Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 87 (1969)
Heft: 38: 100 Jahre GEP

Artikel: Das Waldhorn und seine innere Akustik
Autor: Aebi, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70780

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Waldhorn und seine innere Akustik

DK 681.818.41:534

Von Dr. **W. Aebi**, dipl. Masch.-Ing. ETH, GEP, Burgdorf

In einer Zeit, wo das menschliche Tun sich auf dem schmalen Pfad der Hoch- und Höchstleistungen abspielt, wo die alte Weisheit «mens sana in corpore sano» bis zur Unkenntlichkeit in ihren beiden Begriffe missdeutet und missverstanden wird; in einer Welt der Extreme, wo man entweder aktiv bis zur Verstümmelung oder passiv vor dem Bildschirm bis zur Verblödung mitmacht, ist es wohltuend, zu sehen, dass es noch Menschen – ja solche sogar, deren Leben der Technik gewidmet ist – gibt, die im Besinnlichen und Natürlichen Befriedigung finden und bereit sind, den Mitmenschen daran teilhaben zu lassen. *M. K.*

Das Waldhorn nimmt unter den Orchesterinstrumenten einen etwas besonderen Platz ein, sagt doch Schumann: «Das Horn ist die Seele des Orchesters». Einerseits wird es seiner besondern klanglichen Qualitäten wegen geschätzt, ist aber anderseits gefürchtet, weil es ab und zu durch falsche Töne auffällt (der Deutsche nennt sie «Kiekser», der Franzose «Canards»). Der Verfasser hat als Liebhaberhornist das heikle Instrument jahrzehntelang geblasen und sich mit seinen klanglichen und blastechnischen Problemen befasst. Seit einigen Jahren führte er umfangreiche akustische Untersuchungen durch, die sehr interessante Ergebnisse zeitigten. Nach einer kurzen historischen Einleitung sowie einem Überblick über die heute benutzten Instrumente wird über diese Ergebnisse berichtet. Soweit sie mit den Darlegungen in Zusammenhang stehen, werden die akustischen Begriffe und Vorgänge erläutert.

Bild 1. Waldhorn. Aus Joh. Cristoph Weigel: Musicalisches Theatrum. Faksimile-Ausgabe im Bärenreiter-Verlag Kassel und Basel

A. Die historische Entwicklung des Hornes

Das Horn fand um 1700 Eingang in das Orchester. Seither hat die Musik vielfältige Wandlungen durchgemacht; das Orchester veränderte sich jedoch in dieser Zeit, abgesehen von der zahlenmässigen Besetzung, verhältnismässig wenig. Es entwickelte sich aus der Barockzeit mit dem Cembalo als Generalbassinstrument über die Mannheimer-Schule um 1750, bei welcher das Cembalo ausschied und die Klarinette eingeführt wurde, zum Klangkörper der Wienerklassik und der Romantik. Mit der Verbesserung der Blechblasinstrumente durch die Einführung der Ventile an Horn und Trompete, sowie der Ergänzung mit den Tuben durch Wagner, endlich die vergrösserte Besetzung, ergab sich nach 1850 das Instrumentenensemble unserer heutigen Sinfonieorchester.

Während sich die Streichinstrumente in dieser Zeit praktisch kaum veränderten, die Holzblasinstrumente und die Posaunen lediglich technische Verbesserungen erfuhren, die ohne Einfluss auf die Stimmführung blieben, erhielt die Trompete um 1850 Ventile und wurde damit zum chromatischen Instrument. Bis dahin konnten auf ihr nur die Naturtöne geblasen werden. Auch das Waldhorn erhielt um 1850 Ventile, hatte aber schon 100 Jahre früher eine sehr bedeutende Veränderung erfahren, so dass sich in seiner Entwicklung zum heutigen Instrument zeitlich drei Abschnitte feststellen lassen: Barock 1650 bis 1750, Wienerklassik und Romantik 1750 bis 1850, und die Zeit nach 1850.

1. Das «Corno da caccia», Bild 1

Es ist das Horn der ersten Periode (Telemann, Bach, Händel) und entspricht dem noch heute vor allem in Frankreich gespielten Jagdhorn (Trompe de Chasse). Es wurde offen, ohne Einführung der rechten Hand in den Schallbecher und, nach alten Abbildungen zu schliessen, oft mit angehobenem Schallbecher geblasen. Mit ihm konnten nur die Naturtöne erzeugt werden.

2. Das Inventionshorn

Der zweite Abschnitt der Entwicklung des Hornes begann um 1750, als der Dresdener Hornist *Josef Hampel* das Stopfen mit der rechten Hand im Schallbecher erfand. Diese Technik erzielt zwei verschiedene Wirkungen. Durch beschränktes Einführen der Hand in den Schallbecher wird dessen Erweiterung bis zu einem gewissen, veränderlichen Grad unwirksam. Die akustische Länge des Rohres verlängert sich. Dadurch sinkt der Ton bis zu einem Ganztonschritt. Schliesst man mit der tief eingeschobenen Hand die Öffnung des Schallbechers sozusagen ganz ab, so springt der Ton um eine halbe Stufe höher, klingt etwas schrill, stark gedämpft, wie ein Echo. Auf Grund der Versuchsergebnisse kann diese Wirkung physikalisch erklärt werden.

Hampel veranlasste auch eine bedeutende Verbesserung des Instrumentes, die zum *Inventionshorn* führte. Sie besteht darin, dass eine Windung des Rohres, wie aus Bild 2 ersichtlich ist, in das Innere des Kreises geführt und mit einem ausziehbaren Einsatzbogen versehen wird. Solche Einsatzbogen gab es in verschiedenen Längen; mit ihrem Wechsel können verschiedene Grundstimmungen erzielt werden. Überdies liessen sich die feinen Stimmungsunterschiede durch kleine Zugverschiebungen des Bogens ausgleichen.

Mit der Stopftechnik war die starre Naturtonreihe durchbrochen, weil Tonverschiebungen um eine halbe bis eine ganze Tonstufe nach

unten möglich wurden, allerdings unter deutlicher Veränderung des Klanges. Mit dieser Tonsenkung hatten die Komponisten der Mannheimer Schule, der klassischen und der romantischen Zeit gegenüber früher wesentlich erweiterte melodische Möglichkeiten, die auch dazu führten, dass das Horn in reichem Masse als Soloinstrument verwendet wurde. Das Inventionshorn hat sich im Orchester so gut bewährt, dass es noch lange nach Einführung der Ventile seinen Platz behauptete. So schrieb Wagner im Tannhäuser 1844 neben zwei Ventilhörnern noch zwei Inventionshörner vor. Auch Brahms bevorzugte sie wegen ihrer besondern klanglichen Qualitäten bis in die 70er Jahre. Am Konservatorium in Paris wurde bis 1897 Unterricht für das ventillose Naturhorn erteilt. Die Spanne zwischen 1750 und 1850 gilt als das goldene Zeitalter des Hornes.

3. Das Ventilhorn

Wenn auch die Hornisten die Stopftechnik mit ausserordentlicher Gewandtheit anzuwenden wussten, so riefen Kompositionen wie Fidelio (1804) und die 9. Sinfonie (1823) von Beethoven, sowie die früheren Wagner-Opern nach einer technischen Vervollkommnung des Instrumentes. Diese wurde in den Ventilen gefunden. 1850 waren sie allgemein eingeführt. Damit wurde die dritte und letzte technische Entwicklungsperiode des Hornes erreicht. Erst jetzt war das Horn ein chromatisches Instrument.

Die Ventile wurden zwischen 1810 und 1830 erfunden und gleichzeitig in drei verschiedenen konstruktiven Ausführungen entwickelt, die sich bis heute erhalten haben. Sie führten zu drei verschiedenen Horntypen, die sich auch klanglich unterscheiden:

a) Die Wienerhörner. Im Philharmonischen Orchester in Wien werden heute die *Wienerhörner mit Stechbüchsenventilen* geblasen, Bild 3. Sie klingen sehr weich und geben im Hornregister den Aufführungen der romantischen Werke von Wagner, Brahms, Bruckner und Richard Strauss den besondern vollen Klang. Sie werden auch heute fast ausschliesslich in F-Stimmung verwendet.

b) Die deutschen Hörner mit Drehventilen, in Deutschland und in der angelsächsischen Welt meist verwendet, klingen hell und durchsichtig und kommen besonders gut zur Wirkung in den klassischen Werken von Mozart und Beethoven.

c) Die französischen Hörner mit Stöpselventilen (Perinet-Ventile, Pistons) klingen nochmals heller, jagdhornmässig, und werden überdies in den romanischen Ländern und in Russland oft mit einem gepflegten Vibrato geblasen. Dem deutschen Ohr klingen sie in den romantischen Kompositionen etwas dünn. Der Franzose ist mit ihrem Klang vom Jagdhorn her vertraut.

