

Einleitung

Die Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung bei den Musikinstrumenten hat eine große Bedeutung für die klangliche Wirkung im Konzertsaal und im Opernhaus sowie bei Mikrophonaufnahmen. Insbesondere für Fragen der Orchesteraufstellung sind diese akustischen Erscheinungen von Interesse, sie finden deshalb bei Dirigenten und Instrumentalisten in zunehmendem Maße Beachtung. Daß daneben auch bei rein meßtechnischen Aufgaben, wie beispielsweise bei klangqualitativen Untersuchungen, die Richtwirkung der Instrumente nicht unberücksichtigt bleiben darf, versteht sich von selbst.

Bei den Blechblasinstrumenten wird die Schallabstrahlung durch den Schalltrichter stark gebündelt, so daß es zur Ausbildung ausgesprochener Vorzugsrichtungen kommt. Da die Hornisten beim Spielen die rechte Hand in die Stürze einführen, werden die Verhältnisse nicht so übersichtlich sein wie bei den Trompeten oder Posaunen. Auch wird sich die Abschattung des Schalles durch den Musiker selbst mehr bemerkbar machen, da das Horn verhältnismäßig dicht am Körper gehalten wird. Aus diesen Gründen erscheint es ratsam, Instrument und Spieler als Einheit zu betrachten und den Musiker in der Mehrzahl der Fälle in die Messung der Richtcharakteristik einzubeziehen. Die Ergebnisse erhalten dann zwar nicht die günstigste Form für eine physikalische Deutung der Vorgänge; doch sind sie um so besser geeignet, die Bedeutung der Richtwirkung für die Praxis zu diskutieren.

Meßverfahren

Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen an Richtcharakteristiken von Holzblasinstrumenten [1, 2], wo die künstliche Anregung die Möglichkeit bot, bei Dauertönen beliebiger Länge kontinuierliche Polardiagramme zu registrieren, ist man bei der Mitwirkung eines Spielers auf eine punktweise Ausmessung des Schallfeldes angewiesen. Dabei dient ein ortsfestes Mikrophon als Bezugspunkt, damit eventuelle Ungleichmäßigkeiten beim Blasen auf rechnerischem Wege ausgeglichen werden können. Ein zweites Mikrophon wird auf Kreisbahnen um den Spieler herumbewegt.

Die vorliegenden Messungen wurden in einem reflexionsfreien Raum durchgeführt, im Normalfall war dabei auch der Fußboden schallabsorbierend. Für einige spezielle Versuche wurde ein Holzfußboden oder eine reflektierende Rückwand angebracht. Der Abstand der beiden Mikrophone von der Mitte des Instrumentes betrug bei allen Meßreihen 3,5 m. Untersucht wurden die Schallverhältnisse in einer horizontalen Ebene, deren Höhe ebenfalls der Mitte des Instrumentes entsprach, also etwa 90 cm über dem Boden. Außerdem wurde das Schallfeld in mehreren Vertikalebene gemessen; diese sind einmal durch die Blickrichtung des Spielers („vorn-

hinten“) und einmal durch eine quer dazu verlaufende Orientierung („links-rechts“) bestimmt. Die Bezeichnungen der Polarkoordinaten sind aus Abb. 1 zu ersehen. In der Horizontalebene fällt die 0°-Linie mit der Blickrichtung zusammen, die Winkel werden von dort aus im Uhrzeigersinne gerechnet, wenn man von oben auf den Spieler sieht. In allen Vertikalebene liegt die 0°-Richtung in der Waagerechten, so daß die Winkelangaben die Höhe über der Horizontalen bezeichnen. Außer in den genannten Ebenen wurden auch Messungen

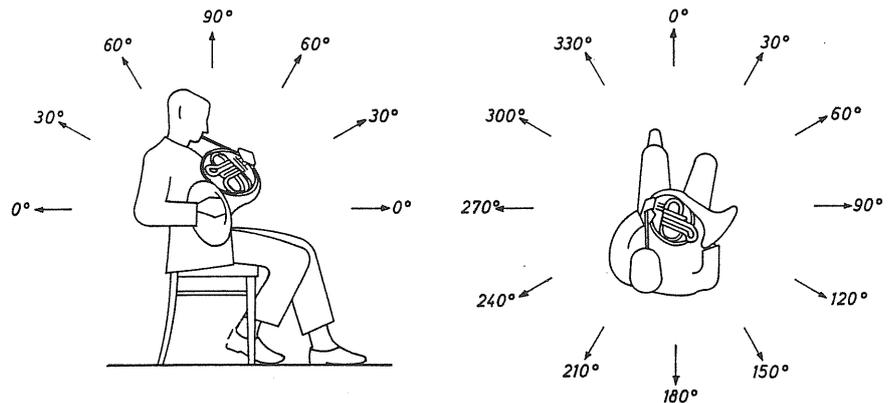


Abb. 1 Bezeichnungen der Polarkoordinaten

in einer Vertikalebene durchgeführt, die schräg nach hinten verlief (bei 140°), weil sich herausstellte, daß hier die größten Amplituden auftraten.

Um für die Richtcharakteristiken eine hinreichende Detailauflösung zu erlangen, wurden die einzelnen Meßpunkte in Abstände von jeweils 10° gelegt. Damit ergaben sich insgesamt 75 Punkte im Raum. Von einer weiteren Verfeinerung wurde abgesehen, da sonst einerseits der Aufwand zu sehr gestiegen wäre, andererseits die Ergebnisse für die praktische Verwendung keine wesentliche Mehrinformation enthalten hätten. Messungen unterhalb der Horizontalebene waren technisch nicht möglich; die Schallabstrahlung in diese Richtungen wurde jedoch – wenigstens zum Teil – bei Versuchen mit reflektierendem Fußboden erfaßt.

Das Programm der Aufnahmen bestand neben einigen Spezialversuchen aus einer Folge von normal geblasenen und gestopften Tönen. Diese Folge mußte bei jeder Mikrophonaufstellung, d. h. für jeden Meßpunkt möglichst gleich gespielt werden. Um die Einflüsse von Raum und Spieler auf ein Minimum zu beschränken, wurden alle Meßreihen an einem anderen Tage mit verändertem räumlichen Aufbau wiederholt. Als Dynamikstufe wurde in den meisten Fällen ein klingendes forte gewählt, um ohne ein Schmettern des Instrumentes möglichst viele Obertöne für die Auswertung zur Verfügung zu haben.

Zur Analyse der Klänge dienten Terzfilter, mit denen sich unterhalb etwa 1500 Hz einzelne Teiltöne aussieben ließen; oberhalb dieser Frequenz ergaben sich dann Amplituden-Mittelwerte für den Filterbereich. Diese Mittelung wurde jeweils über die ganze Tonfolge durchgeführt. Neben diesem Verfahren, das Aufschluß über den stationären Teil der Klänge gibt, wurde für die Analysen auch ein Sonograph eingesetzt, um die Charakteristik der Toneinsätze zu verdeutlichen. Die Filterbandbreite bei dieser Art der Auswertung betrug

300 Hz. Diese weniger feine Auflösung hatte sich im vorliegenden Fall als übersichtlicher erwiesen.

Will man das Horn vom Spieler gelöst betrachten, um die akustischen Vorgänge der Schallabstrahlung durch den Trichter zu untersuchen, so kann man eine künstliche Anregung der einzelnen Resonanzen des Instrumentes durch einen kleinen Lautsprecher erzielen, der an das Mundstück angekoppelt wird [3]. Dabei läßt sich zwar eine geringfügige Verstimmung des Hornes nicht ganz vermeiden, doch gewinnt man mit dieser Methode Resultate, die insbesondere im Vergleich mit ähnlichen Ergebnissen von Trompeten und Posaunen interessant sein können. Einige Versuche dieser Art wurden deshalb mit dem „künstlichen Mund“ der Fa. Brüel & Kjaer als Anregungselement durchgeführt. Da hiermit Töne hinreichender Dauer erzeugt werden können, läßt sich die ganze Apparatur auf einem Drehtisch montieren, so daß sofort Polardiagramme auf dem Registrierpapier entstehen. Eine physikalische Deutung dieser „abstrakten“ Ergebnisse soll aber einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben, nachdem zunächst nur die Schallabstrahlung des offen geblasenen Hornes damit erläutert wird.

Polardiagramme

Für die Darstellung der punktweise gemessenen Richtcharakteristiken mit Spieler wurde zunächst bei jeder Frequenz

* Erschienen in „Das Musikinstrument“ Heft 6, 1969, Seiten I-XII

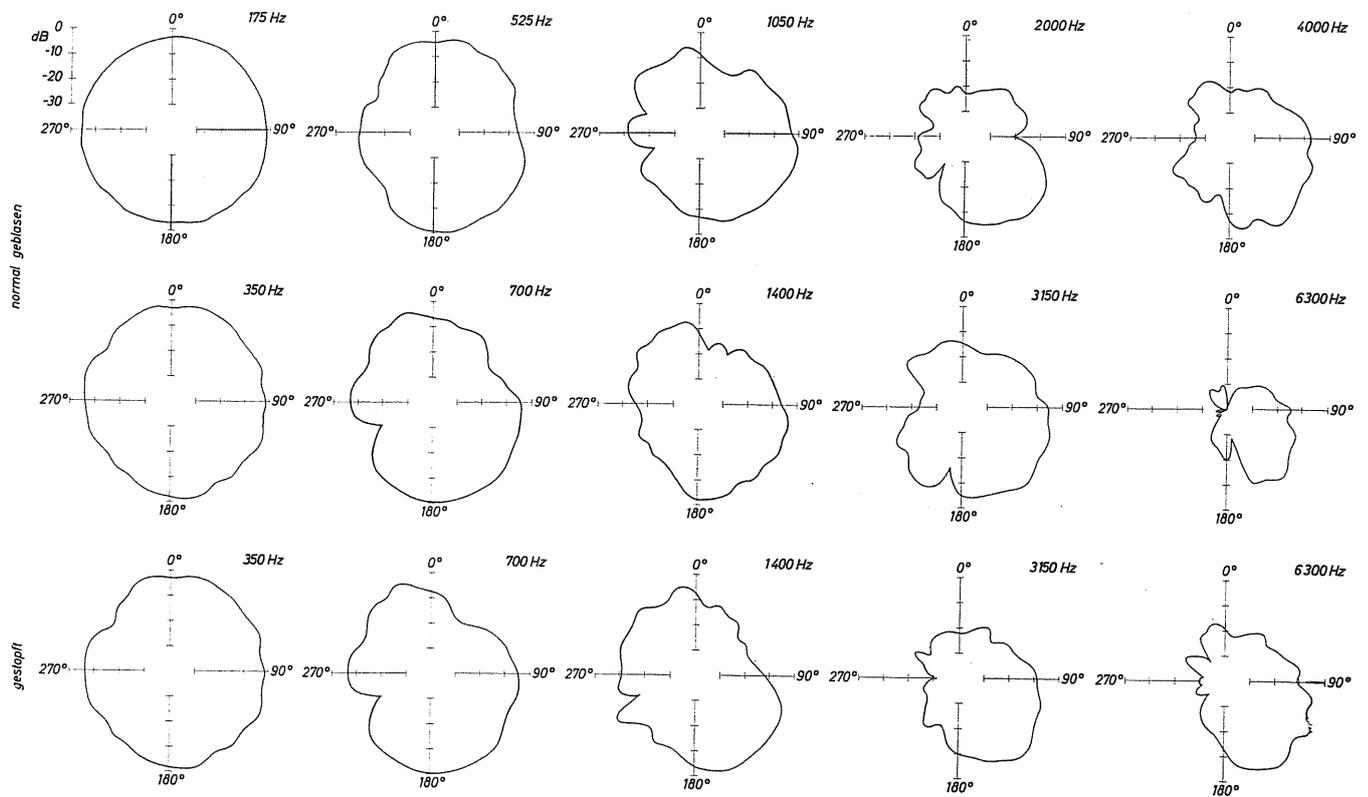


Abb. 2
Polardiagramme des Hornes mit Bläser für die horizontale Ebene. Der Bezugswert 0 dB entspricht der maximalen Amplitude in der oberen Halbkugel.

