

Fachbereichsarbeit aus Musik

*Das Fagott:
seine Entwicklung, sein Einsatz in der Musik
und
eine Untersuchung seines Klangcharakters mit Hilfe
der akustischen Spektralanalyse*

eingereicht von

Marcel Ritter, 8d Klasse
Bundesrealgymnasium, Innsbruck, Sillgasse

Februar 1997

Inhalt der Arbeit

Einleitung

Das deutsche Fagott

Die Geschichte des Instruments und seiner Vorläufer

Das Fagott in der Musik

Akustische Grundlagen von Ton und Klang

Tonerzeugung in den Rohrblattinstrumenten

*Spektrogramme und Frequenzspektren in den tiefen, mittleren
und hohen Tonlagen meines Fagotts*

Zusammenfassung und Schluß

Eine Pfeifenmacherin, Stich (ca. 1730) aus einer privaten Sammlung (aus Joppig 1984).

1. Dudelsack
2. Blockflöte
3. Fagott
4. Handbohrer
5. Schalmei
6. Dreheisen
7. Verschiedene Flöten
8. Zink
9. Stierhorn
10. Beil
11. Säge
12. Türkisches Horn



Une faiseuse de flutte. Eine Pfeifenmacherin.
 1. une musette. 1. ein Dudelsackh. 2. une flutte à cornet. 2. ein Cornet Flötte. 3. un fagot. 3. ein fagot. 4. un forêt. 4. ein Bohrer. 5. un chalumeau. 5. ein Schalmeie. 6. a. ceau à tourner. 6. ein Dreh-
 eisen. 7. toute sorte de flutte. 7. allerley Flöten. 8. un cornet. 8. ein Zinke. 9. une corne de boeuf.
 9. ein Ochsenhorn. 10. une hachette. 10. ein Beil. 11. une scie. 11. eine Säge. 12. un cor de turquie.
 C. P. S. C. May. 12. ein Türkisch horn. Mart. Engelbrecht excud. AV.

Im Mittelalter und in der Renaissance war noch keine eigene Zunft der Instrumentenbauer entstanden. Musiker und Instrumentenbauer - es waren dies Männer und Frauen - gehörten häufig zu den fahrenden Leuten. Sie waren in der Regel nicht auf ein bestimmtes Instrument festgelegt, sondern beherrschten im allgemeinen mehrere Instrumente. Ein fahrender Musiker beherrschte z. B. Gitarre, Harfe, Psalter, Rebec (beides Zupfinstrumente), Orgel, Horn, Drehleier, Schalmei, Bombart oder Bomhart, Cornamuse, Dulziana (alle vier sind Doppelrohrblattinstrumente), Flöte und Pauke (Joppig, 1984).

Das Fagott ist das Baßinstrument in der Holzbläsergruppe. Sein Tonumfang ist verglichen mit anderen Instrumenten groß, er beträgt $3 \frac{1}{2}$ Oktaven, von B_1 bis f^2 . Das Fagott wird in Sinfonie- und Blesorchestern, in der Kammermusik und als Soloinstrument eingesetzt. Sein Klang ist weich; seine Klangfarbe reicht von voll und dunkel in der Tiefe, anmutig in der Mittellage bis zu gepreßt und nälend in der Höhe.

Das Fagott ist ein Doppelrohrblatt-Instrument. Nach der Einteilung der Musikinstrumente, die Curt Sachs in Zusammenarbeit mit Erich von Hornbostel am Anfang unseres Jahrhunderts erstellte und die auch heute gebräuchlich ist, zählt es zu Aerophonen. Sachs teilte die Musikinstrumente in folgende Gruppen ein: in *Idiophone*, das sind Selbstklinger wie Xylophon und Glocke, in *Membranophone*, das sind Instrumente mit schwingender Membran wie Pauken, in *Chordophone*, Saiteninstrumente und in *Aerophone*, das sind Blasinstrumente wie Trompete, Flöte, Fagott und Orgel.

Die Unterteilung des Hauptanteils der Aerophone in 'Holzblasinstrumente' und 'Blechblasinstrumente' ist zwar allgemein üblich, aber eigentlich nicht korrekt. Das Herstellungsmaterial der Instrumente ist nämlich eher unwichtig. Heute werden zum Beispiel Blockflöten aus Kunststoff hergestellt, die sich im Klang nur wenig von den Blockflöten aus Holz unterscheiden. Weiters gibt es typische 'Holzblasinstrumente' aus Metall (Saxophon, Querflöte) und typische 'Blechblasinstrumente' aus Holz (Alphorn, Zink).

Man muß die Aerophone also nach einem besser geeigneten Kriterium einteilen, z. B. nach der Art, wie beim Anblasen der Ton erzeugt wird. Danach lassen sich die folgenden Instrumente unterscheiden: *Instrumente mit einem Blasloch oder einem Pfeifenmundstück*, wie Querflöte und Blockflöte, *Instrumente mit einem freischwebenden Blatt*, wie Mundharmonika und Akkordeon, *Instrumente mit einfachem Rohrblatt*, wie Klarinette und Saxophon, *Instrumente mit doppeltem Rohrblatt*, wie Oboe, Englischhorn und Fagott, *Kesselmundstück-Instrumente*, wie Trompeten und Posaunen, und schließlich *Trichtermundstück-Instrumente*, wie das Horn. Orgeln und Sackpfeifen haben beide mehrere Arten von Pfeifen.

Die oben genannte Gruppe der Doppelrohrblattinstrumente läßt sich weiters nach der Art der Anblasmöglichkeit des Rohrblattes unterteilen: in Instrumente, deren Rohrblätter zwischen die Lippen genommen werden, wie beim Fagott, und in Instrumente, deren Rohrblätter sich in einer sogenannten Windkapsel befinden und so nicht mit den Lippen des Spielers in Berührung kommen, wie etwa beim Dudelsack oder beim Krummhorn; zur letzteren Gruppe zählen auch die Instrumente, bei denen die Mundhöhle selbst als Windkapsel verwendet wird, wie etwa die im Mittelalter gebräuchlichen Schalmeien.

Die nachfolgende Arbeit befaßt sich vor allem mit dem deutschen Fagott. Die Entwicklungslinien des französischen und des deutschen Fagotts hatten sich nach 1800 getrennt; die Geschichte davor war gemeinsam. Als erstes wird in der Arbeit der Aufbau des deutschen Fagotts beschrieben. Es folgt dann eine kurzgefaßte Darstellung der Geschichte des Fagotts und seines Einsatzes in der Musik; im zweiten Teil der Arbeit wird auf akustische und auditive Grundlagen von Tönen eingegangen und es werden sodann Tonaufzeichnungen und -analysen meines eigenen Fagotts beschrieben.

Das deutsche Fagott

Die jetzige Form des deutschen Fagotts und Kontrafagotts ist in Abbildung 1 beschrieben; Abbildung 2 zeigt die Bezeichnungen der Teile des deutschen Fagotts. Der Korpus des Fagotts ist meist aus Ahornholz gefertigt. Die 259 cm lange konisch gebohrte Röhre ist zu einem U geformt. Dem Korpus vorgesetzt ist ein metallener S-Bogen, auf den das Doppelrohrblatt aufgesteckt wird.

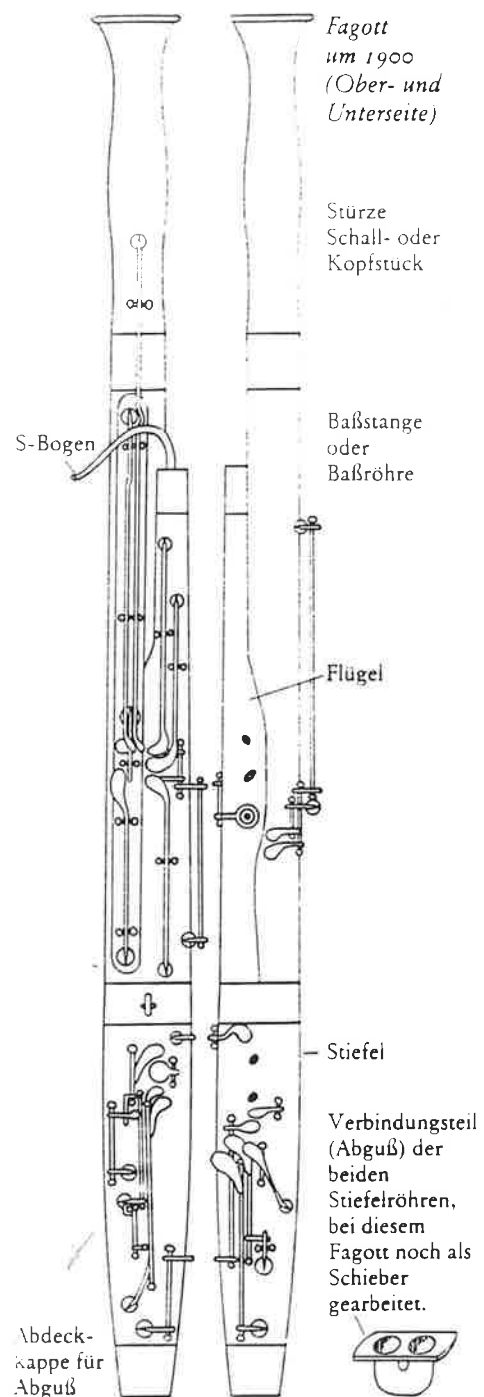
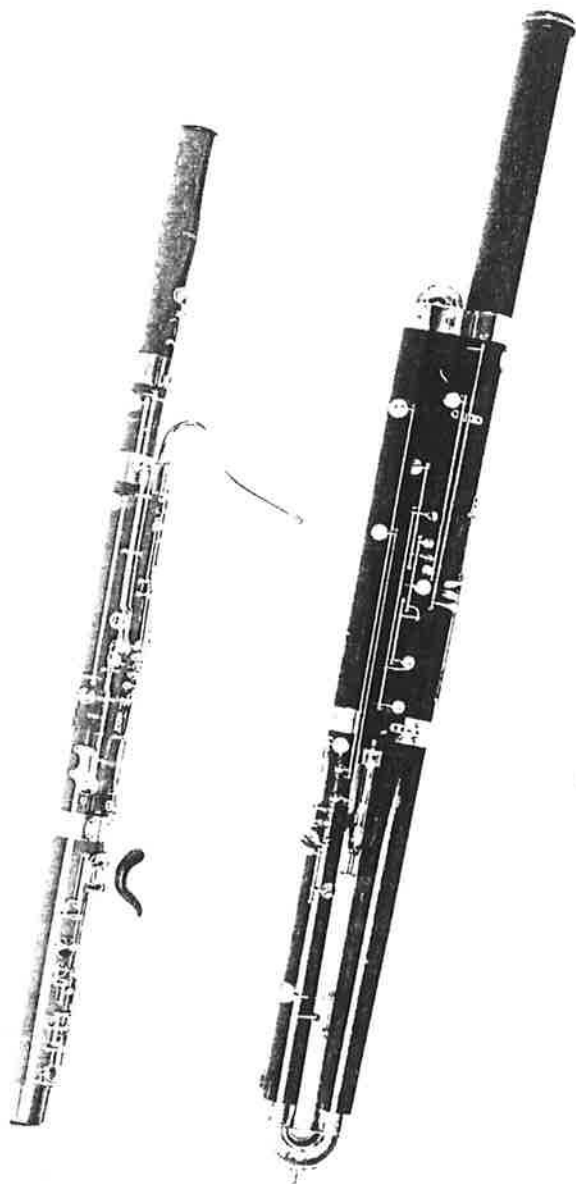


Abb. 1: Modernes Heckel-Fagott und Kontrafagott (aus Joppig 1984).

Abb. 2: Zeichnung eines Fagotts und Bezeichnungen seiner Teile.

Das Doppelrohrblatt. Das Doppelrohrblatt als Mundstück, einfach auch mit 'Rohr' bezeichnet, dient der Tonerzeugung. Normalerweise ist das Material für das Rohrblatt ein Schilf (*arundo donax*). Allerdings gibt es inzwischen schon Doppelrohrblätter aus Kunststoff. In Abbildung 3 ist ein Doppelrohrblatt dargestellt. Es ist circa 6 cm lang und hat eine 'schwingende' Bahnlänge

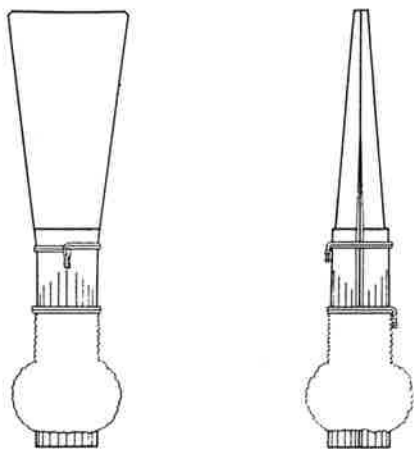


Abb. 3: Das Doppelrohrblatt.

von 27 bis 30 mm. Die beiden Rohrblätter werden von drei Zwingen aus Draht zusammengehalten. Das Mundstück muß immer wieder durch ein neues ersetzt werden und es sollte vom Bläser selbst hergestellt werden; er weiß nämlich selbst am besten, welche Eigenschaften sein Rohr haben muß. Die Form des Doppelrohrblattes ist stark daran mitbeteiligt, wie der Ton beginnt (Ansprache), wie genau er gespielt werden kann (Intonation) und welche Tonfärbung (Klangfarbe) er hat.

Der S-Bogen. Auch der S-Bogen ist an der Tonqualität des Fagotts beteiligt. Er ist eine ca. 30 cm lange Metallröhre, meist aus Messing oder Neusilber, die konisch verläuft. Seinen Namen erhielt der Bogen nach seiner äußeren Form. Er ist, wie das Doppelrohrblatt, auswechselbar.

Es gibt ihn in den vier verschiedenen Größen: 0, 1, 2 und 3. Am gebräuchlichsten sind die Längen 1 und 2. Nicht jeder S-Bogen paßt zu jedem Fagott. Die Suche nach dem geeigneten S-Bogen ist wichtig; ein S-Bogen, der auf einem fremden Fagott sehr gut anspricht und klingt, muß dies auf einem anderen Instrument nicht tun.

Der Holzkorpus. Der Korpus wurde zur einfacheren Herstellung und Bearbeitung in vier Teile geteilt. Sie werden mit Flügel, Stiefel, Stange und Schallstück bezeichnet. Die zwei parallel liegenden, in das Holz gebohrten Röhren sind am unteren Ende des Instruments durch ein Metallknie verbunden. Die gesamte Bohrung verläuft konisch. Das heißt, daß der Durchmesser der Röhre fortlaufend größer wird. Am Beginn des S-Bogens beträgt der Durchmesser etwa 3 bis 4 mm, bei der Öffnung am Schallstück etwa 4 cm.

Bei einem modernen Fagott befinden sich im Korpus mindestens 26 gebohrte Tonlöcher verschiedener Größe. Fünf Löcher werden direkt mit den Fingern geschlossen oder geöffnet, die restlichen werden durch einen komplizierten Klappenmechanismus bedient. Eine Öffnung eines Tonlochs wirkt akustisch so wie eine Verkürzung der Röhre und dadurch wird die Tonhöhe verändert. Die Tonlöcher haben somit einen großen Einfluß auf die Intonation des Instruments.