4. Klang und Grundstimmung des Hornes

Seit den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts sind aber noch andere Klangunterschiede bei diesen Horngruppen festzustellen, die von der Grundstimmung des Hornes herrühren. Im Zuge des von den Orchestern geforderten «Perfektionismus» sind die Hornisten in den letzten Jahrzehnten dazu übergegangen, Hörner mit hoher Grundstimmung hoch-B und hoch-F zu blasen, um besonders in hohen Lagen bessere Treffsicherheit zu erlangen. Dieser Tausch der Instrumente lässt das feine Ohr deutliche Veränderungen der Tonqualität erkennen, denn die hohen Hörner sprechen wohl leichter an, klingen aber in mittlerer und tiefer Lage nicht mehr so weich wie das normale F-Horn. Mit all diesen Klangunterschieden befasst sich Dr. *Jürgen Meyer,* Braunschweig, in einer ausgezeichneten Publikation [1]. Da es sich dabei um Klangerscheinungen ausserhalb des Instrumentes handelt, seien sie als «äussere Akustik» bezeichnet, im Gegensatz zur «inneren Akustik», die sich mit den Schwingungsvorgängen im Instrument befasst.

B. Etwas über physikalische Akustik

Man findet in der Fachliteratur nur sehr spärliche Angaben über Lage und Länge der stehenden Wellen in den Blasinstrumenten. Wohl hat man sich beispielsweise eingehend mit den Schwingungsvorgängen in Orgelpfeifen befasst, so der französische Orgelbauer *Cavaillé-Coll* (1811 bis 1899), der 1849 darüber einen Bericht der «Académie des Sciences» verfasste, und andere. Aus jüngster Zeit liegen auch Berichte vor über Untersuchungen an Metallblasinstrumenten zur Verbesserung ihrer Stimmung [2]. Es bestehen auch einschlägige wissenschaftliche Werke, so jenes des genialen englischen Physikers Lord *Rayleigh* (1842 bis 1919) [3] und von *H. Bouasse* [4], um zwei der bedeutendsten zu nennen. Es fehlen aber leicht fassliche Publikationen, welche dem Instrumentenbauer und dem Orchestermusiker ein gut begründetes Bild der Schwingungsvorgänge in Blasinstrumenten geben. Diese Tatsache veranlasste den Verfasser dieses Berichtes, eingehende experimentelle Studien über die «innere Akustik» des Hornes durchzuführen.

Die Schwingungsvorgänge im Horn könnten mathematisch erfasst werden. Im Hinblick auf die grossen Schwierigkeiten, die damit verbunden sind, wurde aber darauf verzichtet. Es sei im folgenden versucht, von einfachen Vorstellungen ausgehend und gestützt auf experimentelle Untersuchungen, zu einem Bild der akustischen Vorgänge im Horn zu gelangen. Die Versuchsergebnisse sollen geschildert werden, ihre Deutung und die Abklärung verschiedener interessanter Probleme seien jedoch der wissenschaftlichen Akustik überlassen.

Schall, wie er vom Gehörsinn wahrgenommen wird, beruht auf Druck- und Bewegungsschwankungen der Luft. Bei einer Temperatur von 20 °C laufen diese Schwankungen, wie sie zum Beispiel ein Gewehrschuss erzeugt, mit einer Geschwindigkeit von $c = 343{,}8$ m/s durch die ruhende Luft. Sind die Druckstösse periodisch, das heisst folgen sie sich in regelmässigen Zeitabständen, dann ist der Schall

Bild 2 (links). Inventionshorn. Aus «Méthode pour le Cor», par Gallay, Professeur au Conservatoire, Premier Cor solo de la Musique particulière du Roi et de l'Opéra Italien. Edition Schonenberger, Paris, um 1845

Bild 3 (rechts). Wienerhorn mit Stechbüchsenventilen (Photo Klaus Hennch, Zürich)

ein Ton. Er ist dem menschlichen Ohr hörbar bis hinunter zu 16 Stössen und hinauf gegen 20000 Stösse in der Sekunde.

Bei den akustischen Bewegungsschwankungen muss man unterscheiden zwischen der Schwingung der Luftteilchen um einen festen Punkt und der Weitergabe dieser Schwingung an die folgenden Teilchen, welche von einer Druckschwankung begleitet wird. Sie ist die fortlaufende Schallwelle und kann mit der Oberflächenwelle auf dem Wasser verglichen werden. Die in der Zeiteinheit von der Schallwelle durchlaufene Strecke von 343,8 m enthält bei einem konstanten Ton die Anzahl f der pro Zeiteinheit erfolgenden Schwingungen. Beim Kammerton a′ sind es 440. Die Länge λ einer ganzen Schwingung der fortlaufenden Schallwelle ist der $f$te Teil der Strecke der Schallgeschwindigkeit. Beim Kammerton a′ ist $\lambda = 343{,}8 : 440 = 0{,}78$ m. Das Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz f ergibt immer die Schallgeschwindigkeit: $f \cdot \lambda = c$ (m/s).

In der Akustik unterscheidet man die stehenden von den soeben beschriebenen fortlaufenden Schallwellen. Nach der üblichen Auffassung entstehen sie durch Überlagerung gegenläufig fortschreitender Wellen gleicher Frequenz. Sie bilden sich im allgemeinen nur in begrenzten Räumen, an deren Grenzflächen Reflexionen auftreten. Die Blasinstrumente sind Rohre, in denen die eingeschlossene Luftsäule durch Blasen in Schwingung versetzt und dadurch zum Klingen gebracht wird. Die Schwingung entsteht bei der Flöte an der durch den Luftstrahl angeblasenen Kante des Blasloches; in der Klarinette am Blatt, bei Oboe und Fagott am Doppelblatt des Blasrohres. Bei Horn, Trompete und Posaune entsteht die Schwingung an den am Mundstück anliegenden Lippen, zwischen welchen ein feiner Luftstrom durchgeblasen wird. Nach der bereits erwähnten üblichen Auffassung werden die von der Stelle der Tonerzeugung ausgehenden Wellen nach Durchlaufen des Rohres am offenen Ende reflektiert. Die ausgehenden und die reflektierten Wellen überlagern sich und bilden die stehenden Wellen. Die Schwingung der Luftteilchen erfolgt in Richtung der Rohrachse, im Gegensatz zur transversalen Schwingung der Saite. Solange ein Ton mit konstanter Stärke erklingt, bleibt die stehende Welle im Rohr stationär, das heisst die Schwingung der Luftteilchen bleibt an jedem Ort gleich. Im Verlauf der Längsachse ändert die stationäre Schwingung in regelmässigem Wechsel zwischen einem Maximum und einem Minimum. Die Orte mit maximaler Bewegung nennt man Schwingungsbäuche, diejenigen mit minimaler Bewegung Schwingungsknoten.

Der Schwingungsvorgang der stehenden Welle ist der Anschauung leichter zugänglich, wenn man einen Abschnitt der Luftsäule zwischen zwei benachbarten Schwingungsbäuchen betrachtet. Im zylindrischen Rohr liegt der Schwingungsknoten in der Mitte; im konischen Rohr ist er nach Lord Rayleigh gegen den engeren Rohrdurchmesser verschoben. Die Schwingungsweite wächst vom Knoten weg gegen die beiden Bäuche hin bis zum Höchstbetrag. So pendeln die beiden Teile der Luftsäule links und rechts vom Knoten gegeneinander, mit nach aussen wachsender Amplitude. Die Schwingungsweite der Teilchen lässt sich nicht direkt messen, man berechnet sie im Bauch bei einem 1000-Hz-Ton von normaler Stärke auf etwa $3 \cdot 10^{-5}$ mm. Bewegen sich die Teilchen der beiden Säulenabschnitte nach aussen, dann fällt im dazwischenliegenden Knoten der Druck, bis sie sich in der äussersten Lage befinden. Umgekehrt steigt der Druck im Knoten bis zu einem Maximum, wenn sich die Teilchen in der innersten Lage ihrer Schwingung befinden. Diese Druckschwankung wird als Schalldruck bezeichnet. In der praktischen Akustik bezieht man Aussagen über Schallfelder meistens auf Druckschwankungen, bezeichnet diese aber dann im Sprachgebrauch der akustischen Praxis einfach als Schalldruck. (Definition 14 des akustischen Ausschusses DIN 1322 Juni 1959 «*Schalldruck*»: Durch Schallschwingung hervorgerufener *Wechseldruck*). Diese Bevorzugung des Druckes beruht darauf, dass von den verschiedenen Schallfeldbestimmungsstücken der Druck der Messung am besten zugänglich ist, und dass es die Druckschwankung ist, welche uns den Schall zur Wahrnehmung bringt. Das Gehörorgan gibt dem Menschen die Möglichkeit, Schallvorgänge wahrzunehmen, nach ihrer Stärke, Tonhöhe und Klangfarbe zu unterscheiden, sowie die Richtung, aus welcher der Schall einfällt, zu erkennen. Die Messung des Schalldruckes erfolgt mit Hilfe elektrischer Schallempfänger. Meist werden als Schallempfänger Kondensatormikrophone benutzt, deren Empfindlichkeit in absolutem Mass durch Eichung bestimmt wurde [5]. Die Veränderung des Schalldruckes längs der Rohrachse der Musikinstrumente kann mit einem Mikrophon und entsprechender Registrierapparatur festgestellt werden, wodurch sich die Orte der Maxima und der Minima, das heisst die Lage der Schwingungsbäuche und Knoten, bestimmen lassen, Bild 9.

