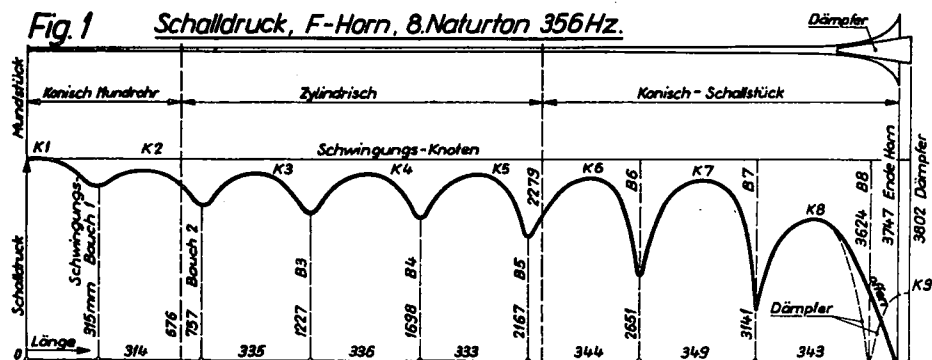
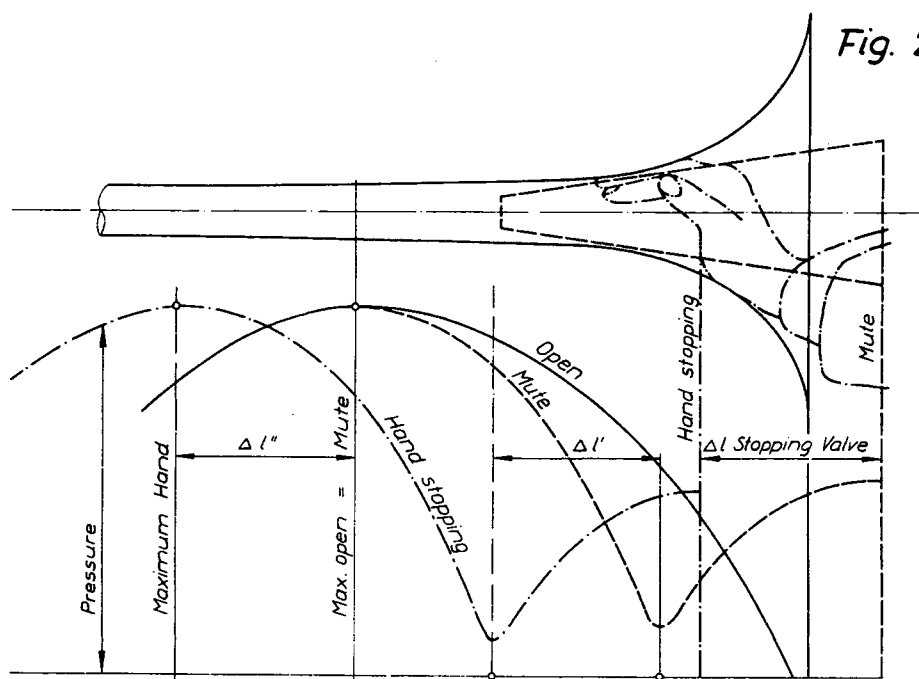
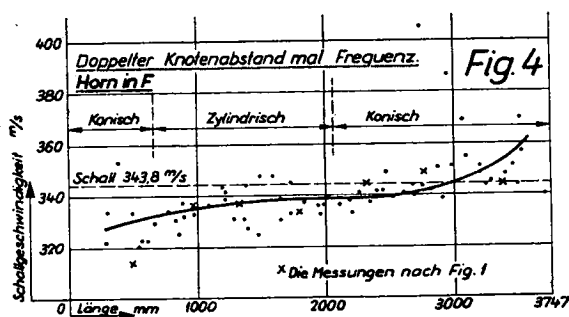
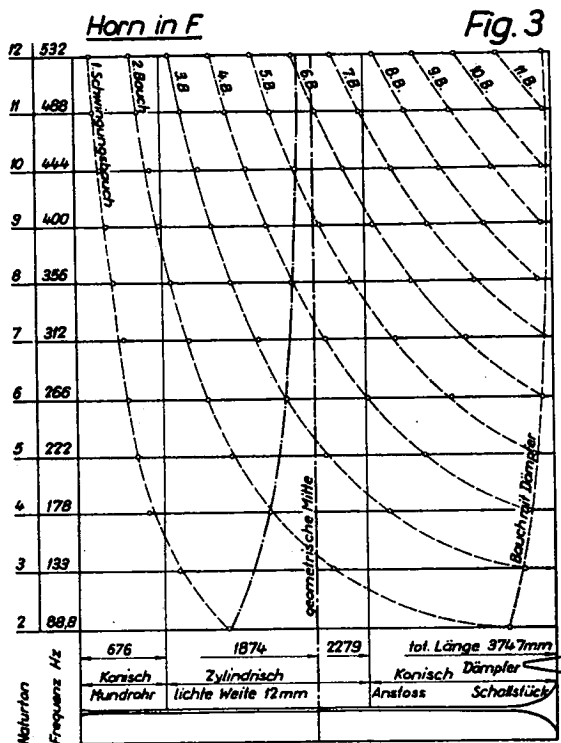


Fig. 2





Traduction des termes / Traduction :
 Voir page suivante, glossaire
 See next page, glossary