Der Name 'Fagott'. Das Wort Fagott kommt aus dem Französischen oder dem Italienischen. Albert Reinmann hat das Vorkommen des altfranzösischen Wortes 'fagot' bis in das 13. Jahrhundert nachgewiesen. Es bedeutet Bündel oder Reisigbündel. Im Italienischen gibt es das Wort 'fagotto' erst seit etwa 1500 in derselben Bedeutung. Warum ein Instrument, bei dem nur zwei Röhren nebeneinander in ein Stück Holz gebohrt sind, als Bündel bezeichnet wurde, konnte bisher nicht geklärt werden (Joppig 1984).

Die Geschichte des Fagotts und seiner Vorläufer

Seit prähistorischen Zeiten werden vom Menschen Musikinstrumente gebaut. Wir spielen darauf zu unserer Freude und Unterhaltung sowie zu zeremoniellen Anlässen. Musik wird auch zu medizinisch-therapeutischen Zwecken eingesetzt. Als akustische Klangkörper unterliegen die Musikinstrumente den Gesetzen der physikalischen Akustik. Ihre Entwicklung und ihr Aufbau ist aber meist komplex; sie sind das Resultat eines verwickelten und verzweigten Verlaufes fortschreitender Optimierung, unter anderem abhängig von der Musikentwicklung, von Entdeckungen, Hörgewohnheiten, Techniken der Materialbearbeitung sowie dem Verstehen der musikalisch-akustischen Grundlagen. Für den Verlauf der Entdeckung und die Entwicklung der Aerophone ist möglicherweise ihre Ähnlichkeit im Aufbau zum menschlichen Stimmapparat mit seinen Stimmlippen und dem Stimmtrakt nicht ohne Belang.

Im folgenden Abschnitt werden einige Vorläufer des heutigen Fagotts aus dem Mittelalter und der Renaissance vorgestellt und die Entwicklung des Fagotts sowie seine Verwendung in der Musik beschrieben.

Die ältesten Rohrblattinstrumente, die uns durch Funde und Darstellungen überliefert sind, sind die ägyptische Doppeloboe, die auch im vorderen Orient verbreitet war, weiters der griechische Aulos, ebenfalls eine Doppeloboe, und später die römische Tibia. Diese Instrumente stellen gleichsam die Ahnen für die mittelalterlichen Instrumente dar. Die Tibia lebte im Musikinstrument 'Calamus' in den Klöstern weiter und verbreitete sich so auch im europäischen Raum. Aulos und Tibia gelangten in einer zweiten Entwicklungslinie während der Völkerwanderung aus dem arabischen Kulturkreis nach Europa.



Abb. 4: Miniatur aus der Pariser Handschrift Ms. lat. 1118. Joculator mit Doppelschalmei.

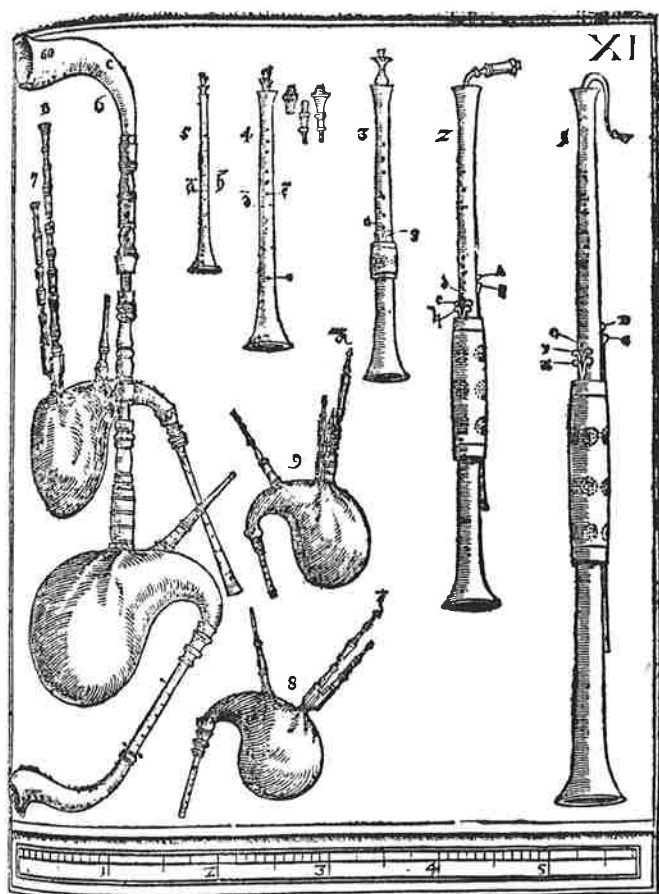


Abb. 5: Miniatur aus der Pariser Handschrift Ms. lat. 1118. Joculator mit einfacher Schalmei.

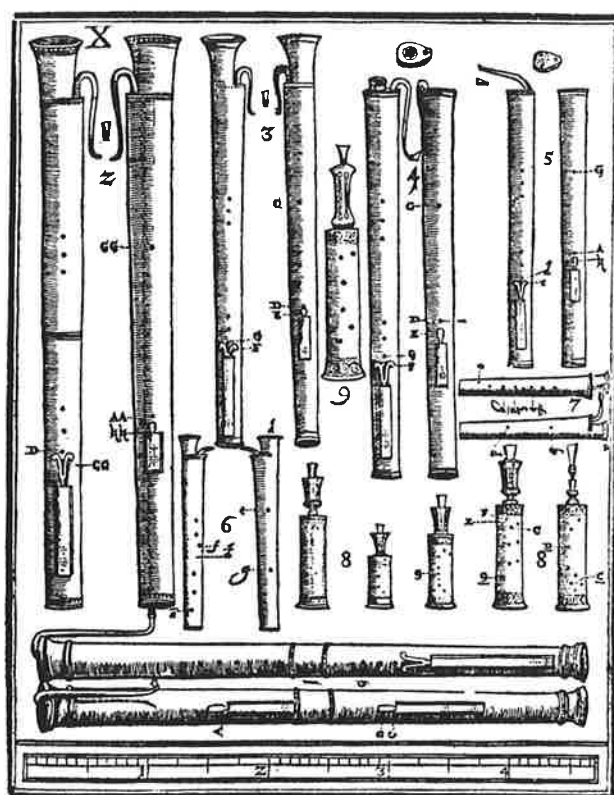
Mittelalter und Renaissance

Die ältesten uns überlieferten, europäischen Rohrblattinstrumente waren die Schalmeien. Zu Beginn stand der Begriff Schalmei nicht für ein bestimmtes Instrument, sondern für eine ganze Instrumentenfamilie. Charakteristisch für diese Schalmeien war eine enge Mensur, sechs bis sieben Grifflöcher und ein einfaches oder doppeltes, weiches Rohrblatt, welches mit einem Windkapselansatz geblasen wurde. Abbildungen 4 und 5 zeigen solche frühen Instrumente.

Mit der Zeit entstand eine Vielzahl von Doppelrohrblattinstrumenten. Sie werden in dem umfassenden zweiten Band des Syntagma musicum 'De Organographia' von Michael Praetorius (um 1571-1621) beschrieben. Schalmei bezeichnet in dieser Zusammenstellung nur noch ein bestimmtes Instrument. In Abbildung 6 geht hervor, daß die tieferen Schalmei-Instrumente Pommern (Bombhart) genannt wurden.



1. Bass Pommer 2. Bass oder Tenor Pommer. 3. Alt Pommer.
4. Discant Schalmei. 5. Klein Schalmei. 6. Großer Fock.
7. Schaper Pfeiff. 8. Hämmlchen. 9. Dud. 9.



1. Sorduca-Bas auff beyden Seiten GG. 2. Doppel-Fagott bis ins GG. 3. Offen Chorist-Fagott C. 4. Gedact Chorist-Fagott C. 5. Cingel Klotzsch. dancette Tenorjus. Chorist-Fagott. 6. Alt. b. 7. Discant oder Exilant zum Chorist-Fagott. 8. Schmalwand Haachen. 9. Großer Fock so eff als der groe Bass-Bombard, C.C. Diff 16" Fuß oben. NB. Zahlen 1. 2. 3. 4. 5. stehen die Buchstaben des Clavis bey m. 2. oder bey te jug macht wird zu 6. 7. 8. 9. über beyden Buchstaben des Clavis, so das Klotzsch wird.

Abb. 6 u. 7: Tafeln aus Michael Praetorius 'De Organographia'.

Eine Pommer oder Bombhart hat sechs bis sieben Grifflöcher und sogar schon eine bis vier Klappen, die von einer Schutzkapsel (Fontanelle) umgeben werden. Seine Röhre verläuft konisch. Die Instrumentenfamilie der Bombharten wurde bis zum Anfang des 17. Jahrhunderts von der Altbombhart bis zum Großbaß erweitert. Dieses letztere Instrument hatte eine Länge von 2,75 m und war deshalb sehr unhandlich. Es mußte also eine Möglichkeit gefunden werden, die lange Röhre beizubehalten, das Instrument aber zugleich handlicher zu machen. So entstanden die Instrumente mit einer geknickten Röhre.

Ein Beispiel für ein solches Instrument und ein möglicher Vorfahre des Fagotts stellt das Sor-dun dar. Es aber hat im Gegensatz zu den Pommern und den heutigen Fagotten eine zylindri-sche Bohrung, wodurch die Töne im Vergleich zu gleicher Baulänge und der Verwendung ei-ner konischen Röhre eine Oktave tiefer klingen.

Ein anderes Instrument mit einer U-förmigen Röhre sieht man in Abbildung 7. Praetorius nennt sie Dulciane oder Fagotte. Der Korpus besteht aus einem einzigen Stück Holz. In ihn sind acht bis zehn Grifflöcher gebohrt. Auch gibt es schon zwei Klappen für das F und das E. Die Boh-rung verläuft konisch. Neben diesen Doppelrohrblattinstrumenten beschreibt Praetorius noch weitere, nämlich Racketten, Krummhörner, Corna-Musa, Bassanelli, Schryari und Sackpfeifen.

Die instrumentale Musik beschränkte sich im Mittelalter und der Renaissance hauptsächlich auf den weltlichen Bereich und wurde von der vokalen Musik, die insbesondere im kirchlichen Be-reich praktiziert wurde, stark dominiert. Die Instrumente hatten daher sehr oft nur Begleit-funktion.

Spieler von Instrumenten wurden im Mittelalter und der Renaissance zumeist Pfeiffer genannt, früher Jocator, was soviel wie Gaukler bedeutet. Sie beherrschten meist viele Instrumente gleichzeitig. Nach dem 'Livre Mestiers' aus dem Brügge des 15. Jahrhunderts beherrschte so ein 'gokelare' Gitarre, Harfe, Psalter, Orgel, Rebec, Horn, Drehleier, Schalmei, Bomhart, Cor-namuse, Flöte, Dulziana und Pauke. Die Pfeiffer waren aber nicht besonders angesehen. Höhe-res Ansehen hatten zum Beispiel die Trompeter und Heerespauker, die weltliche Macht sym-bolisierten. Höchstleistungen auf einem Instrument wurden im Mittelalter und der Renaissance kaum zustande gebracht, weil diese eine Spezialisierung auf ein einzelnes Instrument vorausge-setzt hätten.

Die Instrumentenbauer besaßen ebenso kein großes Ansehen. Die Blasinstrumente wurden vielfach von Stuhlbeindrehern hergestellt und es dachte niemand daran, daß ein solches Musik-instrument eigentlich ein Kunstwerk darstellen könnte. Die Instrumente waren schlicht gefe-rtigt. Nur selten wurden an ihnen Verzierungen angebracht.

Die vielen Abbildungen weltlicher Musiker aus der Renaissance, wie zum Beispiel Abbildung 8, zeigen, wie vielfältig das Leben des mittelalterlichen Menschen von Musik umgeben und erfüllt war. Dies beschreibt auch das folgende Zitat aus einem Buch von Salmen. *'Lange Reisen und Wanderungen, Schlachten, festliches Essen, ja selbst Baden oder Kirchgang adliger Her-ren wurden mit Vorliebe bei begleiteter Musik vollzogen. Der fahrende Musiker, der diese zu bieten hatte, stand voll in der Wirklichkeit seiner Zeit, war er in der Kindbettstube ebenso zu Gast wie während der Hochzeit oder am Sterbebett, bei Staatsaktionen anwesend oder bei der Arbeit des Bauern und in der Werkstatt des Handwerkers zu finden.'* (Salmen 1960)

Im Übergang von der Renaissance zum Barock begannen die Menschen, sich stärker mit dem zu identifizieren, was sie geschaffen hatten. So kam es, daß Komponisten ihren Namen auf die Kompositionen schrieben und Instrumentenbauer ihre Instrumente mit ihrem Namen versahen. Außerdem wurde die Bewertung der Zuschauer wichtiger. Daher begannen sich auch die Mu-siker zu spezialisieren, um besser zu werden.



Abb. 8: Holzschnitt von Hans Bruckmair, 1516: Wagen aus dem Triumphzug Kaiser Maximilians I. mit Bläsern (Posaune, Pommern und Krummhörner).

Barock

Die im Mittelalter und der Renaissance bestehende Vielfalt der Musikinstrumente erweiterte sich in der Barockzeit nicht weiter. Es setzte vielmehr umgekehrt ein Ausleseprozeß ein. Die Folge war, daß viele Doppelrohrblattinstrumente nicht mehr gebaut wurden. Davon waren hauptsächlich die Instrumente betroffen, die auf Grund ihrer Anblastechnik geringere Möglichkeiten zur Modulierung der Tonqualität aufwiesen.

Das einteilige Dulcian wurde nun schrittweise zum drei- und dann vierteiligen Fagott umgewandelt. Erst erfolgte eine Zweiteilung des Instruments, bei der Flügel und Baßröhre noch ein Stück blieben. Später wurde der Flügel von der Baßröhre getrennt. Die erhaltene Dreiteilung in Flügel, Stiefel und Baßröhre wurde beibehalten, bis der Tonraum des Instruments zu tieferen Tönen hin erweitert wurde. Durch diese Erweiterung des Tonraumes bis zum Kontra-B wurde die Baßröhre so lang, daß sie geteilt werden mußte. Das Fagott erhielt so seine heutige Form. Der Grund für diese Teilung liegt außerdem auch darin, daß in kürzeren Holzstücken die Bohrungen präziser gesetzt werden konnten.

Die Dreiteilung des Fagotts schreibt man Jean Haultetere zu, einem Drechselmeister und Instrumentenbauer aus Paris. Von ihm sind jedoch keine Instrumente mehr erhalten. Abbildung 9 zeigt ein Fagott des Nürnberger Instrumentenbauers Johann Christoph Denner (1655-1707).

Wie in der Abbildung ersichtlich, wurden zusätzlich Klappen für das große D, C und gis hinzugefügt. Die gis-Klappe legte die Haltung: rechte Hand unten und linke Hand oben fest. Vorher war auch ein Spielen in umgekehrten Haltung des Fagotts möglich.