Die komplementäre physikalische Grösse des Schwingungsvorganges zum Schalldruck ist die *Schnelle*, die mittlere Pendelgeschwindigkeit der Luftteilchen. In den Schwingungsbäuchen erreicht sie ein Maximum, während der Schalldruck in ihnen auf ein Minimum abfällt. In den Schwingungsknoten sinkt die Schnelle auf ein Minimum, während der Schalldruck zum Maximum ansteigt. Die Veränderung der Schnelle längs der Rohrachse lässt sich mit *Hitzdrahtsonden* feststellen. Diese bestehen aus einem feinen, elektrisch geheizten Draht, der je nach Grösse der Schnelle von der vorbeistreichenden Luft mehr oder weniger gekühlt wird. Durch die unterschiedliche Kühlung ändert sich der elektrische Widerstand, der sich messen lässt. So kann die Lage der stehenden Wellen im Musikinstrument sowohl nach der Veränderung des Schalldruckes als auch nach der Veränderung der Schnelle bestimmt werden. In Bild 9 würde sich die Kurve der Schnelle gegenüber der Schalldruckkurve um ¼ der Wellenlänge verschoben abzeichnen, so dass immer ein Schnellemaximum zwischen zwei Druckmaxima zu liegen käme. In diesem Versuch wurden keine Messungen mit Hitzdrahtsonden durchgeführt, weil die Lage der Schwingungsbäuche aus dem Schalldruckdiagramm heraus gemessen werden kann.

Eine ganze akustische Welle, sowohl eine stehende als auch eine fortlaufende, wird immer begrenzt durch zwei Schichten senkrecht zur Schallrichtung, in welchen die Luftteilchen gleich grosse und gleich gerichtete Bewegungen ausführen. Der momentane Druck ist in diesen Schichten ebenfalls gleich. In der stehenden Welle im Rohr liegen sämtliche Teilchen, welche mit derselben Frequenz schwingen, gleichzeitig in der äussersten Lage ihrer Bewegung, und sie befinden sich ebenso gleichzeitig in der Mittellage. Der Akustiker sagt, sie befinden sich überall in der gleichen Phase, wobei die Richtung der Bewegung in den von den Schwingungsknoten begrenzten Abschnitten wechselt.

Wie bereits erwähnt, stehen zwischen den Schwingungsbäuchen mit maximaler Bewegung die Schwingungsknoten mit minimaler Bewegung und maximalem Schalldruck. Sie befinden sich auch in Grenzwänden, welche die schwingende Luftsäule abschliessen, so in den Abschlussböden sogenannter gedeckter oder gedackter Orgelpfeifen und auch, wie die Experimente zeigen, in der Innenfläche der gänzlich stopfenden Hand im Horn, wie im Boden des Schalldämpfers. Diese beiden letzten Feststellungen sind neu und bemerkenswert. Der Abschluss einer Luftsäule durch eine feste Wand wird in der Sprache der Akustiker als hart bezeichnet. Demgegenüber bezeichnet man das offene Ende der Blasinstrumente und der Orgelpfeifen als weichen Abschluss. Dort liegt ein Schwingungsbauch und ein anschliessender Raum, in dem sich der Übergang von der stehenden Schwingung im Rohrinnern stetig zum äussern Schwingungsfeld der fortschreitenden Schallwellen wandelt.

Zwischen einem Druckknoten und seinem übernächsten Nachbarn liegt eine ganze akustische Welle von der Länge λ. Im mittleren Knoten herrscht ein momentaner Druck, der soviel über oder unter dem Mittel steht, wie der Druck in den beiden äussern Knoten unter oder über dem Mittel liegt. Der momentane Druck in zwei benachbarten Knoten ist immer entgegengesetzt. Die Schwankung des Druckes ist aber in benachbarten Knoten in der Grössenordnung gleich. Deshalb zeigt die Messeinrichtung des Schalldruckes für benachbarte Knoten ähnliche Werte. Wenn wir in unseren Ausführungen die beiden Paare der geläufigen Ausdrücke Schwingungsbauch und Druckknoten, sowie Schwingungsknoten und Druckbauch nebeneinander verwenden, so deshalb, weil für die Anschauung die Schwingung und für die Messung der Schalldruck am besten zugänglich sind.

Die Schnelle der Luftteilchen und der Druck an einem gegebenen Ort variieren bei einer Schwingung beide mit der Zeit, und es ist wesentlich zu wissen, ob sie beide gleichzeitig oder nacheinander ihre Höchstwerte annehmen. In der mathematischen Akustik spricht man von der Phasenlage der Druck- und Schnelleschwingung. Einem ganzen Schwingungsvorgang wird ein Phasenwinkel von 360° zugeordnet. Einer Schwingung der Teilchen von einer Endlage zur anderen entsprechen 180°. In den Extremlagen der Teilchen, in welchen die Schnelle verschwindet, erreicht der Schalldruck im Druckbauch ein Maximum. Anderseits wird der Schnelle-Höchstwert beim Durchgang der Luftteilchen durch ihre Mittellage erreicht. Zeitlich geschieht dies um einen Viertelsschwingungsvorgang früher. Man spricht deshalb davon, dass die Phasendifferenz zwischen der Schnelle- und Druckschwingung im Rohr 90° beträgt. Im Gegensatz dazu werden bei

der fortlaufenden Schallwelle die Extremwerte von Schnelle und Druck gleichzeitig erreicht, sie liegen in Phase. Der Übergang der stehenden Welle im Instrument zur fortlaufenden ausserhalb vollzieht sich im Schallbecher. Man spricht von einer Phasendrehung der Schnelle um 90° im Schallbecher.

C. Die Akustik des Waldhornes

1. Die Naturtonreihe

Der Besucher eines volkstümlichen Anlasses in der Schweiz staunt darüber, dass der Alphornbläser seinem Instrument ohne Löcher, Klappen und Ventile ganze Weisen zu entlocken vermag. Mit einer solchen Melodie hat Johannes Brahms am 12. September 1868 Clara Schumann zum Geburtstag gratuliert (Bild 4). Das Thema ist im Andante des IV. Satzes seiner 1. Sinfonie (im September 1876 vollendet) meisterhaft verwendet. Diese Töne stammen aus der Naturtonreihe, die auf dem Alphorn, dem Jadghorn, dem Inventionshorn und jedem Blechblasinstrument erzeugt werden kann (Bild 5). In den Werken von Bach, Händel, Haydn, Mozart, Beethoven und Weber finden sich viele analoge Beispiele für den Reichtum, der in ihr liegt. Sie sind eine wahre Fundgrube für den, der es versteht, solche Schätze zu heben.

Auch das moderne Ventilhorn beruht auf dieser Reihe. Die Kunst des Hornisten besteht darin, durch entsprechende Spannung der Lippen in der Vielfalt der Möglichkeiten den richtigen Ton zu treffen. Der physikalische Hintergrund dieser Reihe beruht auf dem akustischen Gesetz, nach welchem die Frequenz aller Töne ganzzahlige Vielfache des Grundtones sind. Wie bereits erwähnt, ist auf dem Horn der 1. Ton sehr schwer zu blasen und wird in den Kompositionen nicht benutzt. Die Töne 7, 11, 13 und 14 weichen in der Höhe von den im Notensystem geschriebenen Klängen der diatonischen Tonleiter erheblich ab und werden vom europäischen Ohr als falsch empfunden. In den Barockkompositionen finden sie sich aber in den Stimmen des Corno da Caccia und der Clarintrompeten. Es ist nicht bekannt, ob seinerzeit die Bläser imstande waren, durch Verändern des Ansatzes die Töne zu berichtigen. Nach 1750 war beim Horn diese Korrektur durch die von Hampel erfundene Stopftechnik mit der rechten Hand möglich. Auf den Jagdhörnern, die in Frankreich auch heute ohne Stopftechnik gespielt werden, erklingen sie vornehmlich in schnellen Passagen. Der Alphornbläser spielt auch Ton 11, obschon er deutlich zu hoch liegt. Man nennt ihn «Alphorn-Fa». Dem Jodler der Innerschweiz ist er so sehr vertraut, dass er ihn auch heute noch singt.

In der «Serenade für Tenor, Horn und Orchester» von Benjamin Britten, op. 31, dem besten Hornisten unserer Zeit, dem 1957 verstorbenen Denis Brain gewidmet, werden in der Einleitung für Horn allein die Naturtöne 7, 11 und 13 vielfach verwendet. Dadurch erzielt Britten eine sehr eindrückliche Wirkung naturhafter Romantik. Auch der Hornruf des Siefried im «Ring» von Richard Wagner könnte mit einem Naturhorn ohne Ventile mit den reinen Naturtönen höchst wirkungsvoll geblasen werden. Das eingeschobene Siegfried-Motiv im 14. Takt müsste vom Horn im Orchester gespielt werden, weil es Töne enthält (h′, a′, f″ und f′), welche nicht in der Skala des Naturhornes liegen. Es ergäbe sich dadurch ein sehr reizvoller Gegensatz zwischen dem tragischen Siegfried-Motiv und dem auf der Bühne geblasenen wilden Hornmotiv.