die Richtung der maximalen Schallabstrahlung ermittelt. Die Amplitude in dieser Richtung wurde als Bezugswert gleich 0 dB gesetzt, so daß aus den durch die Meßpunkte gezogenen Kurven für jede Richtung direkt die Intensitätsverminderung gegenüber der Hauptabstrahlungsrichtung abgelesen werden kann. Da dieses Maximum den räumlichen Bezugspegel für die obere Halbkugel bildet, kann es naturgemäß vorkommen, daß der Wert von 0 dB bei der Darstellung der Richtcharakteristiken in manchen Ebenen nicht auftritt, sondern die Abstrahlung im Ganzen schwächer ist.

Als Beispiele für die Horizontalebene sind in Abb. 2 eine Reihe von Polardiagrammen für verschiedene Frequenzen wiedergegeben. Diese Kurven gelten sowohl für die Grundtöne der Hornklänge wie auch für die Obertöne, die gerade bei der betreffenden Frequenz liegen. Die Ordnungszahl des geblasenen Naturtones spielt für die Ausbildung der Richtcharakteristik keine Rolle. Die Bilder zeigen mit zunehmender Frequenz immer deutlichere Vorzugsgebiete der Schallabstrahlung mit dazwischenliegenden Senken. Unterhalb von etwa 175 Hz sind die Richtcharakteristiken noch fast rund, doch schon eine Oktave höher macht sich eine Verschiebung des Schwergewichtes zur rechten Seite (vom Spieler aus gesehen) bemerkbar. Die größten Amplituden treten in dem Quadranten zwischen 90° und 180° auf, wobei sich das Maximum bei sehr hohen Frequenzen etwas nach hinten verlagert. Diesem Winkelbereich der stärksten Schallabstrahlung liegt ein Nebenmaximum nach vorn links gegenüber, das allerdings mit zunehmender Frequenz sehr in seiner Intensität nachläßt.

Diese beiden Maxima legen die Richtung einer Hauptachse fest, zu der sich die

Richtcharakteristik etwa symmetrisch ausbildet. Geringere Amplituden auf der linken Seite gegenüber der rechten sind dabei vorwiegend auf die Abschattung durch den Spieler zurückzuführen. Auch die Kleidung und vor allem der rechte Ärmel spielen dabei eine Rolle. Bereits im mittleren Frequenzbereich (um 1500 Hz) entsteht für den Quadranten vorn links ein Unterschied von etwa 5 dB, je nachdem ob der Spieler ein Jackett oder nur ein kurzärmeliges Hemd trägt. Bei Frequenzen um 4000 Hz bedingt der Jackenärmel bereits einen Verlust von 10 dB in dem Winkelbereich von etwa 210° bis 0°. Es sei betont, daß sich alle in den Diagrammen wiedergegebenen Meßergebnisse auf den Normalfall des Spielers mit Jacke beziehen. Jedoch sollte man die geschilderte Erscheinung bei Studioaufnahmen in legerer Kleidung berücksichtigen.

Um auch die Resultate der anderen Meßebenen anschaulich zu machen, wurden die Richtcharakteristiken in ihrer räumlichen Zuordnung zu Modellen zusammengesetzt. Einige Beispiele für verschiedene Frequenzen sind in Abb. 3 wiedergegeben; der Amplitudenmaßstab ist dabei so gewählt, daß — bezogen auf das Maximum mit 0 dB — die Innenränder der Diagrammscheiben einem Wert von -30 dB entsprechen. Auch in dieser Abbildung erkennt man als Grundtendenz die zunehmende Aufgliederung und Konzentration der Schallabstrahlung mit wachsender Frequenz. Bei 350 Hz wirkt das Modell im Ganzen noch verhältnismäßig rund, doch ist die Amplitude nach senkrecht oben um etwa 7 dB geringer als in der Hauptrichtung. Diese Abschwächung nach oben steigert sich bei 1500 Hz auf etwa 15 dB und erreicht bei 6000 Hz mehr als 25 dB.

Die Lage des Maximums der Schallabstrahlung ist für die Frequenzen bis etwa 900 Hz mit einer Richtung von etwa 140°, also schräg nach hinten anzugeben, wobei die Intensität nach oben hin zunächst nur langsam abnimmt. Im Bereich um 1000 Hz verschiebt sich das Maximum auffälligerweise nach rechts (etwa 110°) und ist auch viel flacher ausgebildet, wie das Modell erkennen läßt. Von 1500 Hz an aufwärts verlagert sich die Richtung maximaler Intensität wieder auf etwa 140° und wird auch nach oben wieder etwas breiter. Bei sehr hohen Frequenzen verläßt das Maximum sogar die Horizontalebene und ist unter 140° bei einer Erhebung von etwa 20° zu finden.

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, daß die Messungen in den verschiedenen Vertikalebene bei fast allen Frequenzen einen geringfügigen Amplituden-Anstieg innerhalb der ersten 10° oberhalb der Horizontalen ergeben haben. Man kann daraus schließen, daß sich das eigentliche Maximum nicht unterhalb der Waagerechten befindet, also nicht in dem Winkelbereich, der einer direkten Messung unzugänglich war. Zu einem ähnlichen Ergebnis führte auch die Versuchsreihe mit reflektierendem Fußboden, über die weiter unten berichtet wird.

Das Gebiet der geringsten Schallabstrahlung zeichnet sich zur linken Seite des Spielers hin ab. Bei den meisten Frequenzen ist es schräg nach oben orientiert, lediglich im Bereich um 1000 Hz liegt es ziemlich flach. Bei 6300 Hz treten in einem weiten Winkelbereich Amplituden auf, die kleiner als -30 dB sind. In diesen Richtungen zeigt das Modell keinen Wert mehr an, sondern besteht nur noch aus schwarzen Bügeln; das Minimum mit -40 dB liegt bei 250° in der Horizontalebene.

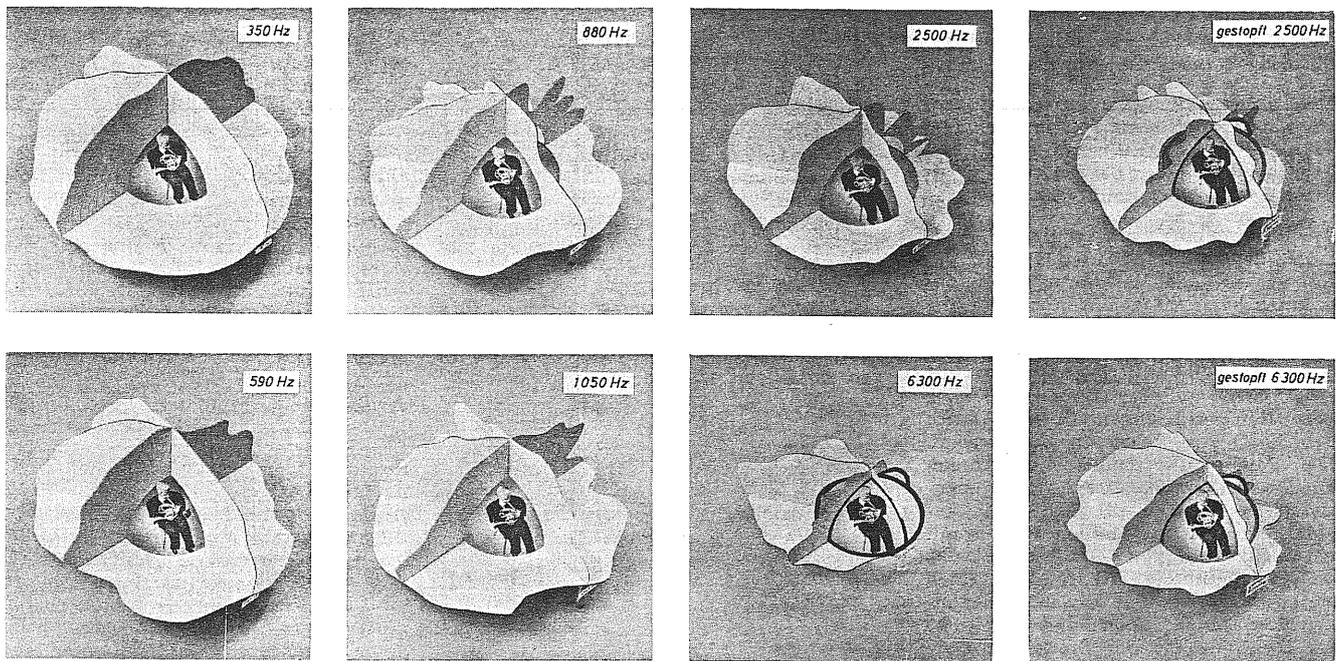


Abb. 3 Räumlich dargestellte Richtcharakteristiken des Hornes mit Bläser. Der Amplitudenbereich vom Maximalwert bis zum Innenrand der Modelle beträgt 30 dB.

Auswertung der Polardiagramme

In den Abbildungen 2 und 3 waren nur einige ausgewählte Beispiele für die Richtcharakteristiken wiedergegeben. Um zu einer umfassenden Darstellung zu kommen, die auf den Meßergebnissen bei allen untersuchten Frequenzen beruht, empfiehlt es sich, einige typische Eigenschaften der Diagramme herauszugreifen, und in Abhängigkeit von der Frequenz aufzutragen. Hierfür hat es sich bewährt, diejenigen Winkelbereiche zu bestimmen, in denen die Amplitude nicht mehr als 3 dB („Halbwertsbreite“) beziehungsweise nicht mehr als 10 dB unter ihren Maximalwert absinkt.

Diese Art der Auswertung ist jedoch im Gegensatz zu der Wiedergabe der Polardiagramme und Modelle für jede Meße Ebene getrennt durchgeführt, d. h. es wurde jeweils das Maximum in der betreffenden Ebene gesucht und als Bezugspunkt für die 3-dB- und 10-dB-Grenzen verwendet. Zwei Gründe waren für dieses Verfahren maßgeblich: einerseits die Tatsache, daß bei einem Bezug auf den räumlichen Maximalwert in den Ebenen geringerer Schallabstrahlung keine vollständigen Resultate mehr abzulesen wären, andererseits die Anpassung an frühere Arbeiten über die Richtcharakteristiken anderer Instrumente [2, 4], bei denen die Auswertung ebenfalls in verschiedenen Ebenen getrennt vorgenommen war, weil sich das räumliche Maximum nicht ohne weiteres bestimmen ließ.