Die Weiterentwicklung des Fagotts bis heute

Durch das Anwachsen der Fagottliteratur und den Einsatz des Fagotts als Soloinstrument stiegen die technische und klanglichen Anforderungen für den Musiker. Dennoch vollzog sich die Weiterentwicklung nur langsam. Bisher hatten die Musiker die Halbtöne durch Gabelgriffe und durch Abdecken tieferer Tonlöcher erreicht. Nun stellten sie fest, daß die Töne, die man durch Löcher mit Klappen erreichte, viel klarer klangen. Sie waren mit den anderen Tönen plötzlich auch nicht mehr zufrieden. Es wurden deshalb erste akustische Untersuchungen auf wissenschaftlicher Basis unternommen. Ernst Florens Friedrich Cladni (1759-1827) schrieb in seinem Buch 'Die Akustik' unter anderem über die Akustik in offenen und gedackten (auf einer Seite abgeschlossenen) Röhren und über die akustisch richtige Lage von Tonlöchern.

Etwa 1730 wurde am Fagott die As-Klappe montiert und vor 1800 kamen noch die Klappe für Es und die erste Schleifklappe dazu. Wenig später wurden noch zwei weitere hinzugefügt. Die Fagotte um 1820 hatten also schon 11 Klappen. Dies ermöglichte immerhin ein Spielen von Tonleitern bis zu vier Vorzeichen.

Der Musiktheoretiker und Akustiker Gottfried Weber übte 1816 in der 'Allgemeinen Musikalischen Zeitung' Kritik an der Unzulänglichkeit zeitgenössischer Fagotte und gab Vorschläge zur Verbesserung. Durch dies wurde der Fagottvirtuose und Instrumentenbauer Karl Almenräder (1786-1843) angeregt, sich mit dem Problem zu beschäftigen. Er entwickelte ein 14-klappiges Fagott, das ein chromatisches Spiel im kompletten Tonumfang ermöglichte (siehe Abbildung 10). Karl Almenräder gilt als der Schöpfer des Grundtyps des heutigen Fagotts.

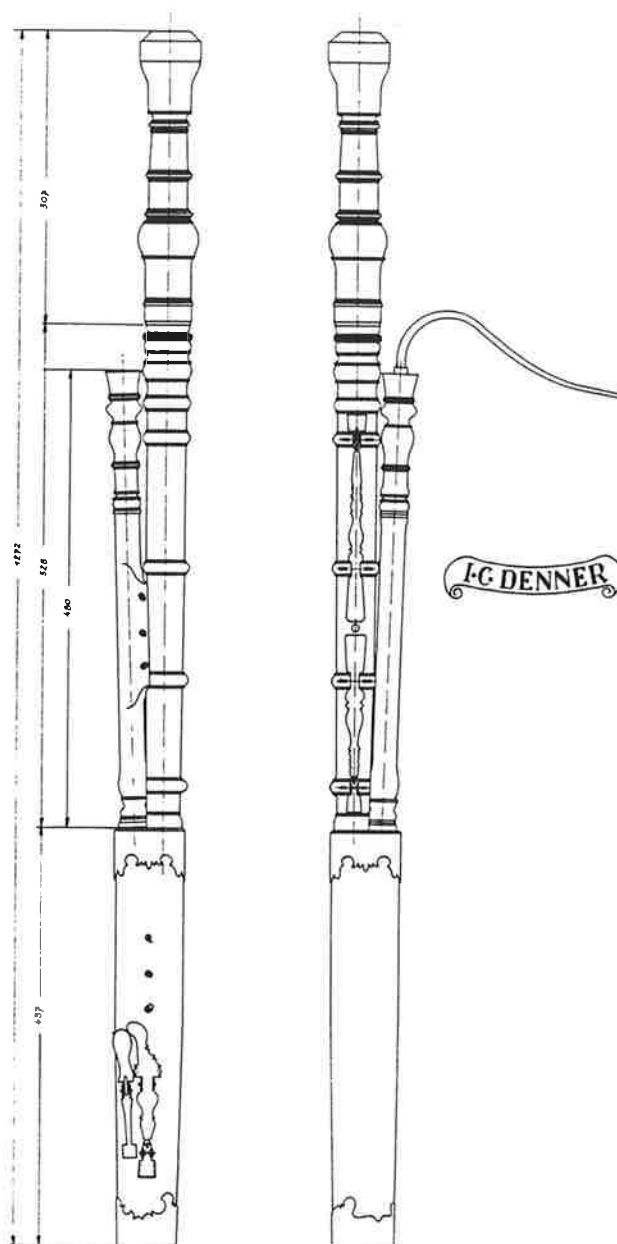


Abb. 9: Ein gedrechseltes Fagott von Johann Christoph Denner, Nürnberg.

1817 übernahm Almenräder die Beaufsichtigung der Blasinstrumentenproduktion des berühmten Musikverlages B. Schott's Söhne, der 1770 gegründet worden war. 1829 trat der damals 17-jährige Johann Adam Heckel (1812-1877) in diese Firma ein. Almenräder erkannte wohl dessen hohe Begabung und gründete am 11. März 1831 mit ihm eine eigene Firma, die sich hauptsächlich mit der Verbesserung des Fagotts befassen sollte. Eine solche Firma zu betreiben, war nicht so leicht, da es zu der Zeit schon einige Hersteller von Fagotten mit ausgezeichnetem Ruf gab, wie die Grenser Werkstatt in Dresden, die Firma Haseneier in Koblenz und die Uhlmann-Werkstatt in Wien. Dennoch gelang es ihnen, bald einen guten Ruf zu erwerben. Die Firma Heckel befindet sich heute in Biebrich bei Wiesbaden, Hessen.

Während in Deutschland Karl Almenräder das Fagott einer gründlichen Umgestaltung unterzog, behielt es in Frankreich im wesentlichen seine alte Form bei und wurde lediglich mit ein paar neuen Klappen versehen. Im Gegensatz zum deutschen Fagott blieb das französische seit Beginn des 19. Jahrhunderts beinahe unverändert.

Nach dem Tode Almenrädere führte Johann Heckel mit seinem Sohn Wilhelm Heckel (1856-1909) die Firma weiter, immer mit dem Ziel, das Fagott zu verbessern. 1889 läßt sich Wilhelm Heckel eine sehr bedeutende Erfindung auf dem Gebiet des Fagotts patentieren: die Kautschukausfütterung des Flügels und des Stiefels. Dies reduzierte die Anfälligkeit des Faulens des Holzes erheblich. Bis Ende des 19. Jahrhunderts wurden von der Firma Heckel ca. 4000 Fagotte gefertigt, von 1900 bis 1975 weitere 8000.

In der neueren Zeit sind keine wesentlichen Änderungen am Heckel-Fagott mehr vorgenommen worden. Ein Heckel-Fagott vom Anfang unseres Jahrhunderts unterscheidet sich kaum von einem heutigen. Die Klappenarbeit ist heute die gleiche wie die vor 80 Jahren. Der von Heckel entwickelte Fagott-Typ wird heute weltweit eingesetzt. Der französische Typ wird nur noch in Frankreich und in Teilen von Kanada und Südafrika gespielt.

Das Fagott in der Musik

Das Fagott in der Kammermusik und im Orchester

Die früheste ausdrückliche Verwendung des Fagotts mit anderen Instrumenten findet sich in Kompositionen von Giovanni Gabrieli (1557-1612). Auch sein Schüler Heinrich Schütz machte

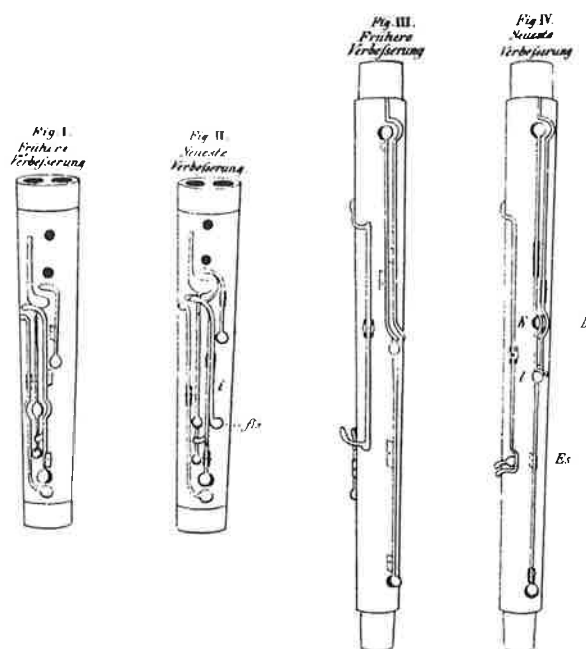


Abb. 10: Verbesserungen am Fagott von Almenräder in den Jahren 1825-1828

reichlich Gebrauch von dem Instrument. In seinem 24. Psalm (1619) verlangt er '2 violini, 2 cornetti, 4 tromboni e 5 fagotti'.

Nach der Gründung des Opernhauses in Venedig finden sich Hinweise auf die Verwendung des Fagotts im Opernorchester, auch wenn es noch nicht zum festen Bestand des Orchesters gehört hat. Wichtige Aufgaben erhielt das Fagott erst in den französischen Opern. Jean-Baptiste Lully (1632-1687) stellte den Streichern ein Bläsertrio von zwei Oboen oder Flöten und einem Fagott gegenüber.

Im 18. Jahrhundert, in der Übergangszeit vom Barock zur Vorklassik, bildete sich ein Orchestertypus, der die Grundlage für das klassische und später romantische Orchester darstellte. In den Partituren für dieses Orchester wurde das Fagott nicht eigens erwähnt. Es wurde aber als Verstärkung und Unterstützung der tiefen Streicher eingesetzt.

Der wirkliche Einzug des Fagotts in die Orchester fand erst in der Wiener Klassik statt. Zusammen mit den Flöten wurde es in den festen Bestand des klassischen Orchesters aufgenommen. Seit diesem Zeitpunkt ist das Fagott im Orchester vertreten. In der Klassik wurden im Orchester meistens zwei Fagotte eingesetzt, selten nur eines. Abbildung 11 zeigt ein Notenbeispiel aus der Zeit gegen Ende der Wiener Klassik: nämlich aus dem 4. Satz der 9. Symphonie von Ludwig van Beethoven (1770-1827).

The image displays a musical score for the 4th movement of Ludwig van Beethoven's 9th Symphony. The score is arranged in a system with ten staves. On the left, the instruments are listed: Kleine Flöte, Oboe I, II, Klarinette in B I, II, Fagott I, II, Kontrafagott, Horn in B basso III, IV, Trompete in B II, Triangel, Becken, and Große Trommel. The music is in a key signature of two flats (B-flat major or D-flat minor) and a common time signature. The score shows various dynamics, including *pp* (pianissimo) and *pp sempre*. The bottom of the score includes measure numbers 310 and 315.

Abb. 11: Notenbeispiel aus dem 4. Satz der 9. Symphonie von Ludwig van Beethoven.

Auch in einem modernen klassischen Symphonieorchester besteht die Besetzung des Fagottregisters aus zwei Fagotten. Dem zweiten Fagottisten kommt dabei gelegentlich die Aufgabe zu, ein Kontrafagott zu spielen. In einem großen Symphonieorchester ist das Register durch drei Fagotte und einem Kontrafagott vertreten.

Das Fagott als Soloinstrument

In der frühen Kammermusik von 1600-1650 ist das Fagott nicht nur begleitendes Baßinstrument für den Basso continuo. Es wurde auch mit solistischen Aufgaben betraut. Die frühesten erhaltenen Solostücke stammen von Biagio Martini (1626), Dario Castello (1621), Fray Bartolomé de Selma y Salverde (1638). Die Sonaten von Giovanni Antonio Bertoli sind wohl noch für das Dulzian geschrieben, da nur der Tonraum vom großen C bis zum eingestrichenen c verwendet wird. Sie sind voll von Läufen und Akkordzerlegungen und können auch auf einem modernen Instrument nicht einfach, ohne sie wirklich geübt zu haben, gespielt werden. Den früheren Musikern ist also allerhand abverlangt worden, da solche Partien auf einem früheren Instrument sicherlich noch um einiges schwerer als auf einem heutigen zu meistern waren.

Im 18. Jahrhundert schrieb Joseph Bodin de Boismotier (1691-1765) anspruchsvolle Fagottpartien und in seinem Fagottkonzert schreckte er auch nicht vor großen Tonhöhen zurück. Antonio Vivaldi (1678-1741) schrieb allein 38 Solokonzerte für seinen Fagottisten Gioseppino Biancardi. Deutsche Komponisten, die sich zu dieser Zeit des Fagottes annahmen, waren zum Beispiel Johann Christoph Graupner (1683-1760), Johann Gottlieb (1703-1771) und Johann Friedrich Fasch (1688-1758). Bedeutende Konzerte für Fagott und Orchester aus der Übergangszeit vom Barock zur Klassik sind das Fagottkonzert in B-dur von Johann Christian Bach (1735-1782) und das Konzert von Johann Wilhelm Hertel (1727-1789).

Ein sehr oft gespieltes und bekanntes Solokonzert stammt von Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791). Es soll noch drei weitere Fagottkonzerte von ihm gegeben haben. Sie sind allerdings verschollen. Das Konzert von Carl Maria von Weber (1786-1826) zählt zu den meistgespielten Solowerken. Darüberhinaus komponierte von Weber noch ein Andante und Rondo Ungarese in c-moll für Fagott Solo. Johann Wenzeslaus Kalliwoda (1801-1866) bereicherte die Sololiteratur mit Variationen und Rondo für Fagott und Orchester. Auch Richard Strauss (1864-1949) schrieb in seinem letzten Lebensjahr ein Solowerk für ein Fagott.

Die Sololiteratur für das Fagott ist nicht so ausgedehnt, wie zum Beispiel die für Violine oder Oboe. Heute ist das Fagott aber mit seinem charakteristischen Klang sowohl als Soloinstrument wie auch als Konzertinstrument anerkannt. Es ist also in der Bewertung und auch im Einsatz des Fagotts gegenüber der Zeit vor wenigen Jahrzehnten ein deutlicher Wandel eingetreten.

Akustische Grundlagen von Ton und Klang

Das Entstehen des charakteristischen Klangs der Musikinstrumente, an dem wir uns gerne erfreuen, setzt das richtige Zusammenspiel zwischen den akustischen Gesetzmäßigkeiten, den spezifischen Bauformen und Materialien der Instrumente und den besonderen Fertigkeiten und Fähigkeiten der Musiker voraus. Der folgenden Abschnitt dieser Arbeit hat vor allem zum Ziel, das Klangverhalten meines eigenen Fagotts beschreiben. In der Einleitung dazu werden wichtige akustische Grundlagen von Ton und Klang sowie die Erzeugung der Töne in Rohrblattnstrumenten erläutert. Daran anschließend beschreibe ich dann die Tonaufnahme mit meinem Fagott und ihre akustische Analyse.