Die Klänge der Naturtonreihe konnten von den Komponisten so mannigfach verwendet werden, weil sie den Dur-Akkord ergeben. Die Grundstimmung des Hornes war deshalb in Übereinstimmung mit der Tonart des Stückes zu wählen. Aus dieser Zeit stammt die Praxis, die Hornstimme so zu schreiben, dass der 2. Naturton als c notiert ist. Ein Wechsel der Tonart verlangte ein Horn in der wiederum entsprechenden Stimmung. So war bei Tonartänderung durch den Hornisten das Instrument zu wechseln. Heute bleibt der Ventil-Hornist bei seinem Instrument und transponiert die vorgeschriebene Stimmung. Ist Es-Horn vorgeschrieben, dann transponiert er die Stimme für sein F-Horn einen Ganzton tiefer als geschrieben, bei A-Horn spielt er in der F-Stimmung eine grosse Terz höher. Der Hornist mit B- oder hoch-F-Horn transponiert entsprechend der Stimmung seines Instrumentes mit den passenden Ventilgriffen.

Die Reinheit der Naturtonreihe (abgesehen von 7, 11, 13 und 14) eines Instrumentes ist nicht selbstverständlich; sie hängt vom Verlauf des Rohrdurchmessers ab. Eine Krümmung der Rohrachse spielt dagegen keine Rolle. So ergeben das Alphorn und das in gerader Achse ausgeführte Versuchshorn genau die selben Töne wie das aufgewickelte, runde Waldhorn (Bild 13). Nach *Bahnert, Herzberg* und *Schramm* [6] bewirken ein zu enges Mundrohr oder ein zu weites

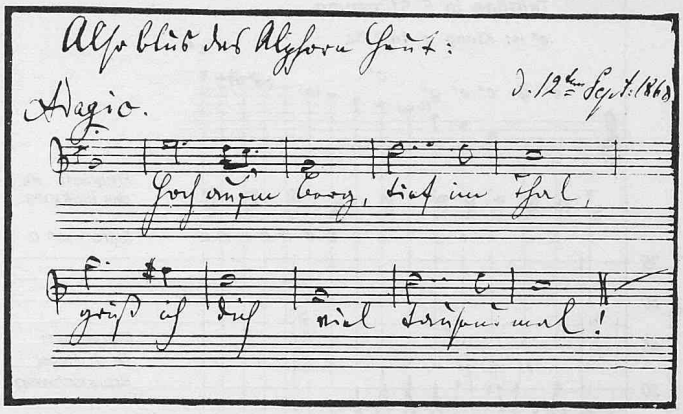
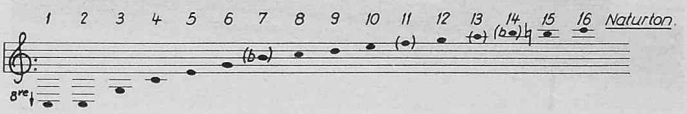


Bild 4. «Also blus das Alphorn heut» von Johannes Brahms. Autograph. Mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Staatsbibliothek, Berlin

Schallstück eine zu tiefe Lage der oberen Töne; im umgekehrten Fall sind sie zu hoch. Ein zu enger Querschnitt in der Mitte des Instrumentes bewirkt zu tiefe Töne in der mittleren Lage. Bei einem Rohr ohne Schallstück, das rein zylindrisch verläuft, liegen die hohen Töne gegenüber den tiefen zu hoch. Die Instrumentenbauer sind auf Grund alter Erfahrungen in der Lage, den Verlauf des Rohrdurchmessers so auszuführen, dass die Oktaven, Quinten und Terzen der ganzen Naturtonreihe mehr oder weniger gut stimmen. Es lässt sich aber nicht vermeiden, dass sich Unreinheiten der Stimmung ergeben. Dies ergibt sich aus der Gegensätzlichkeit einer natürlichen Stimmführung gegenüber der harmonischen Reinheit der Akkorde. Seit der Zeit vor Bach hat man sich mit den Problemen der Stimmung befasst und ist beim praktischen Kompromiss der temperierten Stimmung angelangt, bei der die Frequenzen der Töne nicht genau mit denjenigen der Naturtonreihe übereinstimmen. Es würde zu weit führen, hier auf diesen Problemkreis näher einzutreten. Nur soviel sei festgehalten, dass die Orchesterinstrumente primär in der natürlichen und nicht in der gleichschwebend-temperierten Stimmung gespielt werden. Es liegt im akustischen Grundgesetz, dass beispielsweise jedes Horn sowohl den kleinen wie den grossen Ganztonschritt gibt, je nachdem ob er in der Skala der betreffenden Hornstimmung zwischen dem 8. und dem 9. oder zwischen dem 9. und dem 10. Naturton auftritt. Die temperierte Stimmung kennt nur einen Ganztonschritt. Die Feinheit der reinen Stimmung eines Orchesters hängt vom Können der einzelnen Musiker ab, die Stimmung ihrer Instrumente in jedem Moment der musikalischen Notwendigkeit des Ganzen anzupassen. Der Hornist zum Beispiel weiss um die Lage der Töne seines Instrumentes und korrigiert sie nötigenfalls schon bevor sie erklingen durch entsprechende Anpassung des Ansatzes. Auch die rechte Hand im Schallbecher ist dabei behilflich, indem ein stärkeres Schliessen des Schallbechers den Ton senkt und das Öffnen den Ton hebt. Durch diese Ausführungen soll nur kurz darauf verwiesen werden, wie mannigfaltig kompliziert und subtil hinsichtlich der Stimmung das Spiel des Musikers im Orchester ist.

Die physikalischen Vorgänge im Horn, welche die Naturtonreihe ergeben, seien anhand des Bildes 10 erklärt. Beim Grundton, dem 1. Naturton, befindet sich in den Lippen oder sehr nahe dabei ein Schwingungsknoten und im Schallbecher ein Schwingungsbauch (Bild 10, unterste Kurve). Es liegt also nur ¼ der ganzen Schallwelle im Horn. Man spricht vom 1. Schwingungszustand. Bei etwas festerer Spannung der Lippen erklingt eine Oktave höher der zweite Naturton, im Rohr hat sich ein zweiter Schwingungsknoten gebildet, es herrscht der 2. Schwingungszustand (Bild 10, zweitunterste Kurve). Man spricht bei diesem Klang auch vom 1. Oberton. Wir meiden diesen Ausdruck, weil der 1. Oberton der 2. Naturton ist und sich mit beiden Bezeichnungen leicht Verwechslungen ergeben. Bei weiterer Anspannung der Lippen ergeben sich nacheinander der 3., 4., 5. usw. Naturton mit den entsprechend höhern Schwingungszuständen und den entsprechenden Knotenzahlen. Ihre Kurven liegen in Bild 10 überein-

Bild 5. Naturtonreihe



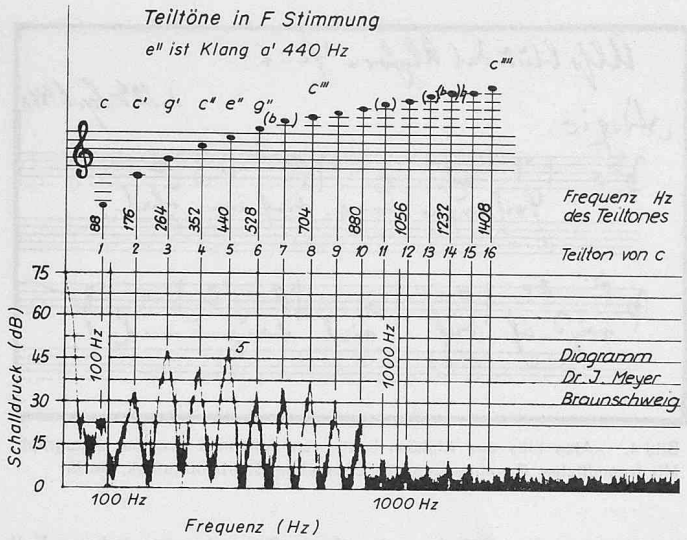


Bild 6. Das Klangspektrum. Horn in F; 2. Naturton. Kopie einer Aufnahme von J. Meyer, Braunschweig [1]

ander. Den Übergang von einem Naturton zu einem höheren nennt man Überblasen. Auch mit den Holzblasinstrumenten wird überblasen, bei der Flöte ebenfalls zuerst auf die Oktave, dagegen bei der Klarinette mit Hilfe einer Überblasklappe interessanterweise auf den 3. Schwingungszustand, bei welchem die Duodezime, also die Quinte über der Oktave erklingt.