In Abb. 4 sind die Winkelbereiche der unterschiedlichen Schallabstrahlung graphisch dargestellt; in den Teilbildern für die einzelnen Ebenen läuft von links nach rechts die Frequenz der Grund- bzw. Obertöne, nach oben ist die Richtung der Schallabstrahlung entsprechend den Koordinatenangaben der Abb. 1 aufgetragen. In der Horizontalebene kann die Richtcharakteristik unterhalb 100 Hz als allseitig gleichmäßig bezeichnet werden: die Amplituden sin-

ken nie mehr als 3 dB unter ihren Maximalwert ab. Mit zunehmender Frequenz macht sich dann zunächst eine Abschwächung auf der linken Seite des Spielers bemerkbar, die bereits von 200 Hz an zu einer Einengung des Hauptabstrahlungsgebietes auf weniger als einen Halbkreis führt. Nach einer nochmaligen Erweiterung um 400 Hz konzentriert sich das Gebiet der stärksten Schallstrahlung zwischen 600 und 900 Hz auf einen Winkelbereich von etwa 100° bis 200° . Oberhalb 1000 Hz verlagert sich das Maximum auf Winkel zwischen etwa 80° und 130° und wird gleichzeitig erheblich schmaler. Bei hohen Frequenzen bildet sich schließlich nur noch eine enge Zone um 140° herum aus.

Die 10 dB-Grenzen werden in der Horizontalebene erst von 500 Hz an aufwärts unterschritten. Die Lage der weißen Flächen macht dann mit wachsender Frequenz deutlich, wie eng sich die Schallabstrahlung um die Maximalrichtung konzentriert. Hingewiesen sei dabei noch auf das schwache Nebenmaximum der Gegend um 330° , also nach vorn links, das immerhin noch Frequenzen bis etwa 1700 Hz enthält.

In den Vertikalebene schließt sich der 3 dB-Bereich ebenfalls unterhalb 100 Hz; bei diesen tiefen Frequenzen kann man demnach das Horn — einschließlich des Spielereinflusses — noch als Kugelstrahler ansehen. Die von rechts nach links laufende Ebene deutet im Ganzen auf eine Bevorzugung der rechten Seite hin. In einem flachen Winkel von 0° bis etwa 15° bleiben die starken Amplituden über den ganzen Frequenzbereich erhalten. Außerdem sind mehrere Maxima unterschiedlicher Frequenz und Winkellage nach rechts aufwärts gerichtet. Links vom Spieler treten bereits von 500 Hz an (ähnlich wie in der Horizontalebene) Senken auf, welche die 10 dB-Grenzen unterschreiten. Betrachtet man speziell die Richtung senkrecht nach oben (90°), so liegen die Amplituden fast immer zwi-

schen 3 und 10 dB unter dem Maximalwert in dieser Ebene.

Die von vorn nach hinten gerichtete Vertikalebene zeigt einen größeren Flächenanteil der Halbwertsbereiche; abgesehen von zwei Senken, die bei Frequenzen um 200 Hz mit etwa 30° nach oben geneigt sind, ist die Charakteristik bis etwa 300 Hz rund. Bis 600 Hz und noch einmal um 1000 Hz findet man nach vorn aufwärts eine starke Schallabstrahlung. Darüber hinaus konzentriert sich die Hauptintensität jedoch in einem ziemlich flachen Winkel nach hinten. Im Gebiet der höheren Frequenzen liegen die Amplituden im vorderen Bereich von der Horizontalen bis fast zur Senkrechten meistens mehr als 10 dB unter dem Maximalwert.

Ergänzend zu den in Abb. 4 zusammengestellten Ergebnissen sei noch erwähnt, daß in der unter 140° nach hinten gerichteten Vertikalebene, in der die größten Amplituden überhaupt auftreten, die Halbwertsbreite im allgemeinen von der Horizontalen nach oben etwas weiter ausgedehnt ist als in den anderen Vertikalebene. Diese Erscheinung ist in fast allen Modellen der Abb. 3 zu erkennen: bei 2500 Hz erstreckt sich das Gebiet der bevorzugten Schallabstrahlung beispielsweise von 0° bis etwa 45° aufwärts. Das Modell für 6300 Hz zeigt einen Halbwertsbereich zwischen 6° und 24° aufwärts, bei diesen hohen Frequenzen reicht er offensichtlich nicht bis zur Horizontalen hinab.

Klangeinsätze

Die bisher besprochenen Meßergebnisse bezogen sich nur auf die Richtwirkung während des annähernd stationären Teiles der Klänge. Da jeder Instrumententyp besonders durch die Einschwingvorgänge charakterisiert wird, soll auch der Richtungseinfluß bei den Klangeinsätzen näher betrachtet werden. Wie schon Untersuchungen von Backhaus gezeigt haben [5], entwickeln

sich bei den Blechblasinstrumenten die Klanganteile in den verschiedenen Frequenzlagen ziemlich gleichzeitig.

Höherfrequente Vorläufererscheinungen, wie sie beispielsweise von labialen Orgelpfeifen [6] oder Querflöten [7] bekannt sind, kommen bei Blechblasinstrumenten in der Regel nicht vor.

Zur Darstellung des zeitlichen Verlaufes des Ein- und Ausschwingens der Klänge soll das Verfahren der Sonagramme herangezogen werden. Wie die Abb. 5 und 6 erkennen lassen, läuft in diesen Diagrammen von links nach rechts die Zeit, während nach oben die Obertonfrequenz registriert wird. Die Intensität der Klanganteile wird durch den Grad der Schwärzung angezeigt. Die dabei auftretenden Konturlinien entsprechen jeweils einem Amplitudenunterschied von 6 dB. Mit sechs gestuften Schwärzungsgraden wird somit ein Meßbereich von 36 dB erfaßt. Da das Aufzeichnungsverfahren nur einen zeitlichen Bereich von etwa 2,4 Sekunden und ein Frequenzband von 4000 Hz (bei hinreichender Breite der Darstellung) zu registrieren gestattet, sind die beiden Abbildungen aus mehreren Meßstreifen zusammengesetzt. Es sei betont, daß dabei die Empfindlichkeit der Analyserapparatur nicht verändert wurde, auch nicht für die Auswertung der unter verschiedenen Richtungen gewonnenen Aufnahmen.

In Abb. 5 ist ein verhältnismäßig schnelles und akzentuiertes Motiv als Sonagramm wiedergegeben. Es handelt sich dabei um die Anfangstakte von R. Strauss' „Eulenspiegel“. Das untere Diagramm entspricht einer Mikrofonstellung rechts neben dem Spieler in etwa 15° Höhe, das obere vor dem Spieler in derselben Höhe. Beide Aufnahmen wurden gleichzeitig mit gleicher Mikrofon-Empfindlichkeit gemacht, das Motiv ist also nur einmal gespielt. Wie bereits auf den ersten Blick zu übersehen ist, entsteht rechts vom Spieler ein viel obertonreicheres Klangbild als vor ihm. Betrachtet man die Einsätze der angestoßenen Staccato-Achtel, so stellt man eine sehr dichte Folge der Konturen, d. h. einen sehr schnellen Amplitudenanstieg fest. Die höchste Intensität wird bei den Frequenzen unterhalb etwa 1000 Hz in ungefähr 20 ms, also $\frac{1}{50}$ Sekunde erreicht, wie eine Ausmessung der Originalstreifen ergibt. Dieser Wert gilt für die Aufnahme neben dem Spieler, doch ist bei diesen Frequenzen auch vor ihm kein wesentlicher Unterschied festzustellen, zumal die Intensität in beiden Richtungen auch etwa gleich ist. Die höheren Klanganteile erreichen jedoch bei manchen Tönen ihr Maximum erst später als die tiefen. Diese Erscheinung ist bei einigen der Staccato-Achtel (z. B. f'' und fis'' im 4. Takt), vor allem aber bei den längeren Noten ausgeprägt und zeigt sich wiederum in beiden Richtungen. Besonders deutlich tritt sie bei den beiden weniger scharf angesetzten dis''-Synkopen hervor. Der geringere Obertonreichtum vor dem Spieler beschränkt den Klang zwar auf Komponenten unter 1500 Hz, doch ist trotzdem auch hier das Crescendo innerhalb des Tones noch wahrzunehmen. Ein Unterschied ergibt sich jedoch für das angebundene e'', das rechts vom Spieler stärker abgesetzt erscheint,

Abb. 4 Winkelbereich der Hauptabstrahlungsgebiete in den verschiedenen Meßebenen (Horn mit Bläser)

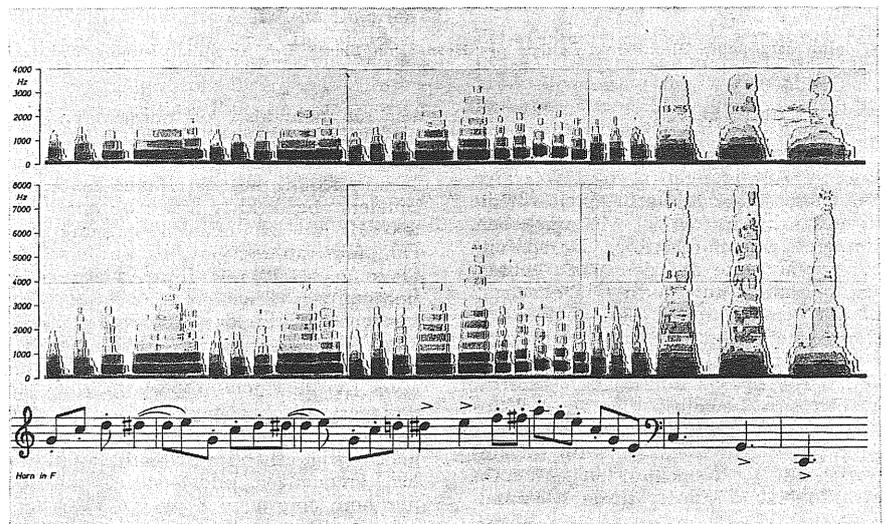
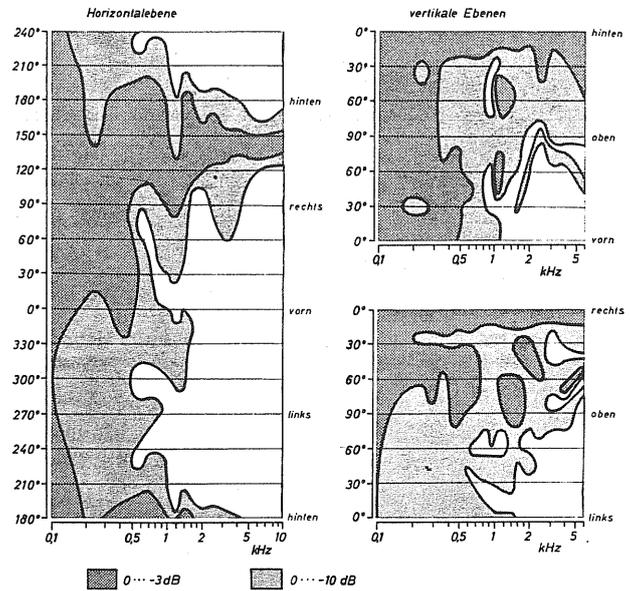
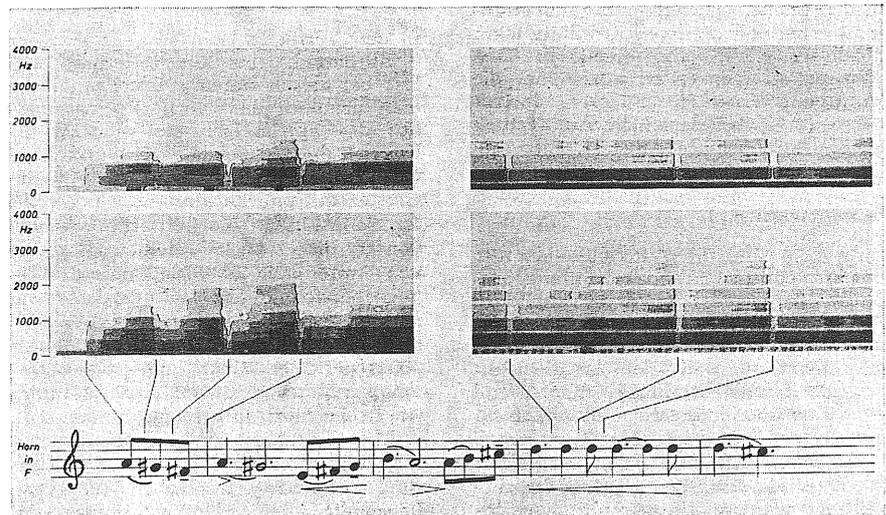