Als Literatur für diesen Abschnitt verwendete ich hauptsächlich die Beschreibungen von John R. Pierce in seinem Buch: 'Klang mit den Ohren der Physik' (Pierce 1989), die Ausführungen von Juan G. Roederer in seinem Buch: 'The Physics of Music' (Roederer 1995), den Sammelband: 'Die Physik der Musikinstrumente' aus der Reihe Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung (1992) und zwei Kapitel über das Hören aus dem Buch von E. Bruce Goldstein: Wahrnehmungspsychologie (Goldstein 1997).

Merkmale von Schallsignalen. Die Wahrnehmung von Schall und Schallereignissen gehört zu unserem täglichen Leben. Der Schall breitet sich als Vorgang schnell aufeinander folgender einzelner Druckstöße in der Luft aus. Die Ausbreitung der Druckschwankungen kann anhand

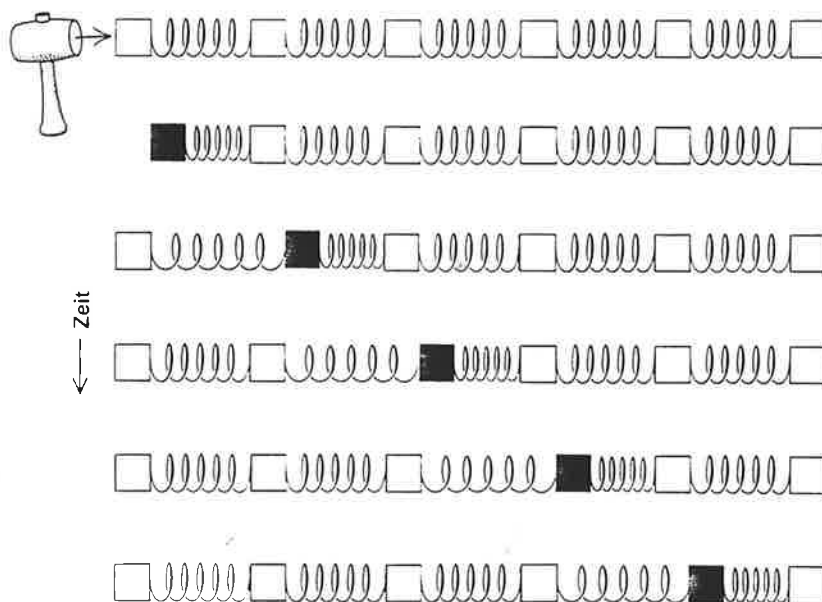


Abb. 12: Modell zur Schallausbreitung in Luft mit Klötzchen und Federn.

eines einfachen Modells beschrieben werden, bestehend aus einer Kette aus kleinen Klötzchen, die durch Federn miteinander verbunden sind. Wenn das erste Klötzchen einen Stoß bekommt, wie in Abbildung 12, wird sich diese 'Störung' über die gesamte Kette fortsetzen - wie eine Welle. Schallwellen können sich natürlich in alle Raumrichtungen ausbreiten und nicht nur in eine einzige Richtung, wie in diesem Modell. Aber Klötzchen und Federn veranschaulichen

zwei entscheidende Eigenschaften der Luft auf denen die Schallausbreitung beruht: Masse und Elastizität.

Die Klötzchen bewegen sich entlang der Fortpflanzungsrichtung. Die Auslenkung erfolgt also in Fortpflanzungsrichtung. Daher nennt man solche Wellen Longitudinalwellen. Im Gegensatz zu jenen stehen die Transversalwellen, wie sie zum Beispiel bei Wellen im Wasser zu sehen sind; bei ihnen erfolgt die Auslenkung quer zur Fortpflanzungsrichtung.

Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Verdichtung oder ein Wellenberg fortpflanzt, wird als Ausbreitungsgeschwindigkeit oder Schallgeschwindigkeit c bezeichnet. Sie ist temperaturabhängig und beträgt bei Raumtemperatur etwa 340 m/s.

Ein gleichbleibender Ton besteht also aus Druckschwankungen, die in gleichen Abständen folgen. Einem Ton liegt also eine sich in einem gewissen Zeitraum wiederholende Welle, eine periodische Welle, zugrunde.

Die einfachste periodische Welle und somit der einfachste Ton ist die Sinuswelle oder der Sinuston, der einer sinusförmigen Luftdruckschwankung entspricht. Eine Sinuswelle läßt sich anhand dreier Eigenschaften vollständig beschreiben: Amplitude, Periode und Phase.

Die Amplitude ist die größte Auslenkung vom Mittelwert oder Nullage der Schwankung. Sie

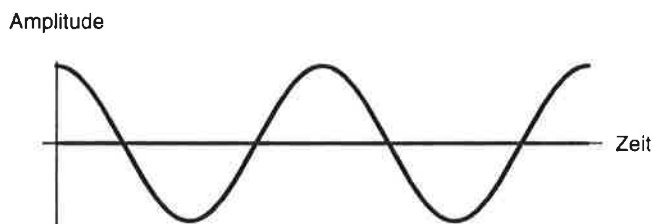


Abb. 13: Sinuswelle.

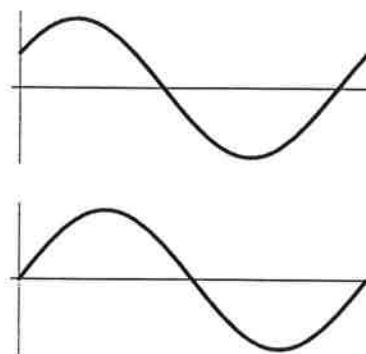


Abb. 14: Zwei phasenverschobene Sinuswellen.

ist in der Abbildung 13 auf der Ordinate abgetragen. In diesem Fall beschreibt sie die Abweichung vom durchschnittlichen Luftdruck. Eine positive Auslenkung bedeutet eine Druckzunahme, eine negative Auslenkung eine Druckabnahme.

Die Periode T entspricht der Zeit, in der nach einer vollen Schwingung wieder die maximale Auslenkung erreicht wird. Sie wird in Sekunden angegeben. Der Abstand zwischen zwei maximalen positiven Auslenkungen wird als Wellenlänge λ bezeichnet. Aus dem Kehrwert der Periode erhält man die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die sogenannte Frequenz f . Die Frequenz wird in Perioden pro Sekunde oder in der Einheit Hertz (Hz) angegeben, die nach dem Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) benannt ist.

Die Phase beschreibt den Zeitpunkt einer Auslenkung oder der Nullage gegenüber einem Referenzzeitpunkt. Zwei Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Periode haben, wenn sie - wie in Abbildung 14 dargestellt - auftreten, zwei verschiedene Phasen. Die Zeitdifferenz zwischen

ihnen wird als Gangunterschied oder Phasendifferenz bezeichnet. (Die Phase spielt bei einem einzigen Sinuston keine Rolle, sie kommt erst bei einer Überlagerung von zwei oder mehr Wellen mit ins Spiel.)

Die Amplitude der Schallwelle bewirkt die wahrgenommene Intensität des Tones, also seine Lautstärke.

Die Frequenz ist die Basis für die wahrgenommene Tonhöhe. Je größer die Frequenz, also je mehr Schwingungen pro Sekunde, desto höher ist der Ton. Der Mensch kann Frequenzen von etwa 20 Schwingungen bis zu maximal 20.000 Schwingungen pro Sekunde wahrnehmen, abhängig von Person und Alter.

Eine wesentliche Eigenschaft der Wellen ist, daß sich die Amplituden zweier oder mehrerer Wellen addieren, wenn sie sich überlagern. Dabei entsteht eine neue Wellenform. (Siehe dazu auch Abbildung 15.) Wenn zwei gleichartige Wellen eine entgegengesetzte Ausbreitungsrichtung haben und sich überlagern, entsteht eine sogenannte stehende Welle. Das Bild dieser resultierenden Welle scheint räumlich still zu stehen. Es entstehen Orte, an denen die Amplitude dauernd verschwindet, die sogenannten 'Schwingungsknoten'. Dazwischen liegen die 'Schwingungsbäuche', Orte mit der größten Amplitude. Die Bildung einer stehenden Welle kann zum Beispiel beobachtet werden, wenn eine zwischen zwei Punkten aufgespannte Schnur angezupft wird. In der Mitte entsteht ein Schwingungsbauch und an den beiden Befestigungspunkten befinden sich die Schwingungsknoten. Die entstandene Welle bewegt sich nicht in eine Richtung fort - sie 'steht'.

Töne in der Musik. Um einen allgemein akzeptierten Bezugspunkt für die Tonhöhe in der Musik, also die Töne, zu gewinnen, wurde der Ton a^1 als Referenzpunkt ausgewählt. Die Frequenz dieses Tones, des sogenannten Kammertones, wurde 1885 auf 435 Hz und 1930 auf 440 Hz festgesetzt. Diese letztere Normierung ist bis heute gültig. Die Frequenz der anderen Töne kann mit Bezug auf die Frequenz des Kammertones errechnet werden. Eine Verdoppelung der Frequenz bedeutet einen Tonanstieg um eine Oktave. Töne, die eine Oktave auseinander liegen, werden als sehr ähnlich empfunden. Oktavenabstände sind also so etwas, wie natürliche Intervallbereiche in der Musik.

Die heutzutage verwendete temporäre Stimmung unterteilt eine Oktave weiters in zwölf gleiche Halbtonschritte. Um die Frequenz eines um einen Halbton höher liegenden Ton zu erhalten, muß die Frequenz des Tones mit der zwölften Wurzel aus zwei ($\sqrt[12]{2}$) multipliziert werden. Der Faktor für die Erhöhung um einen Ganzton beträgt diesen Faktor zum Quadrat genommen.

Akustische Analyse des Klangs. Reine Sinustöne sind für die Musik eher uninteressant. Sie klingen für uns fremd und unnatürlich. Töne, wie sie von Musikinstrumenten erzeugt werden, bestehen immer aus viel komplexeren periodischen Wellen. Der Ton a^2 , gespielt auf einer Querflöte, und der gleiche Ton, gespielt auf der Oboe, ist trotz gleicher Tonhöhe und Lautstärke verschieden. Der Ton der Querflöte kann eher als hell und der der Oboe eher als näselsnd beschrieben werden. Töne können auch flach oder voll klingen. Dieses Wahrnehmungsmerkmal der unterschiedlichen Toncharakteristik wird als Klangfarbe eines Tones bezeichnet. Sie hängt mit der Komplexität des jeweiligen Schalls zusammen.

Für die akustische Analyse und Beschreibung der Klangfarbe der Töne ist eine Entdeckung des Mathematikers Francois Marie Charles Fourier (1772-1837) wichtig: das nach ihm benannte Fourier-Theorem (Barkowsky 1996). Er fand heraus, daß sich jede komplexe periodische Welle als Summe von reinen Sinuswellen beschreiben läßt. Darüberhinaus stellte er fest, daß dabei die Frequenzen der einzelnen Sinuskomponenten in einem bestimmten Verhältnis stehen. Sie sind ganzzahlige Vielfache jener Frequenz der Schwingung, deren Frequenz in der Regel der wahrgenommenen Tonhöhe entspricht. Diese wird als Grundton bezeichnet, sie hat die niedrigste Frequenz der vorkommenden Sinuskomponenten. Die Frequenzen, die in einer komplexen periodischen Welle enthalten sind, umfassen also die Grundfrequenz f_0 und die ganzzahligen Vielfachen: $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, und so fort. Je komplizierter eine Wellenform ist, desto mehr Sinuskomponenten sind in ihr enthalten.

Die Bestimmung der Sinuskomponenten einer komplexen Welle wird als Fourier-Analyse bezeichnet. Der umgekehrte Weg, also die Erzeugung der Wellenform aus den einzelnen Sinuskomponenten, heißt Fourier-Synthese.

In der Musik bezeichnet man die ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz als Obertöne, wobei $2f_0$ dem ersten Oberton entspricht. Es sind auch noch zwei weitere Bezeichnungen üblich: Harmonische oder Partialtöne. Der erste Harmonische oder der erste Partialton entsprechen der Grundfrequenz f_0 . Der erste Oberton ist dann die zweite Harmonische oder der zweite Partialton.

Der Grundton ist vor allem für die Tonhöhe verantwortlich. Die Obertöne bestimmen die Klangfarbe oder den Klang des Tones. Wenn die hochfrequenten Obertöne intensiv sind, klingt der Ton eher hell, im umgekehrten Fall, also bei starken niederfrequenten Obertönen, dunkel. Die Struktur der Obertöne ist es also, die einem Instrument seinen charakteristischen Klang gibt.

Mit Hilfe von Frequenzspektren und Spektrogrammen kann man die Struktur der Obertöne eines Instruments analysieren und sichtbar machen. Für die im nächsten Abschnitt beschriebene Analyse der Obertöne meines Fagotts verwendete ich diese beiden Darstellungsformen. Sie sollen nun an einem Beispiel eines synthetisch hergestellten Tones erläutert werden. Es wurde ein Ton der Frequenz 300 Hz zusammen mit seinen ersten drei Obertönen: 600, 900 und 1200 Hz erzeugt. Alle Teiltöne hatten die gleiche Intensität. Abbildung 15 zeigt die Entstehung der komplexen Wellenform aus der Überlagerung des Grundtones und der Obertöne. Auf der Abszisse ist die Zeit und auf der Ordinate die Amplitude der Welle abgetragen.

Das Frequenzspektrum der Fourier-Analyse der komplexen Wellenform von Abbildung 15 ist in Abbildung 16 a zu sehen. Die komplexe Wellenform von Abbildung 15 wird also mit Hilfe der Frequenzanalyse wieder in ihre vier Komponenten aufgeschlüsselt. In der Abbildung 16 a ist das Ergebnis als Frequenzspektrum dargestellt. Auf der Abszisse ist die Frequenz und auf der Ordinate die relative Amplitude der einzelnen Komponenten abgetragen. Aus der Abbildung ist gut ersichtlich, daß dieser Ton aus vier Frequenzkomponenten mit gleicher Amplitude besteht, nämlich aus dem Grundton mit 300 Hz und den drei Obertönen mit 600, 900 und 1200 Hz. Es können also aus den Funktionsmaxima des Frequenzspektrums die Sinuskomponenten einer komplexen Schwingung abgelesen werden.