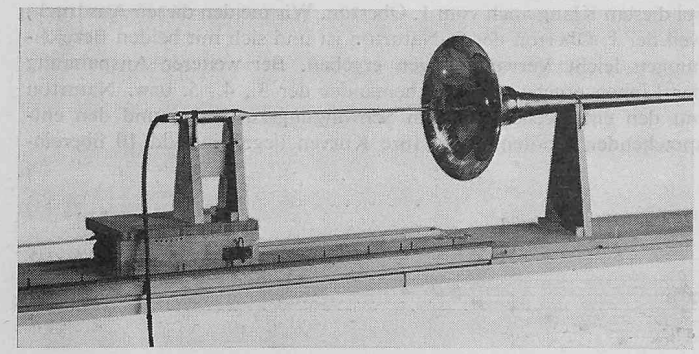
Die zwischen den Naturtönen liegenden Stufen der Tonleiter werden auf zwei verschiedene Arten erreicht. Beide Arten beruhen darauf, dass man die akustische Länge des Rohres ändert, wodurch sich die Frequenz und damit die Tonhöhe verschieben. Kleine Unterschiede werden beim Einstimmen der Instrumente durch kleine Längenveränderungen an den Stellen ausgeglichen, an welchen die Instrumente zusammengesetzt sind.

Die Schritte der Tonleiter werden bei den Holzblasinstrumenten durch sukzessives Verkürzen des Rohres durch Öffnen der seitlichen, mit Fingern und Klappen verdeckten Löcher erreicht, womit die schwingende Luftsäule verkürzt wird. Analog erzeugt man bei der Saite der Geige die Tonleiter, indem man durch Fingerdruck ihre schwingende Länge verkürzt. Das Gegenteil geschieht bei den Blechblasinstrumenten, bei welchen das Rohr durch Einschalten zusätzlicher Rohrstücke mit den Ventilen verlängert wird, wodurch die Frequenz fällt und sich der Ton vertieft. Bei der Zugposaune erfolgt die Verlängerung durch den Zugbügel. Bei den meisten heute üblichen Ventilinstrumenten verlängert das zweite Ventil soviel, dass der Ton um eine halbe Tonstufe sinkt. Das erste Ventil vertieft um einen Ganzton und das dritte um eine kleine Terz. Durch Kombination mehrerer Ventile kann man eine grosse Terz, eine Quarte und eine übermässige Quarte vertiefen, so dass die Quinte zwischen 2. und 3. Naturton chromatisch erschlossen ist.

2. Das Klangspektrum

In den bisherigen Ausführungen wurde jeweils von einer Schwingung der Luftteilchen schlechthin gesprochen, wie wenn sie durch eine einzige Frequenz bestimmt wäre. Dies trifft aber nicht zu, vielmehr ist die Schwingung der Teilchen im geblasenen Instrument aus einer Mehrzahl verschiedener Frequenzen zusammengesetzt. Dies rührt daher, dass der Klang der menschlichen Stimme und der Musikinstrumente aus einer Überlagerung von Tönen verschiedener Frequenzen besteht, wie der Akustiker *Hermann Helmholtz* (1821 bis 1894) vor 100 Jahren herausgefunden hat. Die Stimmgabel und der von einem elektrischen Frequenzgenerator angeregte Lautsprecher geben einen reinen Ton mit einer einzigen Frequenz; er klingt dem menschlichen Ohr farblos. Wie das weisse Sonnenlicht aus den Regenbogenfarben gemischt ist, so setzen sich der Instrumentenklang und die menschliche Stimme aus Tönen verschiedener Frequenz zusammen. Das Ohr reiht den Klang in der Tonleiter nach der Frequenz der tiefsten Schwingung, des Teiltones 1 ein, auch dann, wenn der Teilton dieser Frequenz weniger laut ist als die höheren Frequenzen. Mit einem Frequenzanalysator kann ein Klang in seine Teiltöne zerlegt werden. In Bild 6 ist das Spektrum des 2. Naturtones des F-Hornes, in F-Stimmung geschrieben c, klingend mit einer Frequenz von 88 Hz nach einer Aufnahme von Dr. *J. Meyer* wiedergegeben. Über dem Spektrum sind im Notensystem in F-Stimmung die Teiltöne eingeschrieben. Ihre Frequenzen sind ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung und stimmen genau, im Gegensatz zu den Tönen der Naturtonreihe, welche, wie erwähnt, in ihrer Lage vom Verlauf des Rohrdurchmessers abhangen und deshalb durch die Genauigkeit der Instrumentenbemessung bedingt sind. Beim Klang nach Bild 6 sind deutlich 15 Teiltöne beteiligt, wobei die Stärke der Teiltöne 2 bis 9 grösser ist als diejenige von Teilton 1. Das Ohr zerlegt die so mannigfach aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzte Schwingung analog der Fourieranalyse in die einzelnen Frequenzen, und ihre relative Stärke bestimmt im Klangempfinden die Klangfarbe. Wenn wir von Schwingungsbäuchen, Knoten und Wellenlängen gesprochen haben, so betraf dies immer nur einen Teilton einer bestimmten Frequenz. Bei den Schalldruckaufnahmen wurde jeweils durch einen Klanganalysator der gewünschte Teilton ausgefiltert und der Verlauf seines Schalldruckes in der ganzen Instrumentenlänge mit dem Pegelschreiber als Kurve aufgenommen, siehe Bilder 9 und 10. Meistens wurde der Verlauf von Teilton 1 der verschiedenen Naturtöne bestimmt. Es wurden aber auch Teiltöne 2 und 3 registriert und in Bild 12 einander gegenübergestellt.

Bild 7. Anordnung des Sondenmikrophons auf einem verschiebbaren Wagen



D. Die Versuchseinrichtung und die Durchführung der Versuche

Die Veränderung des Schalldruckes längs der Rohrachse zur Feststellung der Lage der stehenden Welle kann mit einem Mikrophon und einer damit verbundenen Registriereinrichtung aufgenommen werden. Damit die Schwingung im Instrumentenrohr nicht durch den Körper des Mikrophons gestört wird, leitet man die Druckschwankung an einer bestimmten Stelle im Horn durch ein dünnes Rohr einem ausserhalb liegenden Mikrophon zu. Um mit einem geraden Sondenrohr jede Stelle im Horn leicht erreichen zu können, wurde ein Instrument mit gerader Achse gebaut. Bild 13 zeigt das gerade Versuchshorn in F zusammen mit einem Inventionshorn von Raoux (Paris) aus dem Jahr 1819, gleicher Stimmung. Beide ergeben identische Naturtonreihen. Bild 7 zeigt das auf einem verschiebbaren Wagen befestigte «Sondenmessmikrophon» der Firma *Sennheiser electronic,* Bissendorf, welches mit einem Kabel mit der Registrier- und Messapparatur verbunden ist. Neben dem Wagen liegt auf dem Grundbrett eine Eisenstange mit Kontaktbolzen in 100 mm Abständen. Auf dem Wagen sitzt ein Kontakt, welcher die Distanzbolzen berührt und dadurch auf dem Registrierstreifen eine Marke zeichnet, entsprechend der Verschiebung der Sonde im Horn um 100 mm. Das Mikrophon besitzt ein Sondenrohr von 8 mm Durchmesser, welches durch ein Messingröhrchen von 5 mm äusserem Durchmesser und einer Bohrung von 4 mm verlängert ist. Um allfällige Beeinflussungen der Messergebnisse durch das Sondenrohr festzustellen, führte man Messungen mit dünneren Röhrchen durch. Um weiter zu prüfen, ob das durch die ganze Instrumentenlänge führende Sondenrohr stört, bog man das Versuchshorn in einer Distanz von 1276 mm vom Mundstück um 30° und führte die Sonde an dieser Stelle ins Rohr ein. Damit war die allenfalls störende Länge des Sondenrohres um mehr als die Hälfte verkürzt. Alle diese Kontrollmessungen ergaben gegenüber dem 3,7 m langen Sondenrohr von 5 mm Durchmesser keine feststellbaren Unterschiede.