Abb. 5 Sonagramme des Hornthemas aus R. Strauss' „Till Eulenspiegels lustige Streiche“, Mikrofonabstand 3,5 m.

oben: vor dem Spieler (0°)
unten: rechts neben dem Spieler (90°)

Abb. 6 Sonagramm-Ausschnitte aus dem Hornthema des 2. Satzes der 5. Sinfonie von P. Tschaikowsky, Mikrofonabstand 3,5 m.

oben: vor dem Spieler (0°)
unten: rechts neben dem Spieler (90°)



während die Bindung (es handelt sich in diesem Fall um eine Ventilbindung) vor dem Spieler weicher wirkt.

Bei den letzten drei Tönen wird die Lautstärke bis zu einem metallischen Timbre gesteigert. Die Obertonanteile reichen im unteren Diagramm bis über 8000 Hz hinauf, während sie vor dem Spieler schon bei knapp 4000 Hz abbrechen. Interessant ist zu sehen, daß der Spieler die Töne zunächst mit einem Obertongehalt entsprechend den Staccato-Achteln anstößt, um danach wiederum ziemlich plötzlich das metallische Klingen zu erreichen. Auch hier läßt sich unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Obertonreichtums für beide Richtungen dieselbe Tendenz beziehungsweise derselbe zeitliche Ablauf feststellen. Schließlich sei noch auf ein Ventilklopfen (zwischen c'' und g' im vorletzten Takt) hingewiesen, das rechts vom Spieler deutlich in mehreren Frequenzbereichen festzustellen ist, während es nach vorn nicht mehr registriert wurde.

Abb. 6 zeigt einige Klangeinsätze und -übergänge bei einer fließenden, gesanglichen Passage. Diese Stelle aus dem Andante cantabile der 5. Sinfonie von P. Tschaikowsky trägt die Vortragsbezeichnung „dolce con molto espressione“. Wieder sind die Sonagramme für das Klangbild vor und rechts neben dem Spieler einander gegenübergestellt. Das linke Paar für die Anfangstöne gibt zunächst eine Bestätigung der in Abb. 4 dargestellten Meßergebnisse: da im Bereich zwischen 250 und 300 Hz, wo die Grundtöne dieser Figur liegen, das Hauptabstrahlungsbereich nicht bis zur Blickrichtung (0°) reicht, ist die Intensität hier geringer als seitlich, während der Obertonbereich zwischen 500 und 800 Hz in beiden Richtungen etwa die gleichen Amplituden aufweist. Bei der höheren Frequenzlage des rechten Teilbildes (Grundton etwa 400 Hz) drehen sich dann die Verhältnisse um.

Wie schon im Eulenspiegel-Motiv wirkt hier die Bindung $a' - gis'$ im Auftakt nach vorn hin weicher als zur Seite: der gleichzeitige Intensitätsabfall in allen Frequenzbändern des unteren Teilbildes führt zu einer deutlicheren Trennung als der verschwommene Übergang im oberen Diagramm. Auch die Absätze zwischen den folgenden Tönen sind zur rechten Seite hin stärker ausgeprägt, wie die Einschnitte mit zwei bis drei Graustufen (gegenüber nur ein bis zwei nach vorn) zeigen. In dem rechten Beispiel bei der Folge von mehreren gleichen Tönen sind dagegen die Einschnitte im untersten Frequenzband nach vorn hin tiefer ausgebildet als zur Seite, ein Effekt, der für das Ohr jedoch dadurch ausgeglichen wird, daß zur Seite hin mehr Obertöne das Ende des Tones hervorheben. Dieser Unterschied zwischen den Absätzen bei verschiedenen und bei gleichen Tönen dürfte darauf zurückzuführen sein, daß im ersten Fall die Schwingung der im Instrument befindlichen Luftsäule abrupt durch die Ventilbedienung gestört wird, während sie zwischen gleichen Tönen ungehindert ausklingt.

Die klangliche Wirkung im Raum

Der typische Klang der Waldhörner wird akustisch durch ein im allgemeinen

nicht allzu umfangreiches Spektrum mit spezifischer Energieverteilung charakterisiert [8]. In den tiefen Lagen des Tonumfanges reichen die Obertöne etwa bis 2000 Hz hinauf, wenn das Instrument mezzoforte geblasen wird. Nach den oberen Regionen der Tonkala hin verschiebt sich diese Grenze auf etwa 4000 Hz. Im piano treten nur sehr wenig Obertöne auf, während sich bei einem metallischen fortissimo Spek-

trum allem in den Kompositionen der romantischen Epoche als ideal empfunden wird. Dazu kommt eine gewisse Weichheit des Tones durch die Bedämpfung der höherfrequenten Obertöne. Hierbei spielt die Haltung der rechten Hand eine wichtige Rolle, bekanntlich dämpfen die Wiener Hornisten verhältnismäßig viel, während die Französische Schule zu relativ offenem Blasen tendiert. Schließlich wird die Weichheit des

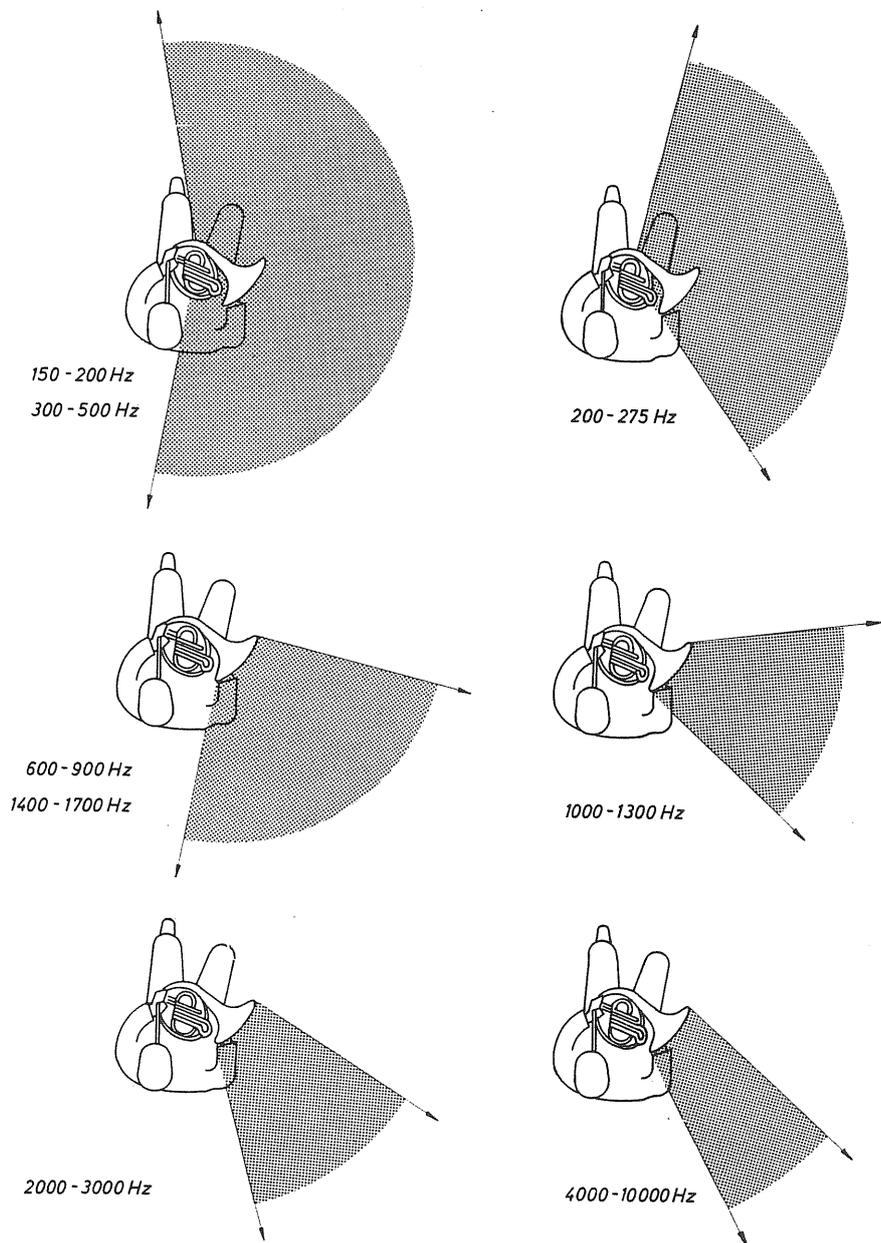


Abb. 7 Hauptabstrahlungsrichtungen (3 dB) in der Horizontalebene

tralanteile bis über 10000 Hz ausbilden. Die Dynamik des Instrumentes wird demnach in starkem Maße durch den Umfang des Klangspektrums bestimmt. Die größten Teiltonamplituden treten in den unteren beiden Oktaven des Tonumfanges nicht beim Grundton des Klanges auf, sondern liegen unabhängig von der geblasenen Note frequenzmäßig fest: sie bilden den für das Horn charakteristischen Hauptformanten, der bei etwa 340 Hz liegt.