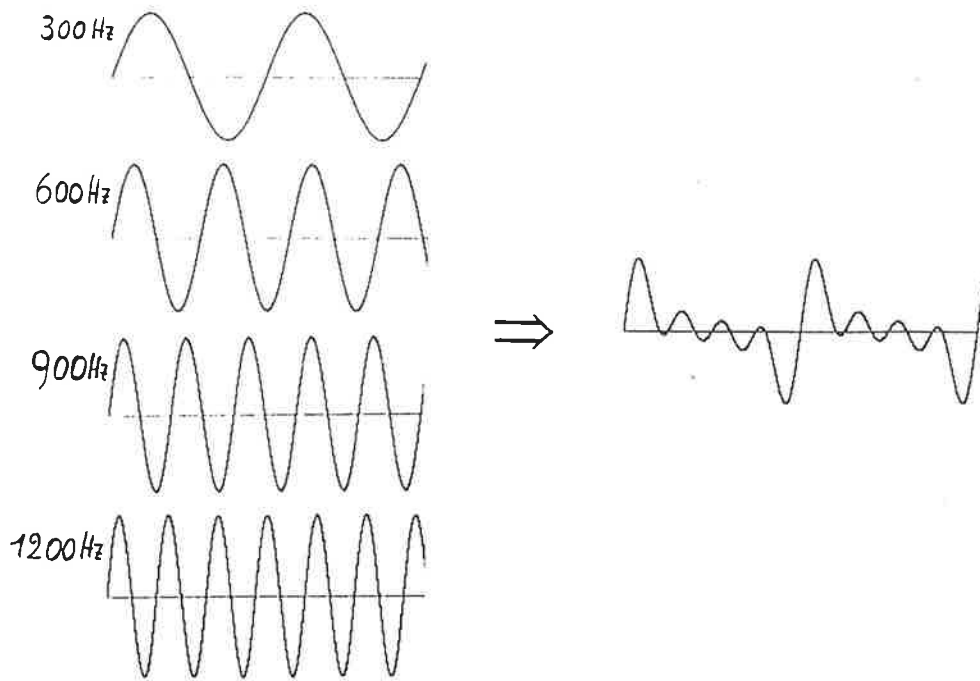


Abb. 15: Signalverlauf des Grundtons mit 300 Hz und der Obertöne mit 600, 900, 1200 Hz sowie deren Überlagerung.

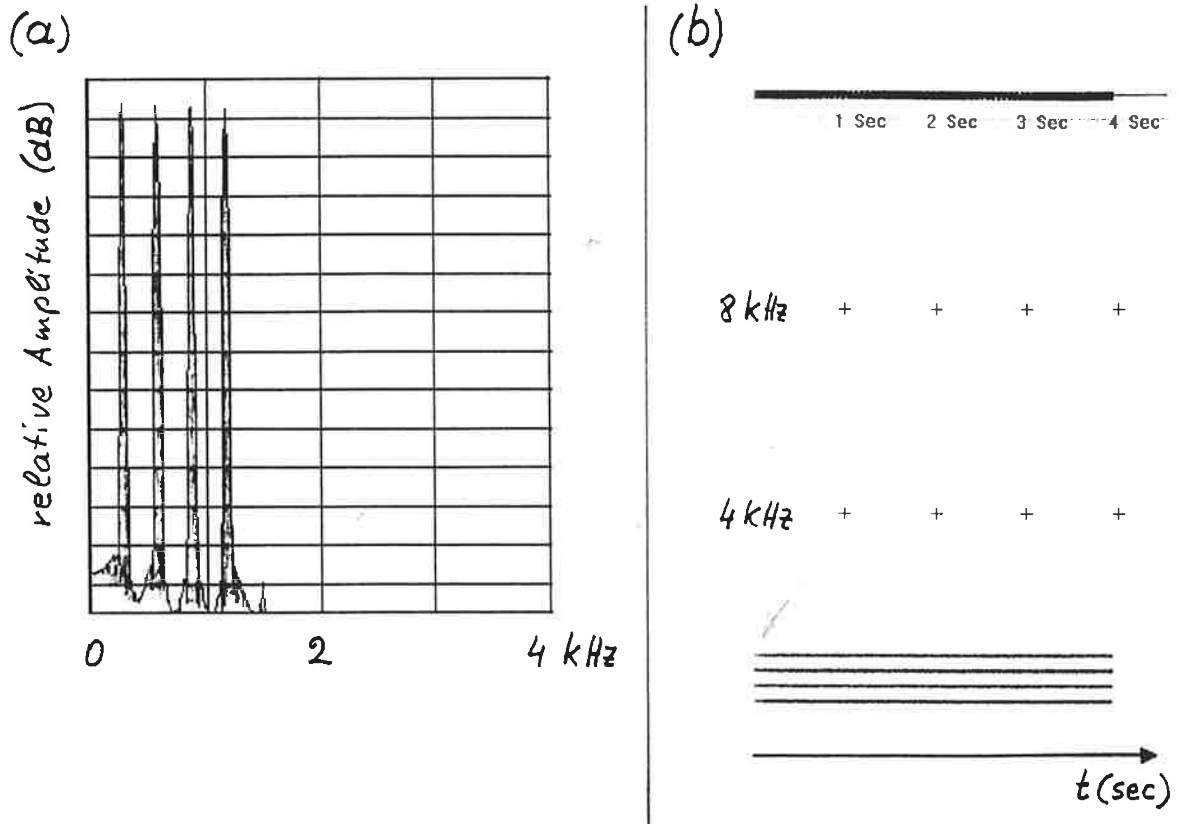


Abb. 16 a) Diagramm der Fourier Analyse eines synthetisierten Tones: das Frequenzspektrum;
b) Spektrogramm des gleichen Tones.

Das Spektrogramm stellt die Ergebnisse der Fourier-Analyse in etwas anderer Form dar. Abbildung 16 b zeigt diese Darstellung für das verwendete Beispiel. Auf der Ordinate ist die Frequenz und auf der Abszisse die Zeit abgetragen; die Amplitude der einzelnen Komponenten schlagen sich im Grad der Schwärzung nieder. Je intensiver (dunkler) eine Linie im Spektrum dargestellt ist, desto stärker ist diese Frequenz im Ton vertreten. Die vier Komponenten des Beispieltones sind in der Abbildung als vier Linien im unteren Teil der Graphik sichtbar.

Die Anschaulichkeit der Spektrogramme für Ergebnisse einer Analyse ist im Vergleich zu den Frequenzspektren eher größer, weil die Spektrogramme die Frequenzaufspaltung, die Intensitätsverteilungen und auch den Zeitverlauf einer komplexen Schwingung aufzeigen. (Die seit einiger Zeit in Spezialsoftware verfügbare Darstellungsform von 3D-Frequenzspektren kommt den Spektrogrammen in der Anschaulichkeit sehr nahe und ist zugleich genauer.)

Tonerzeugung in den Rohrblattinstrumenten

Die Erzeugung und Entstehung von Tönen in den Rohrblattinstrumenten ist ein komplizierter Vorgang. An ihm sind die Bewegungen des Rohrblattes, die Ausbildung einer stehenden Welle in der Röhrenform und die Lage der Tonlöcher des Instruments, und natürlich auch das richtige Anblasen der Töne beteiligt.

Das Rohrblatt dient zur Erzeugung periodischer Luftdruckschwankungen. Wenn der Spieler Luft durch das Rohrblatt hindurchbläst, wird das Rohrblatt durch die hindurchströmende Luft zusammengezogen und der Luftstrom unterbrochen. Das Rohrblatt öffnet sich durch seine Elastizität und es kann wieder Luft hindurchströmen, die das Rohrblatt wieder zusammenzieht und so fort. Die hineingeblasene Luft wird so in einzelne Luftstöße verwandelt. Die Grundfrequenz des Tones, der durch das Rohrblatt erzeugt wird, hängt von seiner Elastizität und dem Druck der Luft ab, die hindurchgeblasen wird. Abbildung 17 zeigt die Ansatzstellung beim Spielen des Fagotts und die Lage des Rohrblattes zwischen den Lippen. Die Beherrschung des Blasvorganges, der für die Töne die richtige Luftstromgeschwindigkeit und Luftmenge erzeugt

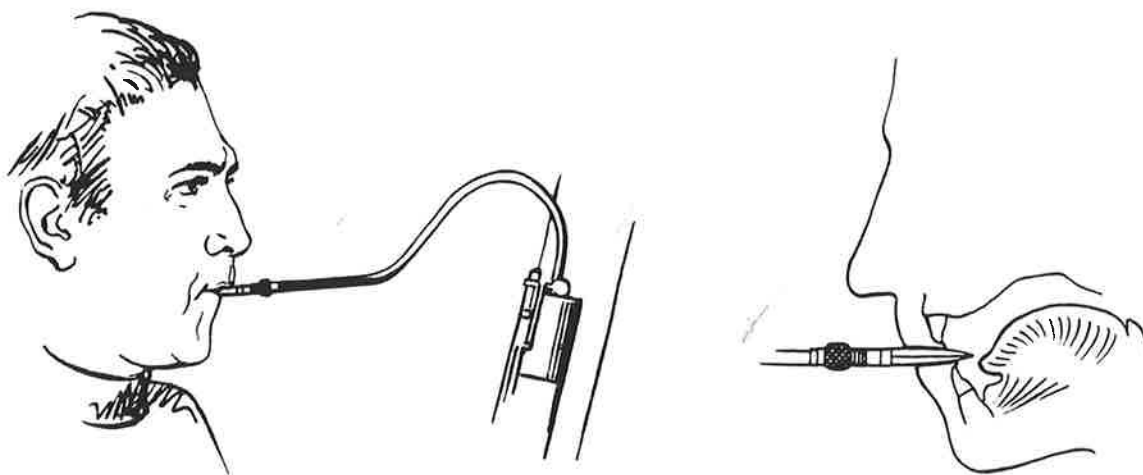


Abb. 17: Ansatzstellung beim Blasvorgang und Lage des Rohrblattes zwischen den Lippen.

gen läßt, erfordert lange Übung. Sie ist eine komplizierte sensumotorische Fertigkeit der aktiven Steuerung der Atemmuskulatur, der richtige Stellung des Mundraumes, der Zunge und der Lippen (Seltmann & Angerhöfer 1987).

Die Entstehung der Schwingung des auf eine Röhre gesteckten Rohrblattes ist beim Anblasen des Instruments einem komplizierten rückgekoppelten Prozeß unterworfen. Der erste durch das Rohrblatt erzeugte Luftstoß wandert als Druckwelle der Röhre entlang, wird am anderen Ende der Röhre reflektiert und wandert wieder zurück. Er verursacht Druckveränderungen, die dann auch wieder die Bewegung des Rohrblattes und der Luftsäule kontrollieren. Durch die Überlagerung der beiden Wellen entsteht im Inneren der Röhre eine stehende Welle. Die genaue Ausbildung dieser Welle hängt von der Röhrenart ab (siehe z. B. Steinkopf 1983). Die wichtigen und dabei zu unterscheidenden Formen der Röhren sind die *zylindrische offene Röhre*, die *zylindrische gedackte Röhre* (an einem Ende geschlossen) und die *konische gedackte Röhre*.

Bevor beschrieben werden kann, wie sich die stehende Wellen in den verschiedenen Röhren ausbilden, müssen die Eigenschaften der 'Knoten' und 'Bäuche' erläutert werden, welche die stehenden Wellen charakterisieren. An einem Schwingungsknoten der stehenden Welle ist die Luftbewegung am geringsten, aber in ihm sind große Druckschwankungen vorhanden. Bei den Schwingungsbäuchen verhält es sich genau andersherum: die Luftbewegung ist sehr groß und die Druckschwankungen äußerst klein. An den Enden einer Röhre, an denen die Luft in der Röhre mit der Außenluft kommuniziert, kann kein Über- oder Unterdruck auftreten. Deshalb liegt an einer solche Stellen immer ein Schwingungsbauch der stehenden Welle, da in einem solchen die Druckschwankung am geringsten ist.

Die **offene zylindrische Röhre** verhält sich an den Enden wie oben beschrieben. An ihnen entstehen Schwingungsbäuche und zwischen den beiden Bäuchen entstehen Schwingungskno-

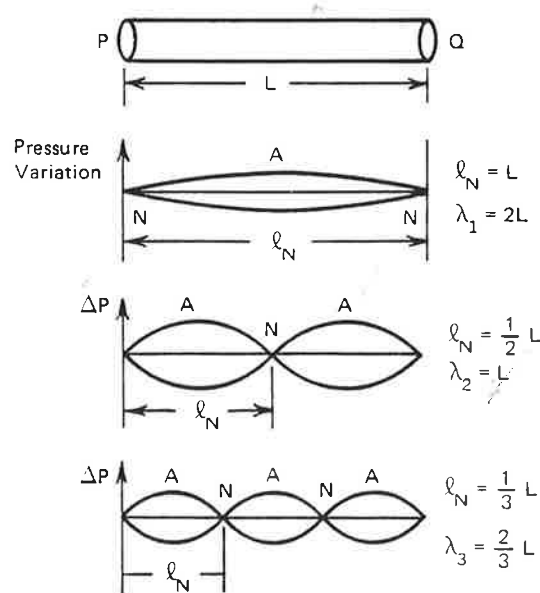


Abb. 18: Stehende Wellen in einer zylindrischen offenen Röhre.

ten. In Abbildung 18 ist gut zu sehen, daß der Abstand der beiden offenen Enden, also die Länge der Röhre, gleich der halben Wellenlänge der stehenden Welle ist. Es kann so der tiefstmögliche Ton, der in einer solchen Röhre entstehen kann, leicht berechnet werden. In der Abbildung ist außerdem ersichtlich, daß alle stehenden Wellen, die in dieser Röhre entstehen können ein Vielfaches der halben Wellenlänge sein müssen. Da bei einer kleineren Wellenlänge die Frequenz automatisch zunimmt, sind auch alle Frequenzen der stehenden Welle, die in der Röhre entstehen können, ein Vielfaches der Grundfrequenz. Ein Instrument mit einer offenen zylindrischen Röhre ist zum Beispiel die Querflöte.

Bei der **gedackten zylindrischen Röhre** bildet sich die stehende Welle etwas anders aus. Am offenen Ende der Röhre entsteht wieder ein Schwingungsbauch, aber auf der anderen Seite läßt das geschlossene Ende keine größeren Luftbewegungen zu. Sehr wohl aber können an dieser Stelle größere Druckschwankungen stattfinden. An der geschlossenen Seite bildet sich so ein Schwingungsknoten. In Abbildung 19 ist zu sehen, daß die Wellenlänge der Grundfrequenz jetzt nur noch ein Viertel der Wellenlänge beträgt. Eine gedackte Röhre mit der gleichen Länge einer offenen zylindrischen Röhre wird also einen um eine Oktave tieferen Ton erzeugen, da die Wellenlänge die Hälfte der in der offenen Röhre entspricht. Außerdem sind alle stehenden Wellen in dieser Röhre ein ungerades Vielfaches des Viertels der Wellenlänge, da sich kein Schwingungsbauch an dem geschlossenen Ende bilden kann. Ein Beispiel für ein Rohrblattinstrument mit einer gedackten Röhre ist die Klarinette. Das Mundstück der Klarinette wird wie ein geschlossenes Ende behandelt.

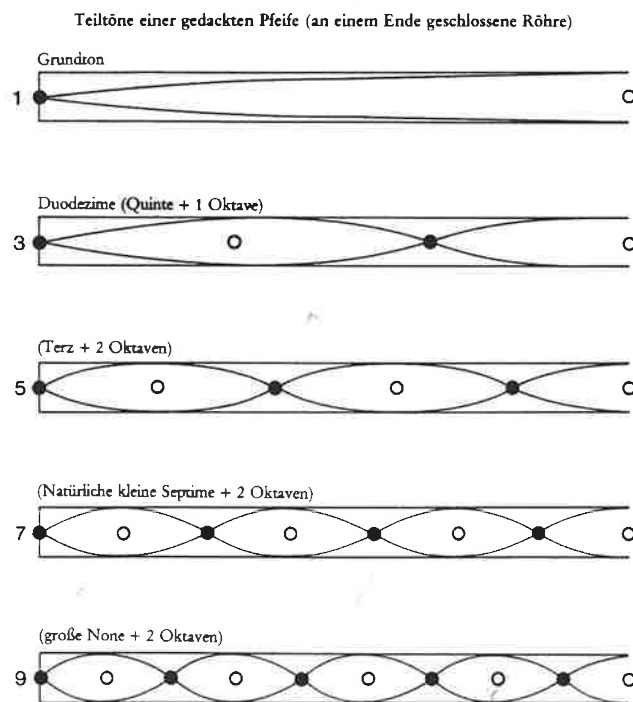


Abb. 19: Stehende Wellen in einer zylindrischen gedackten Röhre.