Glossar

FIGUR 1

Schalldruck
F-Horn
8. Naturton

konisches Mundrohr

zylindrisch
konisches Schallstück
Mundstück
Dämpfer
offen
Länge
Schwingungsknoten
Schwingungsbauch

Glossary

sound pressure
F horn
8th tone of the harmonic
series
conical mouthpipe

cylindrical
conical bell
mouthpiece
mute
open
length
vibration node
vibration loop

Glossaire

pression du son
cor en fa
8e harmonique

branche d'embouchure
conique
cylindrique
pavillon conique
embouchure
sourdine
ouvert
longueur
nœud de vibration
ventre de vibration

FIGUR 2

Schalldruckmaximum
gestopft
Dämpferboden

sound pressure maximum
hand stopping
mute bottom

pression de son maximale
bouché
fond de sourdine

FIGUR 3

Frequenz
lichte Weite
Anstoss

geometrische Mitte

frequency
amplitude
point at which the bell
joins the main tubing
geometrical middle

fréquence
amplitude
naissance du pavillon

milieu géométrique

FIGUR 4

Doppelter Knotenabstand mal Frequenz / Double nodal distance multiplied by frequency /
Double distance nodale multipliée par la fréquence.

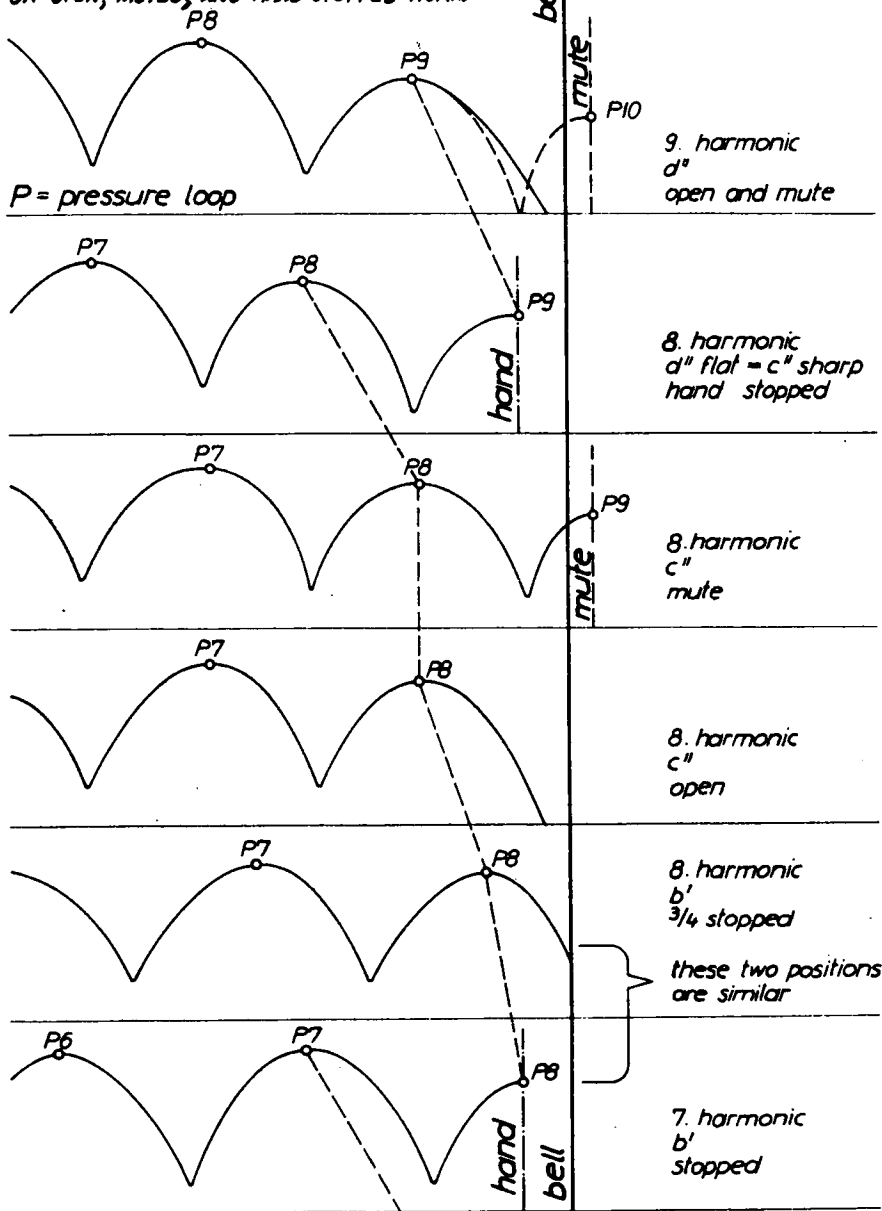
Schallgeschwindigkeit
Messung nach

velocity of sound
measures from

vitesse du son
mesures d'après

Fig.5

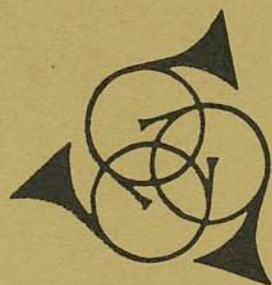
SUMMARY OF POSITIONS OF PRESSURE LOOPS ON OPEN, MUTED, AND HAND-STOPPED HORN.



F - Horn

Willi Aebi May 1974





Reprinted from THE HORN CALL Spring 1974