Diese Frequenzlage, die etwa der Vokalfarbe des „u“ entspricht, hat maßgeblichen Anteil an dem „vollen“ und „runden“ Klang des Hornes, wie er vor

Tones auch durch die Art des Einschwingvorganges beeinflusst.

Um die skizzierten Eigenschaften des Hornklanges mit den Meßergebnissen über die gerichtete Schallabstrahlung in Zusammenhang zu bringen, sind in den Abb. 7 und 8 die Hauptabstrahlungsbereiche ($0 \dots -3$ dB) in den verschiedenen Ebenen schematisch dargestellt. Dabei ist zur Erhöhung der Übersichtlichkeit der gesamte Frequenzumfang in nur wenige Bereiche mit typischen Abstrahlungscharakteristiken unterteilt. Für die Horizontalebene ergeben sich — zusätzlich zu dem Gebiet der allseitig gleichmäßigen Intensität unterhalb 100

Hz — sechs Figuren mit unterschiedlicher Lage und Breite der Vorzugsrichtungen. Danach werden die Frequenzanteile zwischen 150 und 200 Hz sowie zwischen 300 und 500 Hz etwa in der Breite eines Halbkreises nach rechts abgestrahlt, während die dazwischen liegenden Frequenzen nach hinten hin nicht so stark ausgebildet sind. Das erste Teilbild gilt demnach auch für den Hauptformanten bei 340 Hz, also den Bereich der stärksten Klanganteile des Hornes überhaupt. Oberhalb 600 Hz treten die größten

wärts, wo sie ziemlich steil gegen die Saaldecke gerichtet ist. Über Reflexionen wird sie deshalb gut zu dem Publikum im Parkett eines Saales gelangen. Unterhalb von 600 Hz reicht dieses Vorzugsgebiet (mindestens) bis zur Horizontalen herab, so daß diese Komponenten direkt auf die Zuhörer abgestrahlt werden. Bemerkenswert ist, daß in dem Bereich zwischen 1000 und 1300 Hz noch ein weiteres Maximum auf der Rückseite des Spielers schräg nach oben ausgebildet ist. Gerade in diesem Frequenzbereich besitzen die meisten

wandreflexionen auch den Schallrückwürfen von der Decke, und zwar aus einem Bereich schräg über dem Spieler, eine gewisse Bedeutung zu. Hinsichtlich der höchsten Frequenzen sei noch einmal darauf hingewiesen, daß sie ohnehin nur bei gesteigerter Lautstärke auftreten. Werden sie dabei jedoch vorteilhaft zum Publikum hingelenkt, so gewinnt die Dynamik des Spiels dadurch wesentlich an Wirkung, während andernfalls, das forte zu matt bleiben kann. Diese Erscheinung läßt sich allerdings bei ungünstigen raumakustischen Verhältnissen durch ein stärker forcirtes Blasen zumindestens teilweise ausgleichen.

Die Rückwandreflexionen gewinnen natürlich in dem Maße an Wirksamkeit, wie die Schallabstrahlung nach hinten gegenüber derjenigen nach vorn überwiegt. Zur Verdeutlichung dieses Effektes ist im oberen Diagramm der Abb. 9 der Unterschied der Amplituden in diesen beiden Richtungen aufgetragen, wie er sich aus den Polardiagrammen ablesen läßt. Dabei wurde jeweils ein Mittelwert für einen Winkelbereich von $\pm 10^\circ$ um die 0° -Achse und die 180° -Achse zugrunde gelegt. Die negativen Werte für das sogenannte Vor-Rückverhältnis bedeuten, daß die größere Intensität nach hinten gerichtet ist. Man erkennt, daß die Abstrahlung bis 500 Hz nach vorn und hinten etwa gleich ist. Dann nimmt die Bevorzugung der Rückseite zu, lediglich um 1400 Hz ist noch einmal fast Amplitudengleichheit festzustellen. Der größte Unterschied wird zwischen 1500 und 2000 Hz erreicht, wo die Pegeldifferenz bis auf 19 dB ansteigt.

Das untere Teilbild zeigt das Ergebnis von einer Messung, bei welcher der Spieler im echofreien Raum einmal vor einer reflektierenden Holzwand und einmal ohne diese Wand eine Tonfolge geblasen hat. Ein seitliches zweites Mikrophon, das von Wandreflexionen nicht getroffen werden konnte, diente dabei als Bezugsmaß beziehungsweise als Kontrolle für das gleichmäßige Spiel in beiden Situationen. Das abgebildete Diagramm gibt den (in 3,5 m Entfernung horizontal) vor dem Spieler gemessenen Intensitätszuwachs nach dem Aufstellen der Wand wieder. Unterhalb 900 Hz deuten die Meßpunkte darauf hin, daß jeweils einzelne Frequenzen ausgewertet wurden, während von 1000 Hz an immer mehrere Teiltöne in die Filterbereiche fielen. Der Abstand von 1 m vor der Wand führt natürlich dazu, daß sich einige Frequenzen auch abschwächen, wenn die reflektierte Welle gerade eine ungünstige Phasenlage hat. Die drei negativen Werte entsprechen ziemlich genau den Abständen von $3/2\lambda$, $5/2\lambda$ und $7/2\lambda$. Ähnliche Phasenbedingungen führen auch zu den Streubereichen in den höheren Filtern. Der Mittelwert, der alle Töne einer chromatischen Folge repräsentiert, ist in diesen Streubereichen durch eine stärkere Linie gekennzeichnet.

Der Zusammenhang zwischen dem Vor-Rückverhältnis und dem Intensitätszuwachs durch die Rückwand ist klar ersichtlich. Im unteren Bereich schwankt die Zunahme um 6 dB; deutlich zu erkennen ist dann der Rückgang im Gebiet um 1200 Hz entsprechend der

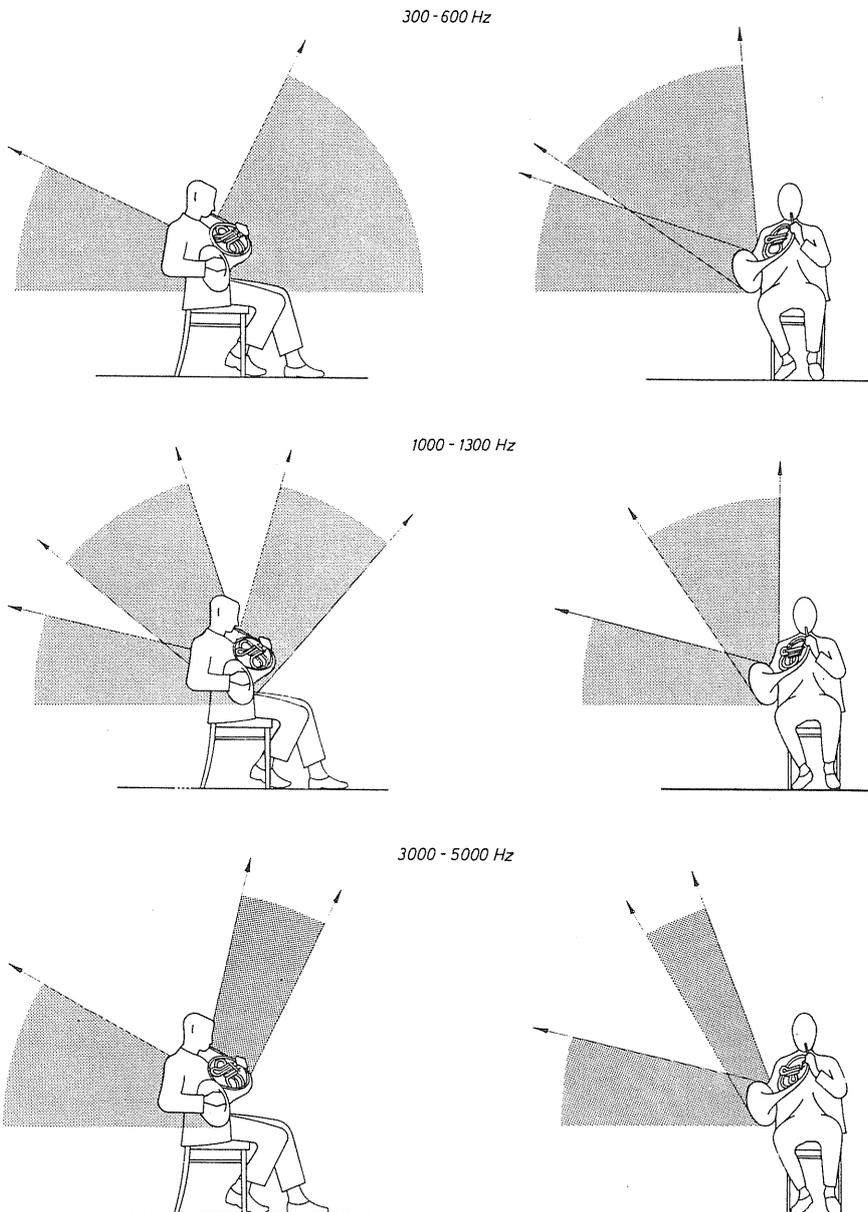


Abb. 8 Hauptabstrahlungsrichtungen (3 dB) in den vertikalen Ebenen

Amplituden dann nur noch in einem mehr oder weniger schmalen Winkel nach hinten auf. Diese Komponenten werden also die Zuhörer vorwiegend über Reflexionen an den Wänden erreichen.

Die allgemeine Bevorzugung der rechten Seite sowie der rückwärtigen Richtungen kommt auch deutlich in den Figurarstellungen für die vertikalen Ebenen (Abb. 8) zum Ausdruck. Außerdem zeigen diese Charakteristiken eine ausgeprägte Nebenkeule nach vorn auf-

Hörner in ihrem Spektrum einen Nebenformanten, der in seiner Vokalfarbe einem hellen „a“ entspricht und deshalb dem Klang einen kraftvollen Charakter verleiht [8]. Für eine günstige Reflexion im Saal spielt hier die Form der Decke wie auch der Rückwand eine wichtige Rolle.

Zur rechten Seite hin tritt mit wachsender Frequenz eine immer stärkere Trennung der beiden Vorzugsgebiete auf, die ihrerseits auch enger werden. Dementsprechend kommt außer Seiten-

Einschnürung in der oberen Kurve. Die größte Verstärkung bringt die Rückwand für Frequenzen zwischen etwa 1500 und 2500 Hz, hier können Werte bis zu 15 dB auftreten; bei noch höheren Obertönen wird der Effekt wieder geringer. Der Klang des Hornes gewinnt durch die Reflexionswirkung der Rückwand demnach ganz allgemein an Intensität, wobei der untere Bereich der nasalen Komponenten am schwächsten verstärkt wird; besonders hervorgehoben werden die aufhellenden Klanganteile im Gebiet der Vokalfarbe „e“ (um 2000 Hz). Es sei deshalb darauf hingewiesen, daß hier — außer dem Horn in hoch F — alle gebräuchlichen Hörner einen Nebenformanten in ihrem Spektrum aufweisen.