Die dritte wichtige Form ist die der **gedackten konischen Röhre**. Sie wird zum Beispiel bei der Oboe und dem Fagott verwendet. Um die stehenden Wellen einer konischen Röhre genau zu beschreiben, bedarf es einer komplizierteren mathematischen Analyse. Diese zeigt, daß sich die Welle sehr ähnlich wie in einer zylindrischen offenen Röhre ausbildet. Die Teiltöne einer

konischen Röhre sind in Abbildung 20 zu sehen. Wie in einer zylindrischen offenen Röhre sind alle Teiltöne Vielfache der Grundfrequenz. Auch hier läßt sich die Grundfrequenz leicht durch die Beziehung $c = \lambda * f$ berechnen.

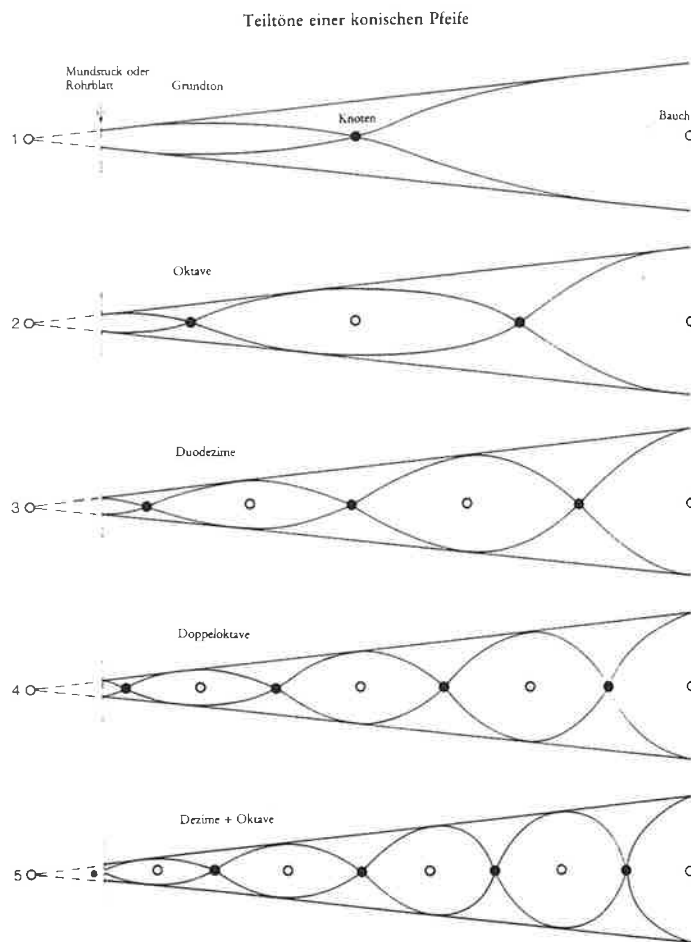


Abb. 20: Stehende Wellen in einer konischen Röhre.

Der tiefste Ton des Fagotts. Das deutsche Fagott hat eine Länge von 259 cm. Das würde bedeuten, daß die halbe Wellenlänge ($\lambda/2$) gleich 259 cm wäre. Es muß allerdings als Korrektur noch die Stärke des Konus, sozusagen der Öffnungswinkel, berücksichtigt werden. Dieser wird, wie folgt, angegeben. Es wird der Abstand in Millimeter beschrieben, bei dem sich die Röhre um je 1 mm erweitert. Der Konus 70 (oder 1:70) eines Fagotts besagt also, daß sich der Durchmesser der Röhre alle 70 mm um 1 mm erweitert (= Konuszahl k). Die Spitze der Röhre eines Instruments ist ja niemals geschlossen, sondern abgeschnitten. Dieses abgeschnittene Stück muß zur Berechnung ergänzt werden. Diese Korrektur wird Spitzenkorrektur genannt. Die Spitzenkorrektur ist gleich Konuszahl mal dem Röhrendurchmesser am engeren Ende ($K_{SP} = k * d$). Für mein Fagott ausgerechnet erhalte ich für K_{SP} einen Wert von 280 mm. Zusätzlich muß noch eine Endkorrektur, die $2/5$ der Mündungsöffnung (40 mm beim Fagott) beträgt, berücksichtigt werden. Sie hat dann einen Wert von 16 mm, also 1.6 cm. Die korrigierte Länge beträgt damit 288.6 cm. Für die Wellenlänge λ erhält man somit 577.2 cm, also 5.772 m. Die Gleichung $c = \lambda * f$ muß nun nach f aufgelöst werden. Die Gleichung lautet nun $f = c / \lambda$. Da die Schallgeschwindigkeit c temperaturabhängig ist, wähle ich einen Wert von 33°C, da ja die Luft aus den Lungen des Bläusers kommt. Die Schallgeschwindigkeit beträgt für diese Temperatur

351.3 m/sek. Die Frequenz, die man für diese Werte erhält, beträgt 60.9 Hz und liegt somit sehr nah zum Ton H_1 (61.7 Hz). Es muß nun noch der Einfluß des Rohrblattes auf die Tonhöhe berücksichtigt werden, der bei einem Fagott bis zu einem Halbton in die Tiefe betragen kann. Wenn man also annimmt, daß der Einfluß des Rohres einen Halbton beträgt, und das berücksichtigt, kommt man für mein Fagott auf eine Frequenz von 57.5 Hz. Und dieser Wert liegt sehr nahe am Sollwert für den Ton B_1 mit der Frequenz von 58.3 Hz.

Die Bedeutung der Tonlöcher für das Entstehen verschieden hoher Töne. Wenn die Töne in kleineren Schritten variiert werden sollen, müßte man die jeweils passenden Wellenlängen durch Verlängerung oder Verkürzung der Rohrlänge herbeiführen oder man muß geeignete, dem entsprechende Öffnungen zur Außenluft herstellen. Genau dies wird durch die Tonlöcher eines Instruments erreicht. Durch Öffnen eines Tonloches tritt an dieser Stelle die Luft innerhalb der Röhre mit der Außenluft in Kontakt, es ist also so, als ob man die Rohrlänge verändert hätte. Die stehende Welle bildet sich nur bis zur Öffnung aus.

Bei der Platzierung der Tonlöcher muß der Instrumentenbauer auf viele Momente gleichzeitig Rücksicht nehmen. Einige Punkte, auf die zum Beispiel geachtet werden muß, sind: Stimmung der Töne, Ansprache der Töne, ausgeglichener Klang der Töne sowie die Greifbarkeit der Löcher.

Die Stimmung des Tones kann sowohl durch die Lage des Loches als auch durch seine Größe gesteuert werden. Ein Loch näher beim Anfang des Instruments macht einen Ton hoch, ein Loch näher beim Ende macht ihn tief. Ein kleines Loch im Vergleich zu einem großem Loch läßt den Ton tiefer erklingen. Es ist also ein gewisser Spielraum bei der Platzierung vorhanden, wenn nur auf die Tonhöhe allein geachtet werden kann.

Für die Größe eines Loches gibt es gewisse Grenzen. Wenn ein Loch zu klein ist, dann spricht der Ton schlecht oder gar nicht an. Die Größe der Löcher hat auch Einfluß auf die Klangfarbe. Durch ein großes Loch zum Beispiel wird der Ton heller und lauter. Es dürfen daher die Öffnungen nicht allzu große Differenzen haben, sonst ist der Klang einzelner Töne verschieden. Neben dem Durchmesser der Öffnungen hat hier auch die Wandstärke einen wesentlichen Einfluß. Eine dicke Wandstärke macht einen Ton dunkler. Wenn eine Öffnung schräg gebohrt wird, hat dies den gleichen Effekt.

Wenn die Tonlöcher durch Klappendeckel verschlossen werden, wie das bei den modernen Instrumenten der Fall ist, muß nicht auf die Greifbarkeit der Löcher geachtet werden. Bei der Herstellung historischer Instrumente war dies allerdings ein wesentlicher Punkt. Am Fagott gibt es fünf direkt greifbare Tonlöcher, die restlichen (in der Regel) 15 werden durch Klappen bedient.

Bei Doppelrohrblatt-Instrumenten kann, wie oben bereits beschrieben, die Erzeugung der Tonhöhen zusätzlich durch Lippendruck, Ansatzart und Atemdruck gesteuert werden. Dadurch wird der Tonumfang des Instruments wesentlich erweitert. Die dabei erforderliche Technik des Überblasens wird durch spezielle Überblasklappen unterstützt und erleichtert. Bei Instrumenten mit einfachem Rohrblatt ist eine Verwendung von Überblasklappen unbedingt erforderlich, da der Ansatz beim Überblasen eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Die Wirkungsweise einer Überblasklappe ist folgende. Genau an der Stelle oder mindestens in der Nähe der Stelle in der Röhre, an der der Grundton seinen Schwingungsknoten hat, wird ein

Loch positioniert. Wenn das Loch geöffnet wird, wird die Bildung des Knotens verhindert, da in der Nähe eines Loches keine großen Druckschwankungen bestehen können. An Stelle des Grundtones muß sich ein Ton ausbilden, der dort einen Schwingungsbauch hat. Das ist bei Instrumenten mit einer offenen zylindrischen oder einer konischen Röhre die Oktave ($2f_0$), bei Instrumenten mit einer gedackten Röhre die Duodezim ($3f_0$). Durch sinnvolles Öffnen der geeigneten Löcher können auch andere Teiltöne erzeugt werden. Auch können Tonlöcher die Funktion von Überblaslöchern erfüllen. Daher wird bei manchen Griffen zum Beispiel ein bestimmtes Tonloch nur halb geöffnet. Die speziellen Überblasklappen an einem Instrument sind in der Regel ziemlich klein. Am Fagott gibt es durchschnittlich drei spezielle Überblaslöcher.

Der Rohrkörper des Instruments mit seinen Löchern dient allerdings nicht nur zur Tonhöhenregulation, sondern er ist auch ein Resonator. Das heißt, daß Frequenzen der Sinuskomponenten eines Tones, die durch das Mundstück entstehen, in spezifischer Weise verschieden stark abgeschwächt oder verstärkt werden. Durch diese Eigenschaften entsteht schließlich der für ein Instrument typische Klang.

Spektrogramme und Frequenzspektren in den tiefen, mittleren und hohen Tonlagen meines Fagotts

Der folgende Abschnitt enthält die Ergebnisse der Analyse des Klangs meines Fagotts. Dazu werden unterschiedlich hohe Töne, die ich auf meinem Fagott selbst spielte und die dabei aufgezeichnet wurden, genauer beschrieben.

Durchführung der Tonaufzeichnung. Die Aufzeichnung erfolgte in einem Wohnzimmer mit geringem Nachhall. Für die Aufnahme wurde ein Mikrofon AKG C747 mit einer nierenförmigen Richtcharakteristik (Hyperniere) verwendet. Das Mikrofon befand sich ca. 1,5 m über dem Boden und in ca. 2 m Entfernung zum Fagott und auf seine Schallöffnung hin ausgerichtet. Das Mikrofon wurde an ein Mischpult angeschlossen, das die Phantomspeisung für das Mikrofon lieferte und mit einem linearen Vorverstärker ausgerüstet war. Das Signal wurde also vorverstärkt, bevor es über die Hardware im Computer digital aufgezeichnet wurde. Für die Digitalisierung wurde eine Soundkarte, Soundblaster AWE32, verwendet, die eine Aufzeichnung in 16 bit-Breite bei einer Sampling-Rate von 44,1 kHz ermöglichte. Die aufgezeichneten Töne konnten dann mit speziellen Programmen bearbeitet und die Ergebnisse als Diagramme ausgegeben werden. Die dabei verwendete Software ist der Sound-Editor 'Cool-edit', Version 1.53 (1996) der Syntrillium Software Corporation, USA, mit dem die Signalverläufe und die Frequenzspektren erstellt wurden, sowie weiters ein Programm zur Fourier-Analyse und Spektrogrammerstellung 'Spectrogram', Version 2.3 von R. S. Horne (1995). Die Beschreibung der Tonanalyse erfolgt unter Zuhilfenahme dieser Diagramme.

Es wurde mit den zur Verfügung stehenden Mitteln versucht, bei der Aufnahme dem realen Klang des Instruments möglichst nahezukommen. Für die Aufnahme griff ich Töne in größeren Abständen aus den verschiedenen Lagen heraus. Welche Töne aufgenommen worden sind, ist in Tabelle 1 zusammengefaßt. Zusätzlich zu den Tönen des Fagotts wurden, wo es möglich war, äquivalente Tonhöhen mit der Baß- und mit der Altblockflöte aufgenommen.

Beim Hauptteil der Aufnahmen wurden je zwei Töne etwa je zwei Sekunden lang mehrmals abwechselnd gespielt, also zum Beispiel C - Es - C - Es - C, um so für einen Ton mehrere Auf-

nahmen zu erhalten und die Variation beim aufeinanderfolgenden Spielen zu sehen. Weiters machte ich Aufnahmen mit kürzeren Dauern und Aufnahmen mit anderen Tonabfolgen. Zum Beispiel wurde die chromatische Tonleiter auf dem Fagott gespielt und es wurde ein Teil einer Etüde aufgenommen, um ein Spektrogramm einer Tonfolge zu erhalten, wie sie normalerweise in der Musik vorkommt.

<i>Tonhöhe</i>	<i>Frequenz (Hz)</i>	<i>Fagott</i>	<i>Baßblockflöte</i>	<i>Altblockflöte</i>
C	65,40	+		
Es	77,78	+		
F	87,30	+	+	
As	103,83	+	+	
c	130,81	+	+	
es	155,56	+	+	
f	174,61	+	+	
as	207,65	+	+	
c ¹	261,63	+	+	+
es ¹	311,13	+	+	+
f ¹	349,23	+		+
as ¹	415,30	+		+
c ²	523,25	+		+

Tab. 1: Tabelle der aufgenommenen Töne, ein + bedeutet, daß für diesen Ton eine Aufnahme gemacht wurde.

Den Aufnahmen, die für die Auswertung verwendet wurden, gingen Probedurchgänge voraus, um die Geräteeinstellungen und den Ablauf zu üben. Ein kritischer Punkt der Aufnahmen war die Lautstärke der gespielten Töne. Ich habe versucht, für die gespielten Töne eine mittlere Lautstärke zu wählen. (Eine professionelle Aufzeichnung und Analyse würde in diesem Punkte erfordern, daß die Lautstärke der gespielten Töne am aufzeichnenden Mikrophon fortlaufend mitregistriert werden. Nur so kann die Beziehung zwischen den Frequenzspektren und der Lautstärke mitanalysiert werden. Die Veränderung der Lautstärke wirkt sich nämlich nicht gleichmäßig auf das Frequenzspektrum aus.)