Um die Stärkeschwankungen eines Bläsers auszuschalten, wurde versuchsweise der Ton durch einen am Mundstück befestigten, von einem Tongenerator angeregten Lautsprecher gegeben. Es zeigten sich aber durch diese Ankoppelung und die andere Schwingungsart des Tones in der Lage der Schwingungsknoten gegenüber den geblasenen Tönen Verschiebungen. Deshalb wurden bei den endgültigen Versuchen sämtliche Töne geblasen. Wenn auch dadurch kleine Schwankungen der Tonstärke und der mit einem Frequenzzähler kontrollierten Frequenz unvermeidlich waren, so liessen sich durch

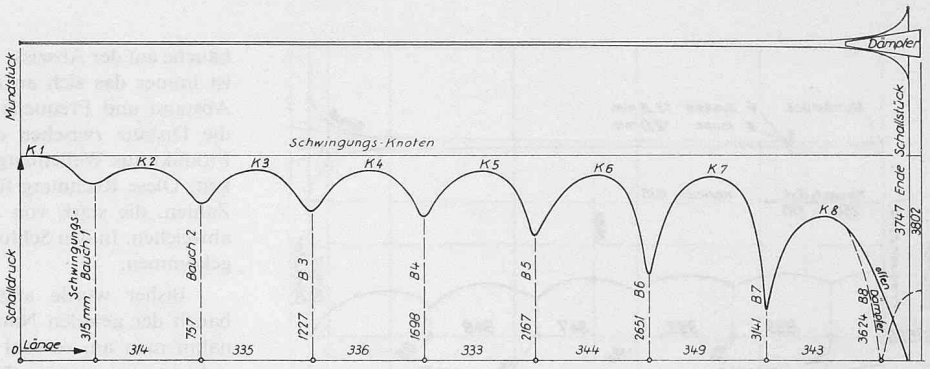


Bild 9. Verlauf des Schalldruckes der stehenden Welle
Horn in F, 3747 mm lang
8. Naturton, Klang f', Frequenz 356 Hz, 1. Teilton
Die Zahlen zwischen den markierten Punkten ergeben sich aus dem doppelten Bauchabstand mal Frequenz

mehrfache Wiederholung der Aufnahmen Mittelwerte bestimmen, die für unsere Zwecke genügend genaue Schalldruckkurven ergaben.

Bild 8 zeigt die ganze Versuchseinrichtung mit der Bedienungsmannschaft. Im Hintergrund der Verfasser als Bläser. Der Mann rechts bedient den Registrierstreifen des Pegelschreibers, über welchem der Frequenzzähler liegt. Aussen rechts oben die Filtereinrichtung, welche jeweils auf die Frequenz der zu registrierenden Schwingung eingestellt wird. Der Mann im Vordergrund bedient die Fortbewegungseinrichtung des Wagens, bestehend aus einem Plattenspielermotor, auf dessen Achse ein mit dem Wagen verbundener Faden aufgewickelt wird. Der Mann links führt das Protokoll jeder Aufnahme. Im Schallbecher des Hornes steckt der Dämpfer, durch dessen Mitte das Sondenrohr in das Horn hineingeführt ist.

E. Die Versuchsergebnisse

1. Der Verlauf des Schalldruckes im Horn, Bild 9

Auf der Ordinate ist der Schalldruck in logarithmischem Massstab aufgetragen, wie er vom Pegelschreiber aufgezeichnet worden ist. Die Kurve ist in ihrer Länge aus 3 Teilstücken zusammengezeichnet, weil drei Sonden verschiedener Längen verwendet wurden, um den Schalldruck über die gesamte Länge des Hornes aufzunehmen. Es ergibt sich eine arkadenförmige Kurve, in deren oberen Scheiteln die Druckbäuche oder Schwingungsknoten liegen. Die nach unten gerichteten Spitzen geben die Lage der Druckknoten oder Schwingungsbäuche an. Ihre Entfernung vom Mundstück lässt sich im Gegensatz zu den Druckbäuchen genau messen; sie ist an der Ordinate jedes Schwingungsbauches angeschrieben. Der Abstand von zwei sich folgenden Bäuchen entspricht der halben Wellenlänge. Zwischen den markierten Punkten ist auf der Abszisse die Zahl des doppelten Produktes aus Bauchabstand und Frequenz angegeben. Diese Zahl nimmt gegen den Schallbecher hin zu. Bei offenem Horn sinkt der Schalldruck in der Ebene des Endes vom Schallbecher stetig zum Schalldruck im äusseren Schallfeld ab. Steckt man einen Dämpfer in den Schallbecher, dann zeichnet sich, wie in der gestrichelten Linie angedeutet, der 8. Schwingungsbauch ab, und es bildet sich in der Abschlusswand des Dämpfers ein zusätzlicher 9. Schwingungsknoten. Der Massstab des Schalldruckes fehlt, weil sein Wert für unsere Zwecke nicht benötigt wird. Im Mundstück liegt ein Druckbauch. Dessen Höhe sinkt in den folgenden Wellen ab. Der Druck im Dämpferboden ist, verglichen mit dem letzten Druckmaximum im Horn, deutlich kleiner. Dies rührt vermutlich daher, dass die Öffnung des Dämpfers kleiner ist als der Rohrdurchmesser des Hornes. Der Abstand des durch den Dämpfer erzeugten Schwingungsbauches vom Dämpferboden ist kleiner als die Hälfte des vorherigen Bauchabstandes, weil sich nach Lord Rayleigh der Knoten zwischen zwei Bäuchen im konischen Rohr gegen sein engeres Ende hin verschiebt. Das ist vermutlich auch der Grund, weshalb die Distanz zwischen Mundstück und erstem Schwingungsbauch im konischen Mundrohr grösser ist als die Hälfte des Abstandes der Schwingungsbäuche 1 und 2. Zum Abfallen der Druckmaxima und Druckminima vom Mundstück zum Schallbecher hin hat der Verfasser keine triftige Erklärung gefunden.

2. Die Schalldruckkurven der Naturtöne 1 bis 6 im hoch-F-Horn, Bild 10

Die Länge des hoch-F-Hornes beträgt die Hälfte des normalen F-Hornes. Auf ihm lässt sich Naturton 1 gut erzeugen. Im Mundstück liegt der Druckbauch, im Schallbecher der Schwingungsbauch. Das Horn enthält bei Naturton 1 nur einen Viertel einer ganzen Schallwelle. Aufgenommen wurde bei allen Naturtönen der Teilton 1. Das Rohr des Hornes ist einseitig abgeschlossen, im Mundstück liegt ein akustisch harter Abschluss. Entgegen der Erfahrung mit gedackten Orgelpfeifen, bei welchen nur die ungeraden Naturtöne möglich sind, ergeben sich hier auch die geraden. Es dürfte dies daran liegen, dass das progressiv konische Schallstück andere Schwingungsbedingungen gibt als die zylindrische Orgelpfeife.

3. Die Lage der Schwingungsbäuche der Naturtöne 2 bis 12 im F-Horn, Bild 11

Alle Aufnahmen erfolgten bei Teilton 1. Auf die Wiedergabe der Schalldruckkurven wurde verzichtet und nur die Orte der Schwingungs-

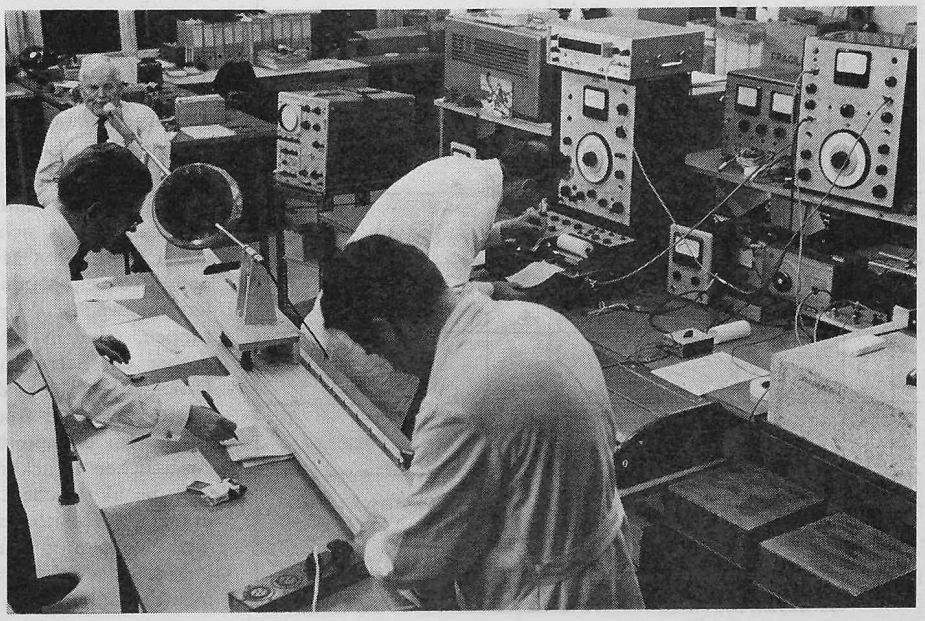


Bild 8. Die Versuchsanlage
(Photo Fernand Rausser, Bolligen)