Diese spektrale Erweiterung ist auch in den Sonagrammen der Abb. 10 zu erkennen. Das Staccato-Motiv enthält mit Rückwandreflexion nicht nur mehr Obertonanteile, sondern weist auch bei den tieferen Frequenzen größere Amplituden auf, wie aus der Zahl der Schwärzungsstufen abzulesen ist. Sogar die besondere Intensitätszunahme im Bereich um 2000 Hz ist in einigen Fällen deutlich zu ersehen. Da auch hier, wie in den anderen bereits besprochenen Sonagrammen, die Deutlichkeit der angestoßenen Noten mehr durch den größeren Frequenzumfang als durch spezielle Vorgänge während der Tonentwicklung bestimmt wird, läßt sich sagen, daß die Rückwand vor allem bei größeren Besetzungen des Orchesters an Bedeutung gewinnt. Wenn das Spektrum zu sehr eingeschränkt ist, ergibt sich zwar ein ausgesprochen weicher Klang, doch wächst die Gefahr, daß die Hörner von anderen Instrumenten im Gesamtklang verdeckt werden. Andererseits ließe sich aus stilistischen Vergleichen mit dem Klang der Inventionshörner der Mozart-Zeit der Schluß ziehen, daß auch für die Kompositionen dieser Epoche die klaraufhellende Wirkung der Rückwand vorteilhaft sein kann, sofern sich die Spieler durch nicht allzu harte Ansätze darauf einstellen und eine ausgeglichene Dynamik zu den anderen Instrumentengruppen herzustellen ist.

Wesentlich weniger für die klangliche Wirkung im Raum bringt die Reflexion des Schalles durch die vor dem Spieler liegende Fußbodenfläche. Der dadurch erzielte Intensitätszuwachs ist in Abb. 11 wiedergegeben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Frequenzlage der durch ungünstige Phasenlage zwischen den direkten und den reflektierten Schallanteilen entstehenden Minima auch von der Entfernung des Hörers abhängt. Sieht man von diesen Senken im Diagramm zunächst ab, so zeigt sich, daß die Verstärkung fast nie mehr als 6 dB beträgt; nach schräg unten wird also fast nirgends mehr abgestrahlt als in die horizontale 0°-Richtung. Lediglich zwischen 800 und 900 Hz sowie um 1500 Hz wird diese Grenze etwas überschritten. Oberhalb 2000 Hz geht der Amplitudengewinn auf sehr geringe Werte zurück. Da im Orchester diese Fußbodenreflexionen zu einem Teil auch noch von den davor sitzenden Musikern absorbiert werden, kommt ihnen insgesamt gesehen demnach keine besondere Bedeutung zu.

Die bisher behandelten Ergebnisse über die Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung bei den Hörnern ermöglichen nun eine Diskussion der verschiedenartigen Placierungen dieser Instrumentengruppe innerhalb des Orchesters. Dabei spielen neben klanglichen Fragen natürlich auch spieltechnische Gesichtspunkte eine Rolle, vor allem der Kontakt der Musiker untereinander.

In der Konzertaufstellung sitzen die Bläser im allgemeinen in mehreren Stufen nach oben gestaffelt hinter den Streichern. Den Hörnern kommt dabei meist ein Platz rechts oder links neben den Holzbläsern zu, manchmal sind sie

mit zu rechnen, daß die Hörner im Vergleich zu den anderen Instrumentengruppen zu schwach erscheinen. Für den „runden“ und sonoren Klang der Hörner, wie er beispielsweise in den Sinfonien von Brahms und Bruckner verlangt wird, empfiehlt sich daher die Umschließung der Horngruppe von anderen Spielern, während die kleinere Besetzung der klassischen Sinfonien ohnehin dazu führt, daß die Hörner eine freiere und damit hellere Klangabstrahlung erhalten.

Die Frage, ob die Hörner auf der rechten oder der linken Seite des Orchesters einen günstigeren Platz finden,

Abb. 9
oben: Vor-Rückverhältnis der Richtcharakteristiken in der Horizontalebene
unten: Amplituden-Zuwachs vor dem Spieler bei der Aufstellung einer reflektierenden Rückwand in 1 m Abstand vom Schalltrichter

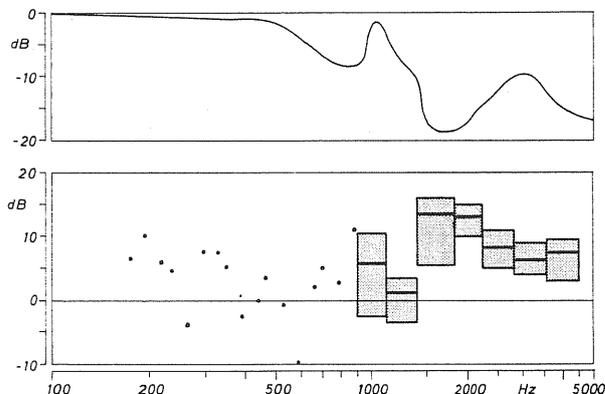


Abb. 10
Sonagramme einer Staccato-Tonfolge, aufgenommen in 3,5 m Abstand vor dem Spieler
oben: ohne reflektierende Rückwand
unten: mit reflektierender Rückwand

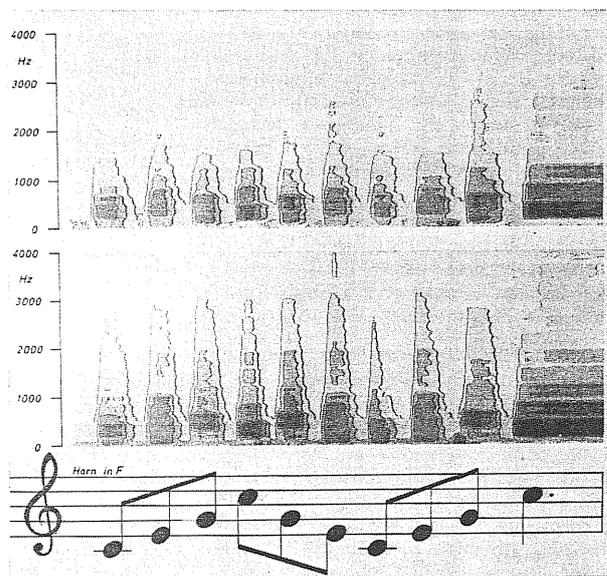
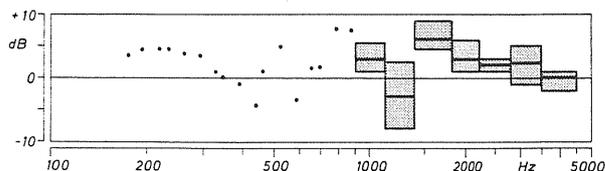


Abb. 11
Amplituden-Zuwachs vor dem Spieler (in 3,5 m Abstand) durch eine reflektierende Fußbodenfläche



auch auf der obersten Stufe neben den Trompeten untergebracht. Je höher sie über dem Streichkörper sitzen und je näher sie damit der Rückwand des Podiums kommen, desto heller wird ihre Klangfarbe werden. Für eine weichere Tongebung ist dagegen die Placierung neben den Oboen oder Fagotten günstiger. Die Abschattung durch die anderen Spieler wird sich zwar etwas auf die Prägnanz der Einsätze (höhere Frequenzen) auswirken, doch ist nicht da-

hängt nicht zuletzt auch mit den räumlichen Gegebenheiten des Podiums zusammen. In rechteckigen Sälen oder auch bei annähernd rechteckiger Bühne sind beide Arten möglich, da die Seitenwandreflexionen teils in das Orchester zurücklaufen und teils durch die davor sitzenden Streicher gemildert werden. Allerdings müßte auf der linken Seite (vom Dirigenten aus gesehen) der 1. Hornist ganz außen sitzen, damit sein Instrument den brilliantesten Klang

innerhalb der Gruppe hat. Diese Form der Aufstellung führt zu dem — im Rahmen sinnvoller Möglichkeiten — hellsten Klang der Hörner, scheint also auch für die Klassiker prädestiniert zu sein. Interessanterweise ist sie besonders in Frankreich häufig anzutreffen, wo auch die besondere Mensur der Hörner in Richtung einer ähnlichen Klangwirkung zielt.

Wenn die Horngruppe auf dem rechten Flügel placiert ist, kann der 1. Bläser außen oder innen sitzen. Innen ist er den Solospielern der anderen Bläsergruppen näher, was den gegenseitigen Kontakt unterstützt, auch wird ein Unisono mit den Violoncelli sehr gut zur Geltung kommen. Wenn er außen sitzt, ist der 1. Hornist dagegen sehr gut von seiner Gruppe zu hören, er kann die tieferen Stimmen besser hinsichtlich der Intonation und einer einheitlichen Tonentwicklung mitziehen.

Öffnet sich der Bühnenraum trichterartig zum Saal hin oder laufen die Wände neben dem Podium zum Raum hin schräg auseinander (z. B. in einem Sechseckraum), so ist von einer Unterbringung der Hörner auf der linken Seite des Orchesters abzuraten. Die ausgeprägten Seitenwandreflexionen gelangen, da der Instrumentalkörper jetzt praktisch auf beiden Seiten eine offene Flanke hat, ungehindert in den Saal, wo die Hörner dementsprechend auf einem Teil der Zuhörerplätze wesentlich lauter und schärfer klingen, als es der Dirigent erwartet und als es in anderen Platzgruppen im Publikumsbereich der Fall ist. Diese Unausgeglicheneheit der Hörner im Raum ist weit geringer, wenn die Hörner rechts sitzen. Der offenen Flanke des Orchesters kehren sie jetzt ihre Seite der geringsten Schallabstrahlung zu; außerdem besteht bei der üblichen Aufstellung der Streicher die Möglichkeit, die Kontrabässe so weit nach hinten zu ziehen, daß sie die Hörner zur Seite hin noch teilweise abschatten.

Spielen für Konzertaufführungen die raumakustischen Gegebenheiten eine wichtige Rolle, so kommen bei Aufnahmen für Rundfunk und Schallplatte noch neue Gesichtspunkte hinzu, die sich aus der Mikrophon-Aufstellung und der klanglichen Wirkung der Lautsprecherwiedergabe ergeben. Es ist deshalb durchaus möglich, daß der Aufnahmeleiter eine andere Placierung wünscht, als sie derselbe Dirigent mit demselben Orchester im gleichen Raum für öffentliche Konzerte für richtig hält. So sitzen beispielsweise die Hörner der Wiener Philharmoniker im großen Musikvereinssaal normalerweise rechts schräg neben den Fagotten beziehungsweise Trompeten. Dieser Platz ist nach den obigen Betrachtungen als besonders vorteilhaft für die Entfaltung des typischen Wiener Hornklanges anzusehen und wird auch von den Hornisten selbst als der günstigste angesehen. Für Schallplattenaufnahmen einer bekannten europäischen Gesellschaft werden die Hörner jedoch von den übrigen Blechbläsern und den Fagotten getrennt am linken Ende des Orchesters placiert. Hinter ihnen werden zusätzliche Paravents aufgestellt, um die Reflexionen zu beeinflussen. Damit läßt sich einerseits natürlich die Stereowirkung zwi-

schen den Blechbläsergruppen erhöhen, andererseits durch die Art der Reflektoren der Klang der Hörner variieren. Vor allem bietet die Trennung die Möglichkeit, die Instrumentengruppen über eigene Mikrophone aufzunehmen und in ihrer Intensität am Mischpult auszubalancieren. Dabei werden auch die Schwierigkeiten umgangen, die sich aus den unterschiedlichen Abstrahlrichtungen der Hörner einerseits sowie der Trompeten und Posaunen andererseits ergeben. Natürlich könnte man ebenso gut die Hörner rechts und das schwere Blech links unterbringen, wobei dann der Kontakt zwischen Hörnern und Fagotten besser wäre und die Hörner weniger obertonreich klängen. Die Spieler empfinden eine Anordnung der Hörner neben den anderen Blechgruppen insofern als angenehmer (gegenüber einer Aufstellung hintereinander), als sie im forte von den Posaunen nicht so leicht verdeckt werden können und sich auch selbst besser hören.