Welche Aufnahmebedingungen in 'richtigen' Aufnahmen für die akustischen Eigenschaften von Musikinstrumenten beachtet werden müssen, ist kein einfaches Problem. Es sind dabei sowohl die Voraussetzungen einer guten physikalischen Messung, eine möglichst natürliche Spielsituation für den Musiker und auch eine geeignete Raumakustik zu berücksichtigen. A. H. Benade, ein Physiker mit umfangreichen Erfahrungen mit Blasinstrumenten, hat die wichtigsten Bedingungen für solche Aufnahmen in einer grundlegenden Arbeit 1985 am Beispiel der Aufzeichnung des Frequenzspektrums der Klarinette im Journal of the Acoustic Society of America veröffentlicht (Benade und Larson 1985).

Die nachfolgende Darstellung enthält ausgewählten Beispieldiagramme aus der von mir durchgeführten Analyse.

Beispiel 1: Der Ton C in vier verschiedenen Oktaven. In Abbildung 21 ist das Spektrogramm für die Töne: C, c, c¹ und c² dargestellt. Ihre Tonhöhe entsprechen den Frequenzen 65,4 Hz, 130,8 Hz, 261,6 Hz und 523,2 Hz. In der Abbildung dient jeweils eine 'Spalte' der Darstellung eines der vier Töne. Ganz zu oberst ist stark 'verdichtet' der Signalverlauf und die Amplituden der vier Töne zu sehen. In den Spalten jeweils darunter entsprechen die Liniencharen dann den Frequenzkomponenten der einzelnen Töne.

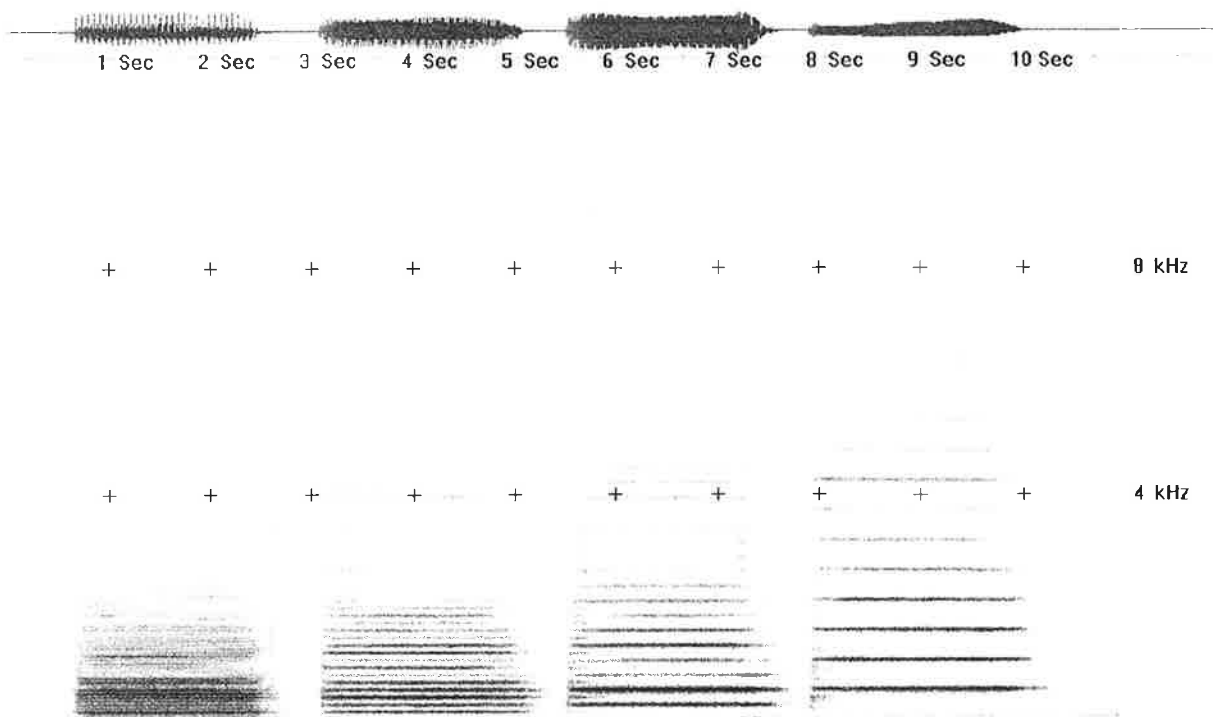


Abb. 21: Spektrogramm der Tonfolge: C - c - c¹ - c², gespielt auf dem Fagott

Betrachten wir nun einen einzelnen Ton, den ersten links in der Abbildung. Es handelt sich hierbei um den Ton C mit der Frequenz 65,4 Hz. Die waagrechten Linien des Spektrums stellen die Sinuskomponenten des Tones dar, also die Obertöne des Tones. Wie ersichtlich, besteht dieser Ton aus relativ vielen Teiltönen. Es sind fast 40. Die Linien liegen so eng beieinander, daß sie kaum unterschieden werden können. Die oberen Linien im Spektrum sind im Vergleich zu den unteren viel schwächer; die ihnen entsprechenden Partialtöne haben also geringere Intensitäten. Ganz allgemein nimmt die Stärke der Obertöne mit ihrer Höhe ab. Auffallend ist, daß die Grundfrequenz nicht zugleich auch die Frequenz mit der größten Intensität des Tones ist, die wahrgenommene Tonhöhe aber doch ihr entspricht. Beim Ton C liegt die Frequenz mit der größten Amplitude etwa bei dem fünften Oberton. Dies entspricht der bereits aus früheren Messungen bekannten Beobachtung, daß die Fagotte im Bereich von 440 - 500 Hz und dann noch im Bereich von 1220 - 1280 Hz relativ eine stärkere Resonanz aufweisen (Lehman 1964). Solche Bereiche der Verstärkung nennt man Formanten des Instruments. Bei allen vier Tönen

liegen die Teiltöne mit der größten Intensität etwa in diesen Frequenzbereichen und sie stimmen mit den genannten Formantbereichen gut überein.

Vergleicht man das daneben abgebildete c mit dem eben besprochenen C , so sieht man, daß die Obertöne beim c viel weiter hinaufreichen, bis ca. 4 kHz. Der Abstand zwischen den einzelnen Frequenzkomponenten ist natürlich größer. Die Anzahl der Obertöne hat dabei abgenommen, auch wenn es auf den ersten Blick nicht so aussieht. In der Darstellung des Tones c sind nur noch 30 Partialtöne zu erkennen. Bei dem nächsten Ton, dem c^1 , sind es noch etwas mehr als 20 und beim vierten Ton, der im Spektrogramm enthalten ist, sind es ca. 12 Partialtöne. Gut erkennbar ist auch, daß sich die Abstände der einzelnen Teiltöne für die vier C 's von Ton zu Ton verdoppelt haben. Dies ist darauf zurückzuführen, daß eine Tonerhöhung um eine Oktave immer eine Verdoppelung der Grundfrequenz bedeutet. Die Teiltöne des c^2 sind zum Beispiel auch im Ton c^1 enthalten. Dies kann als Erklärung für die besonders deutliche Klangähnlichkeit der Oktaven bei den komplexen Tönen der Musikinstrumente herangezogen werden.

Beim Anklingen und beim Ausklingen der Töne verläuft das Hinzukommen und das Wegbleiben der Partialtöne unterschiedlich. Beim Anklingen kommen die Partialtöne in aufsteigender Reihe rasch aufeinanderfolgend zur Grundschwingung hinzu; die Zeitversetzung der Beginne der Partialtöne von unten nach oben im Spektrogramm ist nur sehr gering. Beim Ausklingen hingegen gibt es deutlich sichtbare Unterschiede, die höheren Partialtöne bleiben früher aus als die niedrigeren.

Beispiel 2: Chromatische Tonleiter der tiefen Lage. In Abbildung 22 ist der komplette Teil der tiefen Lage des Fagotts in Form einer chromatischen Tonleiter dargestellt. An den ver-

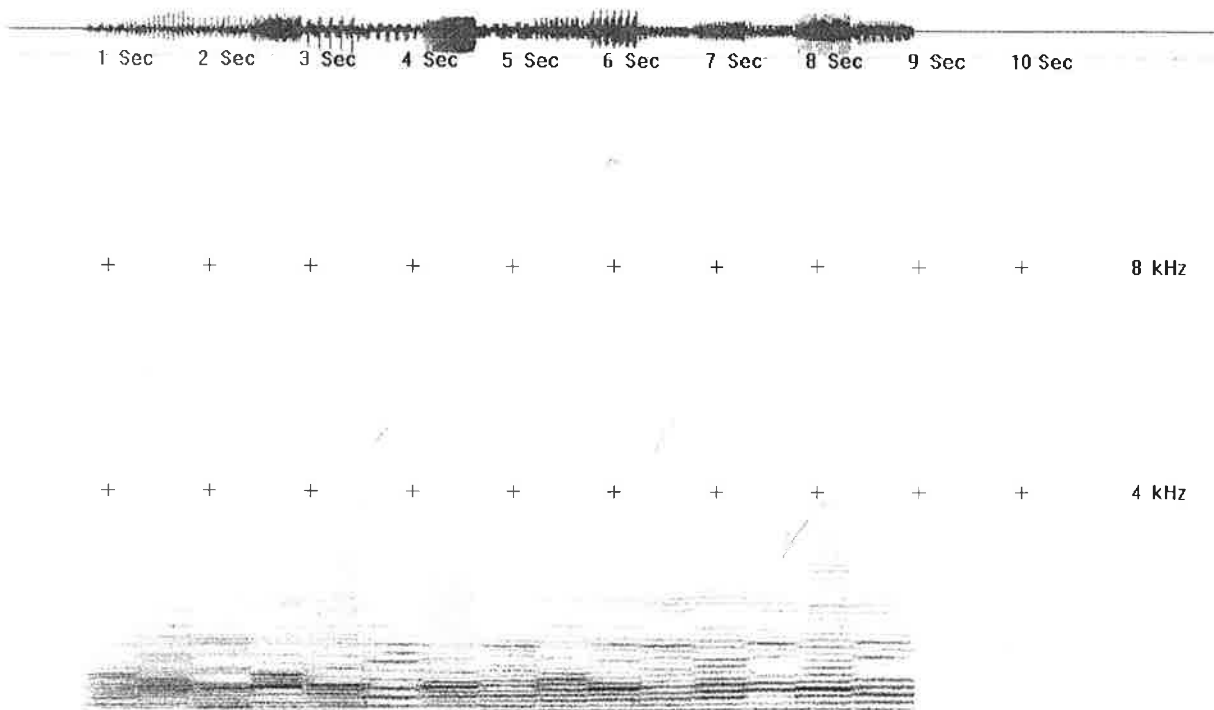


Abb. 22: Spektrogramm einer chromatischen Tonleiter von B_1 bis c , gespielt auf dem Fagott.

schieden weit in die Höhe ragenden Linienscharen ist die unterschiedliche Zahl der Obertöne bei den aufeinanderfolgenden Tönen deutlich erkennbar. Die Frequenz der Obertöne übersteigt die Frequenz von 4000 Hz nicht. Es spielt bei der Zahl der dargestellten Teiltöne natürlich auch die Lautstärke der aufgenommenen Töne eine große Rolle, denn je lauter der Ton gespielt wird, desto intensiver können die Teiltöne sein und desto mehr Teiltöne können im Spektrum vorkommen. Ein Beispiel dafür kann der 13. und 14. Ton in diesem Spektrogramm sein, das B und das H. Es gilt dies aber nicht durchgängig. Vergleichen wir zum Beispiel den 4. und den 5. Ton, das Cis und das D, so ist die Amplitude des D eher geringer als die des Cis, die Zahl seiner Partialtöne ist aber fast doppelt so groß. Das Cis hat in der Abbildung ungefähr 30 Obertöne, das D besteht aber aus über 50 Obertönen. Das D auf meinem Fagott ist der Ton mit den überhaupt meisten Obertönen. Möglicherweise ist dies der Grund, warum das D einer der Töne ist, die bei meinem Fagott nicht leicht ansprechen. Die Ausbildung der zugehörigen stehenden Welle im Rohr ist dann nämlich entsprechend schwierig.

Auch in dieser Abbildung ist zu sehen, daß die Sinuskomponenten mit den größten Amplituden wieder in den oben beschriebenen Formantbereichen liegen. Auch mein Fagott begünstigt also die Schwingungen in diesen Frequenzbereichen besonders.

Beispiel 3: Töne der mittleren Lage. Einige Töne der mittleren Lage, nämlich c, es, f und as, sind in der Abbildung 23 zu sehen. Die Abbildung zeigt die vier nacheinander einzeln angestoßenen Töne. Hier kann wieder deutlich der intensivere Formantbereich erkannt werden. Die Zahl der Partialtöne ist in der mittleren Lage kleiner als in der tiefen.



Abb. 23: Spektrogramm der Tonfolge c - es - f - as, gespielt auf dem Fagott.

Anhand dieses Diagramms kann das Anblasen und das Ausklingen eines Tones nochmals näher analysiert werden. Die einzelnen Linien erscheinen nicht alle zum gleichen Zeitpunkt: die unteren früher die oberen später. Die Teiltöne entstehen also nicht zugleich, sondern sie bauen sich zeitlich verschoben, fast linear von unten nach oben auf. Das Ausklingen erfolgt in umgekehrter Reihenfolge. Die schwächeren Frequenzen verschwinden allerdings viel schneller als die stärkeren und vor allem schneller als die tiefen, welche länger nachklingen. Dies konnte auch schon in der Abbildung 21 beobachtet werden.

Beispiel 4: Töne der hohen Lage. In Abbildung 24 ist die Tonfolge: c^1 , es^1 , f^1 , as^1 und c^2 , in der hohen Lage des Fagotts abgebildet. Besonders schön ist der Ton c^2 aufgezeichnet. Es sind 13 Sinuskomponenten erkennbar, die bis zu einer Frequenz über 8 kHz hinaufreichen. Die Abstände zwischen den einzelnen Sinuskomponenten bei diesen höheren Tönen ist schon ziemlich groß und dementsprechend die Zahl der Obertöne im Vergleich zu den tiefen Tönen relativ klein.