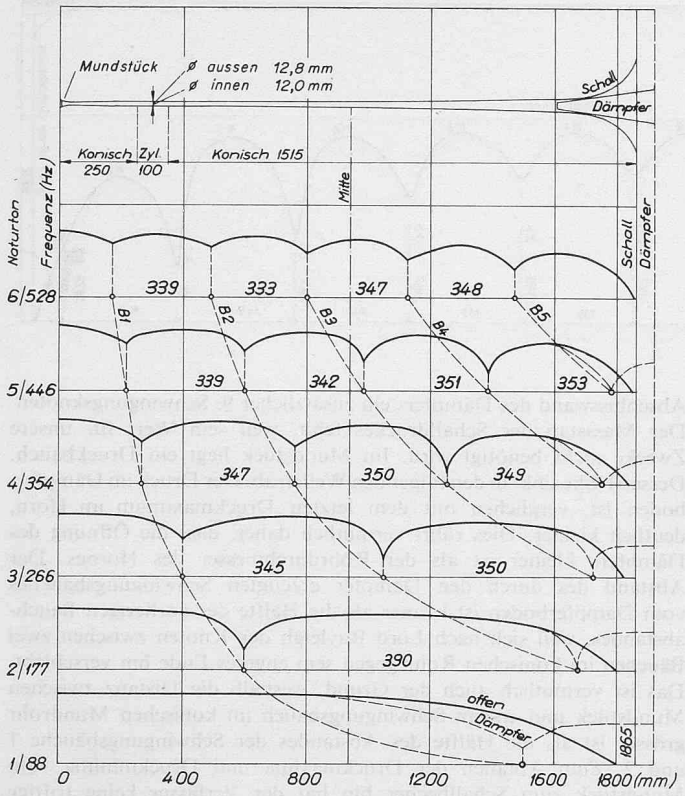
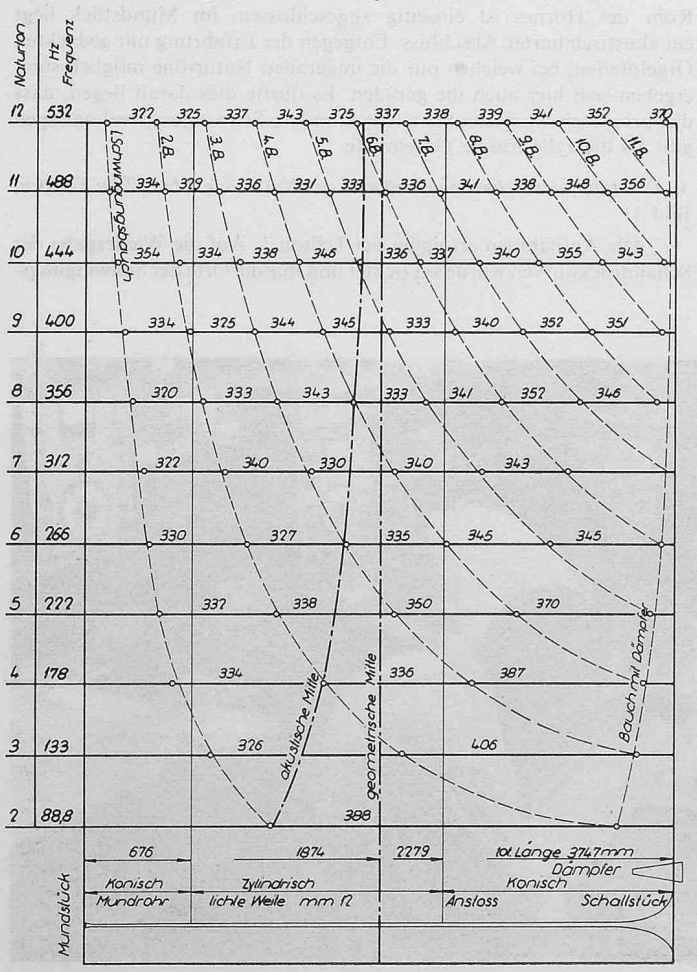


Bild 10. Verlauf des Schalldruckes von Teilton 1 der Naturtöne 1 bis 6. Horn hoch F

Bild 11. Die Lage der Schwingungsbäuche der Naturtöne 2 bis 12 im F-Horn, 1. Teilton (mit Kreis markierte Punkte). Akustische Mitte: Lage des mittleren Schwingungsbauches der geraden Naturtöne



bäuche auf der Abszisse angegeben. Zwischen zwei markierten Punkten ist immer das sich an diesem Ort ergebende, doppelte Produkt aus Abstand und Frequenz eingetragen. Die Länge einer Schallwelle ist die Distanz zwischen den übernächsten Schwingungsbäuchen. Das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ergibt die Schallgeschwindigkeit. Diese Rechnung führt mit den gemessenen Längen im Horn zu Zahlen, die stark von der Schallgeschwindigkeit in der freien Luft abweichen. In den Schlussbemerkungen wird auf diesen Punkt zurückgekommen.

Bisher wurde angenommen, dass der mittlere Schwingungsbauch der geraden Naturtöne in der Instrumentenmitte liege. Dabei nahm man an, sowohl im Mundstück wie im Schallbecher befinde sich ein Schwingungsbauch. Hinsichtlich des Mundstückes erwies sich diese Annahme als falsch. Bezeichnet man den Ort des mittleren Schwingungsbauches der geraden Naturtöne und des mittleren Schwingungsknotens der ungeraden Naturtöne als akustische Mitte, dann zeigt Bild 11, dass sie von der geometrischen Mitte des Instrumentes gegen das Mundstück hin abweicht, beim tiefsten Naturton am meisten, um sich mit steigender Frequenz der geometrischen Mitte zu nähern.

4. Die Schalldruckkurven der Teiltöne 1, 2, 3 der Naturtöne 4, 6, 8, 12

Die Zusammenstellung in Bild 12 zeigt das interessante Ergebnis, dass beim gleichen Naturton die Bäuche und Knoten der Teiltöne 2 und 3 in ihrer Lage nicht übereinstimmen mit deren Lage bei Teilton 1. Sie liegen am gleichen Ort wie bei Teilton 1 des Naturtones mit der Frequenz des höhern Teiltones. So liegt Teilton 2 des Naturtones 4 mit der Frequenz 365 Hz gleich wie Teilton 1 des Naturtones 8 gleicher Frequenz. Gleich wie Teilton 1 des Naturtones 12 mit Frequenz 534 Hz liegen Teilton 2 von Naturton 6 und Teilton 3 von Naturton 4.

5. Die Schwingung in der Mundhöhle beim Blasen eines Tones

Die Lehre von der Stimmbildung beim Gesang beschäftigt sich eingehend mit den akustischen Vorgängen im Körper des Sängers, sowohl im Kopf bis in die Gesichtsmaske, wie auch unterhalb des Kehlkopfes bis in den Brustkasten und zum Zwerchfell, welches als Stütze bezeichnet wird. Von namhaften Hornisten wird die Ansicht vertreten, dass analog zur Singstimme sich auch beim Hornblasen die Luftschwingung von den Lippen weg in die Mundhöhle und die Luftröhre bis in die Lunge fortsetze. Wir versuchten mit einem neben dem Mundstück in die Mundhöhle eingeführten Sondenrohr den Schalldruck zu messen, um ihn mit dem Schalldruck im Horn vergleichen zu können. Es ergaben sich Werte eines Bruchteiles des Schalldruckes im Mundrohr. Durch Verschieben des Sondenrohres in der Mundhöhle wurde keine Veränderung des Schalldruckes festgestellt. Beim Summen eines Tones ohne geblasenen Ton war der Schalldruck bei geschlossenen Lippen etwa gleich wie beim geblasenen Ton im Mundrohr. Bei offenem Mund fiel der Schalldruck etwa auf die Hälfte. Er war dabei noch etwa doppelt so gross wie ohne Summen bei geblasenem Ton. Daraus lässt sich schliessen, dass sich in der Mundhöhle beim Blasen keine stehende Welle ausbildet, und die Schwingung in der Mundhöhle verschwindend kleinen Einfluss auf die Tonbildung beim Blasen hat. Die Beeinflussung des geblasenen Tones durch Verändern der Zungen- und Gaumenstellung scheint an einer Veränderung der Lippenspannung zu liegen. Die durchgeführte Messung kann allerdings lediglich als Tastversuch gewertet werden.

F. Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Die positiven neuen Ergebnisse der hier beschriebenen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Der Verlauf des Schalldruckes in der Längsachse des Hornes zeichnet sich als arkadenförmige Kurve ab (Bilder 9, 10 und 12), in deren Maxima die Druckbäuche (Schwingungsknoten) und in deren Minima die Schwingungsbäuche liegen. Ihre Entfernung wächst vom Mundstück gegen den Schallbecher. In den Lippen, oder in ihrer Nähe, liegt ein Druckbauch, im Schallbecher ein Schwingungsbauch. Die umfassende Darstellung des Druckverlaufes bei den verschiedenen Naturtönen zeigt, dass die akustische Mitte frequenzabhängig ist.

2. Im Dämpferboden oder in der stopfenden Hand liegt ein zusätzlicher Druckbauch. Beim Stopfen mit der Hand verkürzt sich die akustische Länge des Hornes, so dass die Naturtonskala um einen Halbtonschritt ansteigt. Mit dem zweiten Ventil oder mit einem Stopfventil wird die akustische Länge soviel vergrössert, dass sich wieder die ursprüngliche Stimmung des Instrumentes ergibt.

3. Während sich beim offenen Horn das Schalldruckminimum des letzten Schwingungsbauches nicht abzeichnet, erscheint es beim gedämpften und beim gestopften Horn in der Schalldruckkurve.