Im Orchestergraben der Opernhäuser verlangt die räumliche Ausdehnung der für die Spieler zur Verfügung stehenden Fläche eine grundsätzliche Umorientierung der Sitzordnung. Im allgemeinen nehmen die Streicher den Mittelteil ein, die Holzbläser und Hörner schließen sich nach links an, das schwere Blech und das Schlagzeug nach rechts. Diese Trennung der Blechgruppen ist sicherlich oft vorteilhaft, einerseits weil der Klang eines großen Blechsatzes nicht nur aus einer Ecke kommt, sondern an Breite gewinnt, andererseits weil die Hörner kompositorisch vielfach mit den Holzbläsern verbunden sind. Eine Erhöhung gegenüber den davor sitzenden Musikern ist für die Reihe der Hörner meist nur in geringem Maße vorhanden, die Schallabstrahlung horizontal nach vorn wird deshalb größtenteils bereits im Orchestergraben absorbiert. Die rückwärtigen Vorzugsrichtungen des Schalles können nur gut in den Zuschauerraum gelangen, wenn eine geschlossene reflektierende Fläche vorhanden ist. Durch die Ausgänge des Orchestergrabens ist diese Bedingung nicht immer erfüllt, oft schließt sogar ein Vorhang diese Wand ab. In diesen Fällen wird naturgemäß eine starke Absorption auftreten, so daß für den Zuschauerraum nur die Abstrahlung nach rechts oben maßgeblich ist. Da sich dieses Maximum, wie Abb. 8 zeigt, bis nach vorn hinzieht, wird damit immer noch eine im Ganzen recht gute Schallverteilung in allen Publikumsbereichen gewährleistet. Lediglich wenn aus Platzgründen die Hörner bis unter eine Loge oder Vorbühne zurückgesetzt werden, wird eine Behinderung vor allem der höheren Klanganteile eintreten und der Klang zu matt (nicht unbedingt zu leise) werden. Bei einer derartigen räumlichen Situation ist deshalb ein Vorhang hinter den Hörnern fehl am Platze. Wenn man die Rückwandreflexion der Gesamtintensität wegen fürchtet, wäre gegebenenfalls die Anbringung eines Tiefenabsorbers, der höhere Frequenzen jedoch reflektiert, angebracht. Denn der Unterschied in der Klangwirkung am Dirigentenpult und im Zuschauerbereich ist naturgemäß im Opernhaus viel größer als im Konzertsaal. Gerade die unter einer Loge placierten Hörner werden davon be-

sonders betroffen. Im Parkett ist ihr Spektrum meist sehr stark beschnitten.

In Italien und Frankreich findet man heute auch noch eine Sitzordnung des Opernorchesters, bei der die Streicher links, alle Bläser rechts untergebracht sind. Bei großer Besetzung ist diese Aufstellung nicht sehr vorteilhaft, weil der Gesamtklang nicht immer ausgeglichen ist. Für die Hörner ist die Klantentfaltung ziemlich ungünstig (s. Abb. 8), was sich vor allem im Verhältnis zu den anderen Blechblasinstrumenten auswirkt. Anders ist die Situation allerdings bei Opern mit kleinerer Besetzung, wo kein Übergewicht der schweren Blech-Gruppe zu befürchten ist. Die historisch belegte Bläser-Streicher-Trennung [9] bis zur Zeit der frühen Romantik bietet zweifellos Vorteile, vor allem für den Streicherklang. Zudem gehen die Trompeten und Hörner gerade bei Mozart oft in einer Form zusammen, die eine räumliche Trennung fast verbietet. So verwundert es auch nicht, daß die Wiener Staatsoper diese Sitzordnung für Mozartopern verwendet.

Bei Bühnenmusiken kommt natürlich der Beschaffenheit der Dekoration eine große Bedeutung zu. In dem meist sehr halligen Bühnenhaus sind die Wände hart und reflektierend; die Leinwandkulissen sind dagegen schalldurchlässig, und zwar bevorzugt für die tiefen Frequenzen. Der Spieler hat deshalb den Eindruck, sehr obertonreich zu spielen, während der Klang im Zuschauerraum verhältnismäßig obertonarm ankommt. Je direkter der Schall durch die Bühnenöffnung gelangt, desto näher wirkt der Spieler, während der Nachhall die Entfernung vortäuscht. Diesen Effekt kann man beispielsweise bei den Jagdfanfaren der 12 Hörner im 1. Akt des „Tannhäuser“ ausnutzen. In größerer Besetzung wie beispielsweise in den Ballmusiken in verschiedenen Verdi-Opern ist die Klangwirkung der Hörner weniger kritisch.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen die Bühnenmusiken, bei denen die Spieler direkt auf der Szene stehen. Die Bankettmusik der drei Orchester in „Don Giovanni“ sei als Beispiel genannt. Um mit dem Menuett des ersten Orchesters nicht die beiden anderen Ensembles zu verdecken, sollte man es möglichst auf der rechten Seite der Bühne aufstellen. Auf der linken Seite besteht die Gefahr, daß die Hörner zu stark werden. Zusätzlich kann man die Streicher noch dadurch unterstützen, daß man Teile der Dekoration aus Holz herstellt und so Reflexionsflächen schafft. Müssen die Bläser trotzdem links stehen, so sollten sie möglichst weit mit der Stirze nach hinten gedreht werden, wo in diesem Fall Leinwandkulissen vorzuziehen wären. Ähnliches gilt auch für die umfangreiche „Banda“ in „Aida“. Allerdings löst sich das Problem für die meisten Opernhäuser dadurch, daß sie darauf verzichten, neben den Aida-Trompeten noch weitere 21 Bläser auf die Bühne zu bringen. Ebenso wird auch der Aufzug einer ganzen Militärkapelle in Gounods „Margarethe“ selten inszeniert. Doch ist gerade durch die Bewegung hier die Schwierigkeit gegeben, ungewünschte Reflexionen zu vermeiden. Wenn die Kapelle von hinten kommt, rechts steht

und schließlich nach links abrückt, wäre die größte Sicherheit gegeben. Dieser Gang müßte also schon bei der ersten Konzeption des Bühnenbildes berücksichtigt werden.

Die Abstrahlung des offenen Hornes

Als ein besonderer Klangeffekt wird von manchen Komponisten vorgeschrieben, das Horn mit aufgehobenem Schallbecher, also ohne eine dämpfende Hand darin, zu blasen. Die bekanntesten Beispiele dafür finden sich in den Sinfonien G. Mahlers; Abb. 12 zeigt einen Ausschnitt aus seiner 4. Sinfonie. Auch Strawinsky hat diesen Effekt verwendet. Bei den Spielern und den Dirigenten trifft die Spielanweisung „Schalltrichter auf“ jedoch häufig auf Widerstand, weil dabei die Intonation leidet und der Klang „roh“ wird [10, 11]. Andererseits gibt es auch Dirigenten, die aus eigener Interpretation eine derartige Spielweise verlangen, um den Jagdhorn-Charakter zu betonen (z. B. in C. Francks Sinfonischer Dichtung „Le Chasseur maudit“) oder um die Hörner im Gesamtklang besonders hervortreten zu lassen (z. B. in den Sinfonien von Tschaikowsky). Schließlich liegen auch bei den offen geblasenen Barockhörnern ähnliche Verhältnisse vor, so daß die Schallabstrahlung für das ungedämpfte Horn noch kurz betrachtet werden soll.

Die Messungen fanden, wie bereits erwähnt, mit einer künstlichen Anregung statt, so daß kontinuierlich registrierte Polardiagramme gewonnen wurden. Aus diesen wurden in üblicher Weise die Halbwertsbreite (0... - 3 dB) und der Amplitudenbereich von 0... - 10 dB ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abb. 13 dargestellt; es handelt sich dabei um eine Meßebeine in Richtung der Achse des Schalltrichters. Man kann nämlich für die Praxis näherungsweise davon ausgehen, daß die Charakteristik um diese Achse herum rotationssymmetrisch ist, so daß die Diskussion einer Ebene genügt. Der Mikrophonabstand vom Instrument betrug auch hier 3,5 m.

Die Halbwertsbreite ist bis etwa 180 Hz als rund anzusehen. Daß diese Grenze höher liegt als bei der Messung mit Spieler, hängt mit dessen abschattender und schallumlenkender Wirkung zusammen. Er vergrößert bei normaler Haltung des Instruments gewissermaßen die Ausdehnung der Schallquelle. Zwischen 180 und 400 Hz ändern sich die 3 dB-Bereiche von Ton zu Ton, auch treten teilweise noch Nebenmaxima auf, die ebenfalls weniger als 3 dB unter dem Hauptmaximum liegen. In diesem Frequenzbereich wurde deshalb aus den Breiten der Teilgebiete starker Schallabstrahlung eine Winkelsumme gebildet; für die Resultate ist dann ein Streufeld im Diagramm eingetragen. Da nämlich die Intensität der Nebenmaxima schwankt, ragen diese teilweise noch in das Halbwertsgebiet hinein, teilweise liegen sie jedoch knapp darunter. Deshalb läßt sich für diesen Frequenzbereich das Ergebnis nicht durch eine einfache Kurve darstellen.