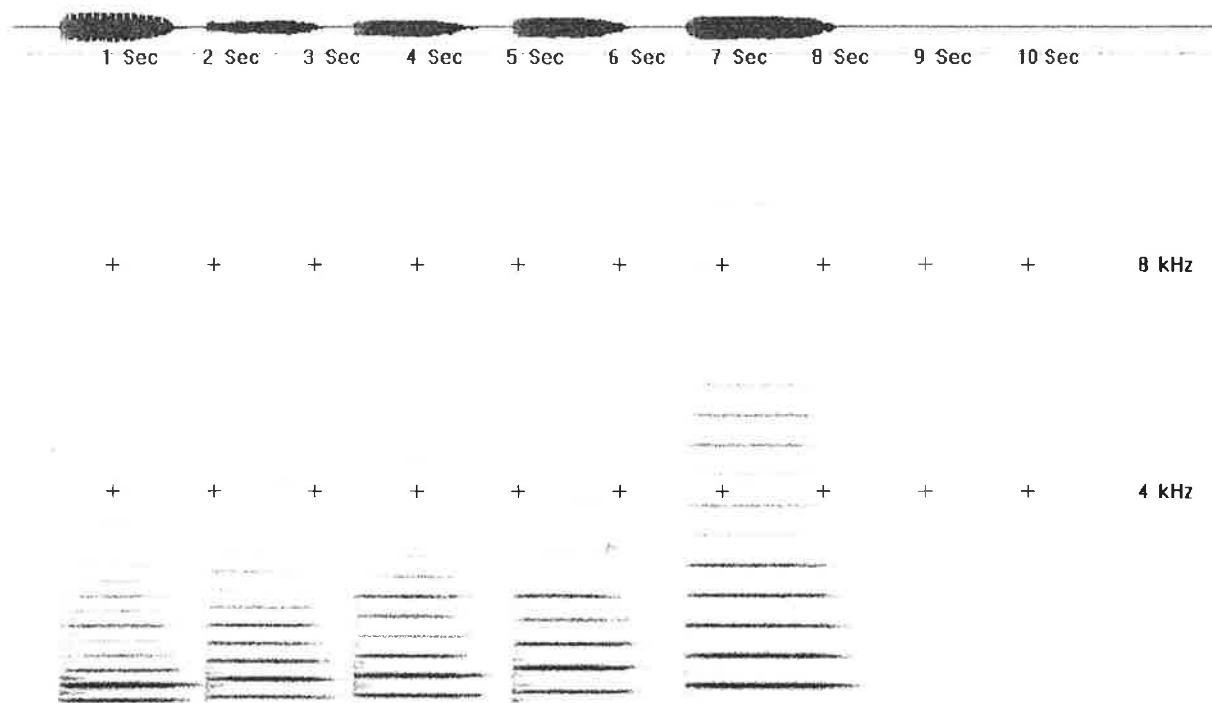


Abb. 24: Spektrogramm der Tonfolge c^1 - es^1 - f^1 - as^1 - c^2 , gespielt auf dem Fagott.

In Abbildung 25 ist für den Ton c^2 , welcher der Frequenz 523,2 Hz entspricht, zusätzlich der Verlauf seiner komplexen Wellenform dargestellt. Dieser Verlauf entsteht aus der Überlagerung des Grundtones und der einzelnen Partialtöne. Die Abbildung zeigt seine sehr komplizierte Form des Verlaufes.

Abbildung 26 enthält das Frequenzspektrum desselben Tones. Ausgehend von der Grundfrequenz 523,2 Hz ist die große Zahl der Partialtöne und ihre unterschiedliche Intensität deutlich zu sehen. Die in der Abbildung angezeigte Zahl der Partialtöne ist wesentlich höher als im vorausgehenden Spektrogramm. Dies hängt damit zusammen, daß für die Darstellung im Spektro-

gramm ein Schwellenwert angewendet wird. Im Frequenzspektrum hingegen werden alle Komponenten angezeigt.

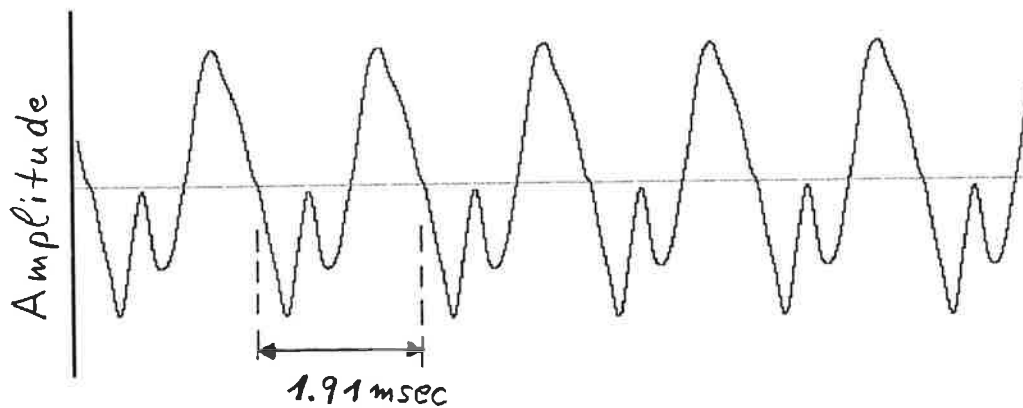


Abb. 25: Komplexe Wellenform des Tones c^2 , gespielt auf dem Fagott.

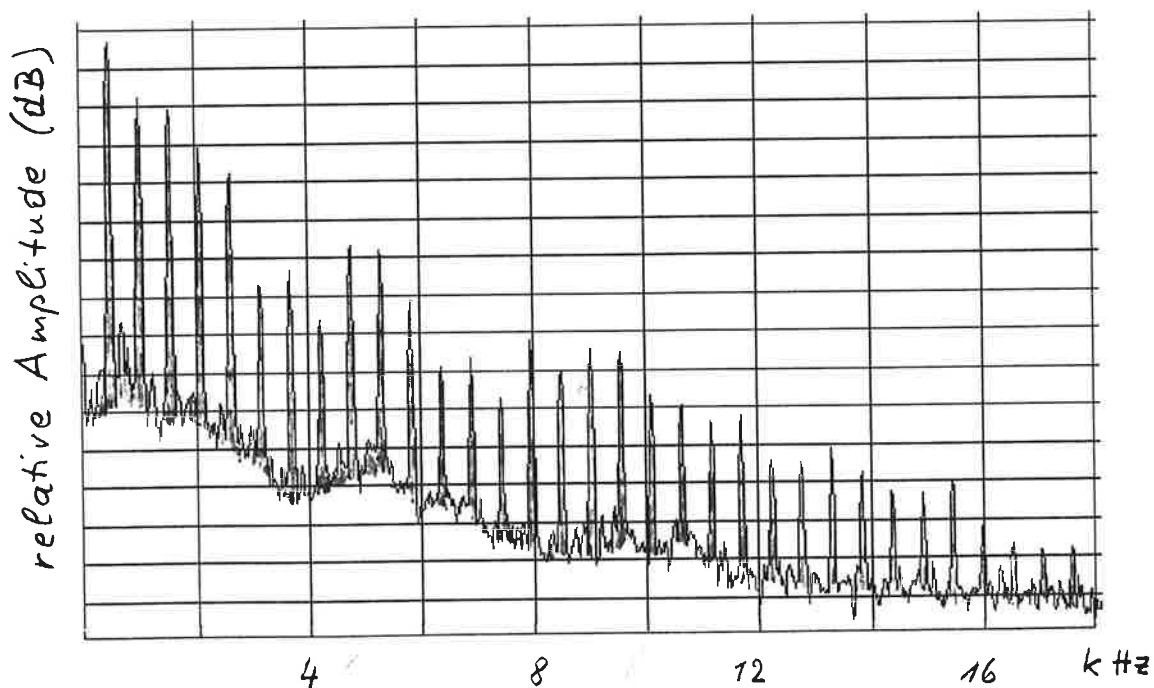
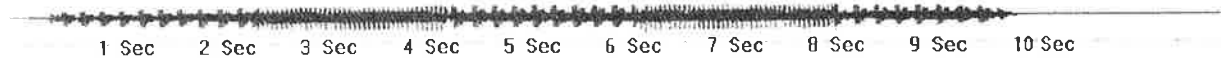


Abb. 26: Frequenzspektrum des Tones c^2 , gespielt auf dem Fagott.

Beispiel 5: Vergleich von Fagott und Baßblockflöte. In Abbildung 27 ist in (a) das Spektrogramm der gespielten Töne des Fagotts dargestellt: F, As, F, As und F, und (b) zeigt im Vergleich dazu die gleichen Töne der Baßflöte. Man kann auf den ersten Blick erkennen, daß die Töne der Baßflöte aus weitaus weniger Obertönen bestehen als die Töne des Fagottes. Vergleicht man die dritte Spalte in Abbildung 27 (a) mit der ersten in (b), so läßt sich feststellen,

daß in dieser Abbildung der Ton F auf dem Fagott 27 Teiltöne hat, während der gleiche Ton auf der Baßblockflöte aus nur 18 Teiltönen besteht, obwohl die Komponenten der Baßflöte in der Frequenz weiter hinauf reichen. Das ist wahrscheinlich ein Grund, warum der Ton des Fagottes voller klingt als der der Flöte.



(a)

+ + + + + + + + + + 8 kHz

+ + + + + + + + + + 4 kHz



(b)

+ + + + + + + + + + 8 kHz

+ + + + + + + + + + 4 kHz



Abb. 27 a und b: Spektrogramme der Tonfolge: F - As - F - As - F; (a) gespielt auf dem Fagott und (b) gespielt auf der Baßblockflöte.

Bei den Tönen der Baßblockflöte ist kein so breiter intensiver Bereich der Teiltöne zu sehen. Die Grundfrequenz ist allein die Frequenz mit der größten Intensität. Die übrigen Teiltöne sind viel schwächer. Beim Fagott ist, wie auch bereits in den weiter oben dargestellten Abbildungen, die Grundfrequenz nicht der Ton mit der größten Intensität, wie dies bei der Baßflöte der Fall ist. An Stelle dessen gibt es aber eine größere Zahl von ziemlich starken Teiltönen im unteren Frequenzbereich. Das ist wohl der Grund für den volleren Klang des Fagottes.

Beispiel 6: Spektrogramm eines Ausschnittes eines Fagottkonzertes. Abbildung 28 enthält zum Abschluß der Beispiele das Spektrogramm eines Ausschnittes aus dem Fagottkonzert: 'Concerto C-Dur für Fagott solo, zwei Violinen, Viola und Basso continuo' von Johann Friedrich Fasch (1688-1758). Man sieht in dieser Abbildung die komplexe Zeit- und Tonstruktur von Fagott-Musik.

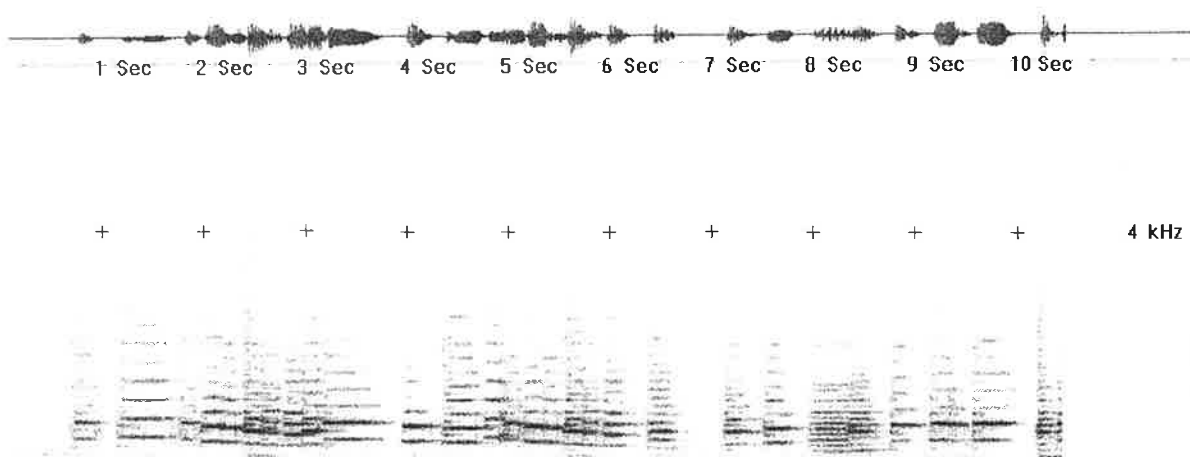


Abb. 28: Spektrogramm eines Fagottkonzert-Ausschnittes: Concerto C-Dur von J. F. Fasch.

Fazit: Die in den Beispielen dargestellten Ergebnisse lassen sich in die bisher bekannten Beobachtungen und Messungen zum Fagott einordnen (z. B. Lehman 1964). Sie belegen ganz allgemein, wie stark die besonderen Klangeigenschaften der Musikinstrumente von der Struktur ihrer Töne abhängig sind.

Zusammenfassung und Schluß

Die Darstellung der Geschichte des Fagotts, seiner neueren Entwicklung, seines Einsatzes in der Musik, seiner akustischen Eigenschaften und der komplexen Struktur seiner Töne zeigt, daß an der Ausformung der Musik und ihrer Instrumente einerseits vielfältige Aspekte der kulturellen Entwicklung in der Musik und der Technik beteiligt sind und daß andererseits zwischen dieser Entwicklung und den akustischen Grundlagen der Musik wie auch schließlich der Ausbildung von individuellen musikalischen Fertigkeiten eine komplexe Wechselwirkung besteht. Die Analyse von Musikinstrumenten liefert somit Beispiele, wie die Kultur der Musik, die physikalischen Grundlagen und auch die Vorgänge des Spielens der Instrumente und des Zuhörens bei ihrer Darbietung zusammenwirken.

Herkunft der verwendeten Abbildungen:

Abbildungen aus: Joppig (1984): Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 und 11;
 Die Physik der Musikinstrumente (1992): Nr. 7;
 Pierce (1989): Nr. 12;
 Barkowsky (1996): Nr. 13 und 14;
 Seltmann & Angerhöfer (1987): Nr. 17;
 Roederer (1995): Nr. 18;
 Steinkopf (1983): Nr. 19 und 20;

Abbildungen zur akustischen Analyse: Nr. 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 und 28.

Literaturverzeichnis

- Barkowsky, J.** (1996). *Das Fourier-Theorem in musikalischer Akustik und Tonpsychologie*. Frankfurt a. M.: Verlag Peter Lang GmbH.
- Benade, A. H. & Larson, C. O.** (1985). Requirements and techniques for measuring the spectrum of the clarinet. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 1475 - 1498.
- Die Physik der Musikinstrumente.** Verständliche Forschung: Spektrum Akademischer Verlag (Reader). (1992). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Goldstein, B. E.** (1997). *Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Joppig, G.** (1984). *Oboe & Fagott. Ihre Geschichte, ihre Nebeninstrumente und ihre Musik*. Mainz: Verlag Schott.
- Lehman, P. R.** (1964). Harmonic Structure of the Tone of the Bassoon. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36, 1649-1653.
- Musikinstrumente der Welt. Eine Enzyklopädie.** (1981). Gütersloh: Prisma Verlag GmbH.
- Pierce, J. R.** (1989). *Klang. Musik mit den Ohren der Physik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Roederer, J. G.** (1995). *The Physics and Psychophysics of Music*. New York: Springer Verlag.
- Schüler-Duden: Die Musik.** (1989). Mannheim: Dudenverlag.
- Seltmann, W. & Angerhöfer, G.** (1987). *Das Fagott*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Musik.
- Steinkopf, O.** (1983). *Zur Akustik der Blasinstrumente*. Celle: Moeck Verlag