4. Die Teiltöne gleicher Frequenz haben gleichliegende stehende Wellen unabhängig vom Naturton, von welchem sie herrühren. Die Druckbäuche und Schwingungsbäuche verschiedener Teiltöne des gleichen Naturtones sind gegeneinander verschoben, ausgenommen der erste Druckbauch und der letzte Schwingungsbauch.

Die fraglichen Ergebnisse dieser Untersuchungen, welche einer wissenschaftlichen Klärung bedürfen, sind:

1. Die Schalldruckmaxima und -minima nehmen vom Mundstück bis zum Schallbecher regelmässig ab.

2. Die Schallgeschwindigkeit im Rohr des Hornes stimmt nicht mit der Schallgeschwindigkeit im freien Raum von 345 m/s bei 22 ° C überein, wenn sie sich als Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ergeben soll. Beim F-Horn ergibt sie sich gemäss den in Bild 11 dargestellten Messergebnissen im konischen Mundrohr von 9 mm mittlerer l. W. zu 331 m/s, im zylindrischen Rohr von 12 mm l. W. zu 335,5 m/s und im konischen Anstoss und im Schallbecher zu 350 bis 390 m/s im arithmetischen Mittel. Im engen Rohr liegt die Zahl des doppelten Produktes mit der Frequenz unter und im weiten, konisch progressiven Rohr wesentlich über der Schallgeschwindigkeit in der freien Luft. Einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit im Rohr können haben:

a. die Lufttemperatur (die Stimmung kalter Blasinstrumente ist immer zu tief, deshalb werden sie vor dem Konzert durch Anblasen angewärmt)
b. Der Gehalt der Luft an Feuchtigkeit und Kohlensäure
c. Die Luftgeschwindigkeit (das im Forte geblasene Luftvolumen ist etwa 0,5 l/s. Bei dieser Menge ergibt sich im zylindrischen Rohr von 12 mm l. W. eine Geschwindigkeit von 4,4 m/s).

Der Einfluss dieser drei physikalischen Grössen a, b und c auf den Abstand der Schwingungsbäuche dürfte viel kleiner sein als der Einfluss der geometrischen Form des Rohres. In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass mit Flaschen oder einseitig geschlossenen Rohren mit veränderlichem Querschnitt durch Anblasen an der Öffnung Töne erzeugt werden, deren Frequenz, multipliziert mit dem vierfachen Bodenabstand, Zahlen ergeben, die weit von der Schallgeschwindigkeit abweichen. Besonders interessant ist der Unterschied der beiden Töne, welche sich beim einseitig geschlossenen konischen Rohr ergeben, je nachdem, ob man am engeren oder am weiteren Ende anbläst. Am engeren Ende angeblasen, ergibt sich der tiefere Ton.

Zum Schluss sei erwähnt, dass die Firma *Lenco AG,* Burgdorf, ihr akustisches Laboratorium mit seinen ausgezeichneten elektronischen Einrichtungen dem Verfasser zur Verfügung stellte, und dass die Ingenieure *Rud. Laeng* und *B. Strausak* ihm mit ihrem Fachwissen zur Seite standen. Der Verfasser möchte ihnen dafür seinen Dank aussprechen.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. techn. *Willi Aebi,* dipl. Masch.-Ing., Schönebüeli 29, 3400 Burgdorf.

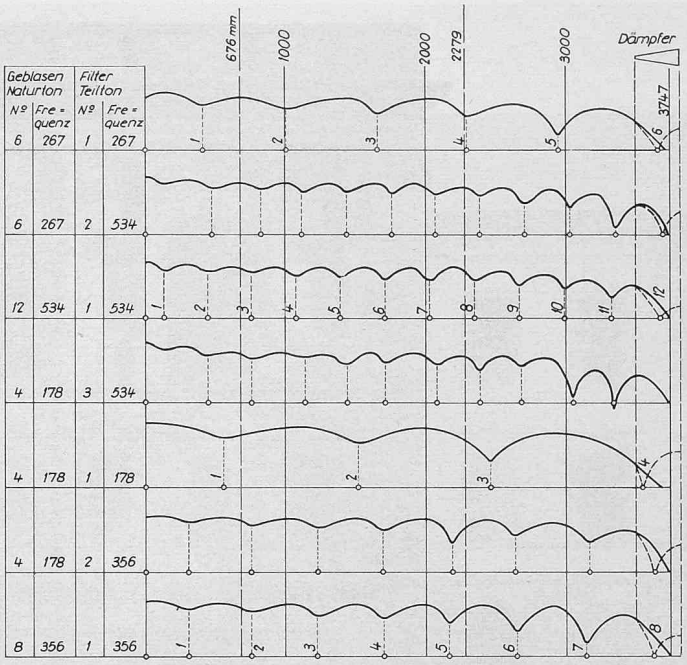


Bild 12. Schalldruckkurven der Teiltöne 1, 2, 3 der Naturtöne 4, 6, 8, 12

Literaturverzeichnis

[1] *Meyer, Jürgen:* Akustische Untersuchungen über den Klang des Hornes. «Das Musikinstrument» *12* (1967), H. 1 und 2, S. 32—37 und 199—203.

[2] *Krüger, Walter:* Objektive Untersuchungsmethoden bei Metallblasinstrumenten. «Das Musikinstrument» *13* (1968), H. 3, S. 459—462.

[3] *Lord Rayleigh:* The Theory of Sound. New York 1945, Dover Publications, erste Ausgabe nach der revidierten und erweiterten Auflage von 1894.

[4] *Bouasse, H.:* Instruments à Vent. Paris 1929, Librairie Delagrave.

[5] *Trendelenburg F.:* Einführung in die Akustik. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1961. Springer-Verlag.

[6] *Bahnert, Herzberg, Schramm:* Metallblasinstrumente. Leipzig 1958. Fachbuchverlag Leipzig.

Weitere Literatur über das Horn

Kunitz, Hans: Die Instrumentation, Teil VI: Horn. Leipzig 1957. VEB Breitkopf und Härtel Musikverlag. (Kompendium für das Musikstudium)

Morley-Pegge, R.: The French Horn. London 1960, Ernest Benn Ltd. (Vorzügliche historische Monographie)

Robin Gregory: The Horn. London 1969, Faber & Faber Ltd. (Enthält umfassendes Verzeichnis der Musik für Horn)

Karstädt, Georg: Lasst lustig die Hörner erschallen! Hamburg und Berlin 1964, Verlag Paul Paray. (Kleine Kulturgeschichte der Jagdmusik)

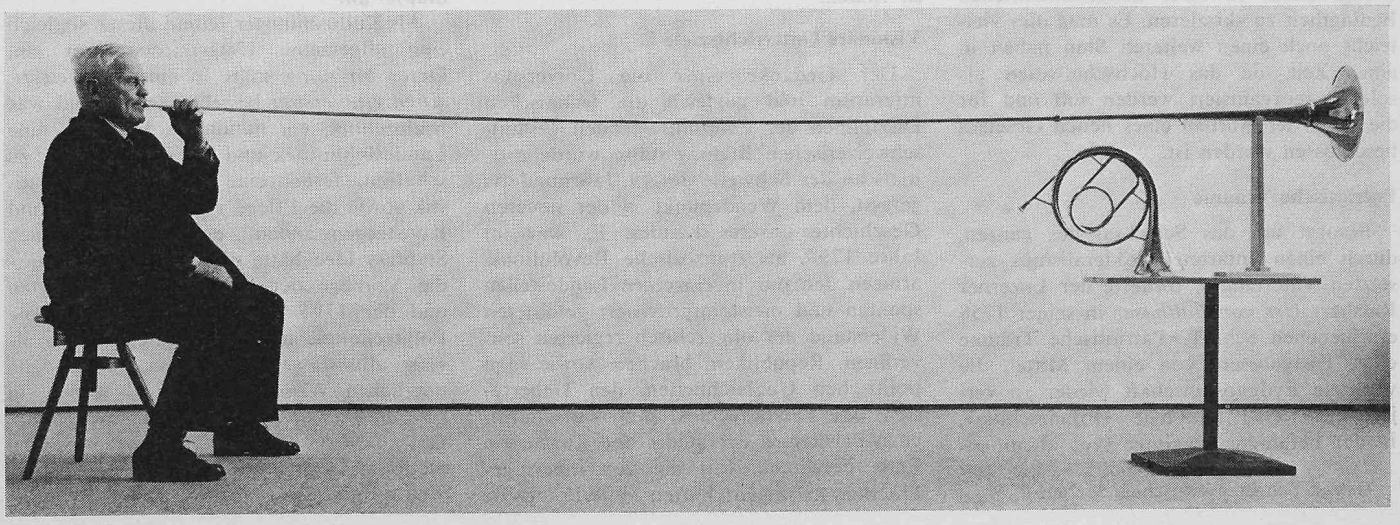



Bild 13. Gerades Versuchshorn in F und Inventionshorn in F von Raoux, Paris, 1819 (Photo Fernand Rausser, Bolligen)