Oberhalb 400 Hz treten die Nebenkeulen der Richtcharakteristiken zurück, so daß wieder ein übersichtlicher Ver-

Abb. 12 Partiturausschnitt aus dem 3. Satz der 4. Sinfonie von G. Mahler, beginnend 36 Takte vor dem Schluß (ohne Streicher und Harfe)

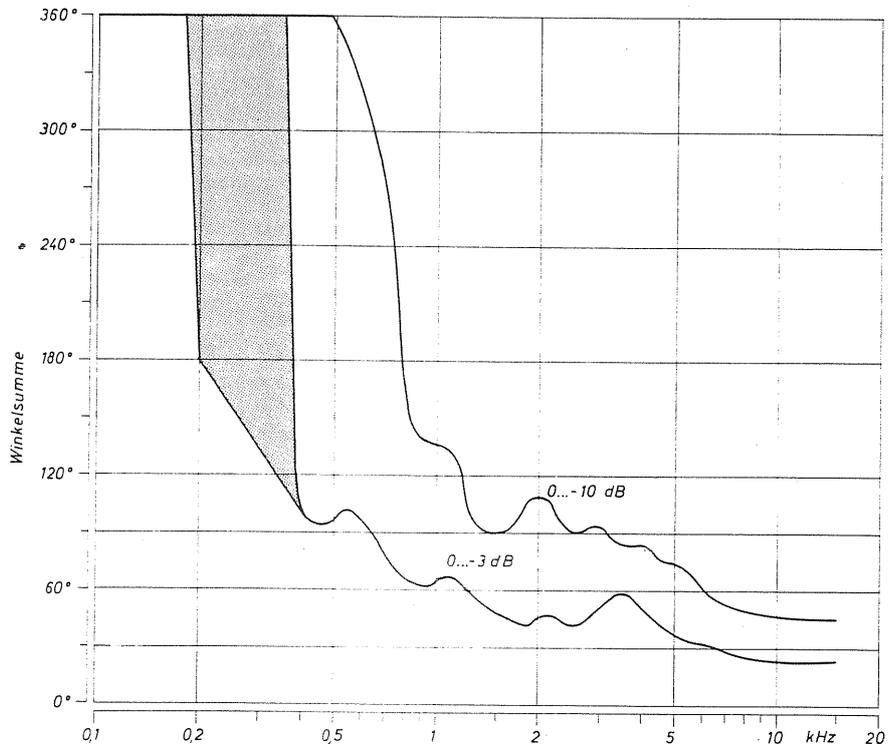


Abb. 13 Winkelsumme für die 3 dB- und 10 dB-Bereiche der Richtcharakteristiken bei elektrodynamischer Anregung (Horn ohne Bläser)

Abb. 14 Partiturausschnitt aus dem 3. Satz der 5. Sinfonie von P. Tschaikowsky, Takt 37 ff.

lauf entsteht. Von etwa 90° in diesem Frequenzbereich fällt die Halbwertsbreite bis auf 22° bei den höchsten Obertönen ab. Die Welligkeit des Kurvenzuges hängt mit den Abstrahlungseigenschaften des Trichters zusammen: die Maxima liegen etwa dort, wo der Außendurchmesser einer halben, ganzen, doppelten und dreifachen Wellenlänge entspricht. Die Kurve für 0... - 10 dB verläuft bis etwa 500 Hz bei 360° und fällt dann ziemlich schnell auf etwa die doppelten Werte der Halbwertsbreite ab. Die Unterschiede in der Form der beiden Kurven kommen dadurch zustande, daß die Richtkeule selbst durch das Ablösen von einzelnen Seitenmaxima mit steigender Frequenz ihre Form ändert.

Der Klang des ungedämpften Hornes ist naturgemäß sehr obertonreich, vor allem bei starkem Anblasen. Diese hohen Frequenzen sind jedoch in einem sehr engen Winkel gebündelt, wie Abb. 13 deutlich macht. Bei der sehr steilen Haltung des Instrumentes in dieser Spielart ergibt sich für die Klanganteile von etwa 1500 Hz an aufwärts eine auf die Decke über dem Orchester gerichtete Schallabstrahlung. Die Reflexionen von hier werden wohl bei den Spielern und dem Dirigenten einen klanglichen Effekt spürbar werden lassen, auf den Zuhörerplätzen jedoch nur wenig zur Geltung kommen. Infolgedessen erscheint auch unter dem Gesichtspunkt der Klangabstrahlung diese Spielweise als nicht besonders lohnend - es sei denn, man versucht durch eine etwas flachere Haltung über eine Rückwandreflexion die Wirkung im Saal zu erhöhen.

Die Abstrahlung des gestopften Hornes

Ein anderer Klangeffekt wird von den Hornisten dadurch erzeugt, daß die rechte Hand fest in den Schalltrichter gepreßt wird, um das konische Rohr möglichst gut abzuschließen. Diese mit der Spielanweisung „gestopft“ vorgeschriebene Technik nimmt dem Klang seine Kraft, erhöht aber andererseits den metallischen Eindruck des Timbres. Wie frühere Untersuchungen gezeigt haben [8], werden vor allem die Klanganteile zwischen 800 und 2000 Hz stark bedämpft, während die höheren Komponenten bis über 10 000 Hz hinaus an Intensität zunehmen. Auch bei tiefen Frequenzen werden nicht so hohe Amplituden wie beim normalen Blasen erreicht. Ein typisches Beispiel für die gestopften Hornklänge stellt der in Abb. 14 wiedergegebene Ausschnitt aus dem Walzer der 5. Sinfonie von Tschajkowsky dar. Die Hörner wirken hier mehr durch ihre Farbe als durch die Intensität des Klanges. Auch in den Opern von Wagner findet sich oft eine Verwendung der gestopften Hörner, beispielsweise zur Schilderung der Schmiedetätigkeit der Nibelungen.

Durch die Stopftechnik ändert sich auch die Richtcharakteristik der Klangabstrahlung etwas, wie schon aus den wenigen Beispielen in Abb. 2 zu erkennen ist. Zwar sind bis etwa 350 Hz keine Abweichungen gegenüber dem normalen Blasen festzustellen, mit zunehmender Frequenz tritt dann aber (in den nicht dargestellten Ebenen) nach oben hin eine Abflachung der

Charakteristik ein: bei 700 Hz hat diese Zone eine Ausdehnung von etwa $\pm 15^\circ$ um die Senkrechte herum, wobei die Amplituden im Mittel 5 dB unter dem Wert bei normalem Blasen liegen (bezogen auf den gleichen Maximalpegel in der Hauptabstrahlungsrichtung). Bei 1000 Hz erreicht dieses Gebiet schwächerer Schallversorgung über dem Spieler eine Breite von fast $\pm 75^\circ$, erstreckt sich also nach allen Seiten sehr weit hinunter. Gleichzeitig tritt auch in der Horizontalebene eine starke Konzentration der Energie auf das Hauptabstrahlungsgebiet auf, so daß die Amplituden im Winkelbereich zwischen 210° und 150° etwa 15 dB schwächer sind als in der normalen Charakteristik. Die Schallbündelung ist demnach in dem Frequenzbereich um 1000 Hz bei gestopften Tönen besonders stark ausgeprägt. Dagegen sind die Unterschiede bei 1400 Hz in der Horizontalebene schon wieder gering, nach oben ist die Intensität sogar um 5 dB höher als bei offenem Blasen.

Erst oberhalb 2000 Hz stellt sich nach oben wieder eine Abflachung der Charakteristik ein, die bis über 4000 Hz hinausragt, wobei in der Horizontalebene die Abstrahlung außerhalb des stärksten Gebietes ebenfalls schwächer ist als bei offenen Tönen. Die Modelle für 2500 Hz (in Abb. 3) lassen diesen Unterschied deutlich werden: die schwächere Abstrahlung in der Horizontalebene nach links hin liegt etwa um 10 dB unter den normalen Werten, über dem Spieler sinkt die Intensität durch das Stopfen um etwa 5 dB auf einer Breite von $\pm 60^\circ$ um die senkrechte Achse; die Hauptabstrahlung erfolgt sehr flach. Bei den höchsten Frequenzen dreht sich das Verhältnis um, was anscheinend damit zusammenhängt, daß beim Stopfen die Wandung des Instrumentes stärker an der Schallabstrahlung beteiligt ist. Bei 6300 Hz ist der Gesamtverlauf der Charakteristik für gestopfte Töne glatter, die Halbwertsbreite ist mehr als dreimal so groß wie beim offenen Blasen, die Vorzugsrichtungen liegen aber - wie schon bei 2500 Hz - sehr flach. Über dem Spieler ist die Intensität um etwa 3 dB höher als offen geblasen, bei 10 000 Hz steigt diese Erhöhung auf etwa 7 dB an. Auch vor dem Spieler sind die Amplituden bei gestopftem Blasen erheblich höher.

Zusammenfassend läßt sich über die gestopften Töne sagen, daß jene Klanganteile, die eine nasale Färbung bedingen (um 1400 Hz), sowie diejenigen, die das metallische Timbre ausmachen (oberhalb 6000 Hz), besonders vorteilhaft nach vorn und oben in den Saal abgestrahlt werden. Demgegenüber sind die Komponenten zwischen 700 und 1000 Hz sowie zwischen 2000 und 4000 Hz stärker gebündelt als bei offenem Blasen, wobei ihre Vorzugsrichtung trotz der dämpfenden Hand im wesentlichen durch den Schalltrichter bestimmt wird. Da das Fehlen oder nur schwache Auftreten der letzteren beiden Frequenzbereiche beträchtlichen Anteil an dem „wesenlosen Klang“ der gestopften Hörner hat, schwächen Reflexionen dieser Anteile durch die Rückwand hinter den Spielern den gewünschten Klang-Effekt im Saal etwas ab, abgesehen davon, daß sie natürlich die Gesamtlautstärke erhöhen.

Schlußbemerkungen

Vergleicht man die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen mit den nicht sehr umfangreichen Angaben über die Richtcharakteristiken, die sich in der Literatur finden [12, 13], so stellt man einige Abweichungen in den Resultaten fest. Der Grund dafür dürfte in der Tatsache zu sehen sein, daß die Diagramme bei Olson aus Messungen von D. W. Martin abgeleitet sind, der seinerseits jedoch nur die Schallverhältnisse in unmittelbarer Nähe des Trichters (bis maximal 1,2 m Abstand) untersucht hat [14], während in der vorliegenden Arbeit alle Experimente mit einem Mikrofon-Abstand von 3,5 m durchgeführt wurden. Diese größere Distanz führt für den überwiegenden Teil des Frequenzgebietes bereits zu Schallverhältnissen, die dem Fernfeld entsprechen, so daß die Ergebnisse als allgemeingültig für den Bereich der in der Praxis interessierenden Entfernungen angesehen werden können. Die Nahfeld-Untersuchungen von Martin lassen zwar Schlüsse über die Abstrahlungseigenschaften des Trichters zu und sind instrumententechnisch von Interesse, dürfen jedoch nicht ohne weiteres auf das Fernfeld übertragen werden.

Für die großzügige finanzielle Unterstützung der vorliegenden Untersuchungen, die im Rahmen eines größeren Forschungsauftrages der Forschungsgemeinschaft Musikinstrumente e. V. durchgeführt wurden, möchten die Verfasser sich herzlich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. bedanken. Besonderer Dank gebührt auch Herrn Kammermusiker R. Fricke vom Staatstheater Braunschweig für seine bereitwillige Mitwirkung und sein großes Entgegenkommen bei den umfangreichen Messungen. Schließlich möchten die Verfasser Herrn Prof. L. Kainz vom Wiener Philharmonischen Orchester für eine Reihe wertvoller Diskussionsbeiträge auch an dieser Stelle noch einmal danken.

Schrifttum

- [1] J. Meyer, Das Musikinstrument 14 (1965) S. 21
- [2] J. Meyer, Das Musikinstrument 15 (1966) S. 958
- [3] W. Krüger, Das Musikinstrument 17 (1968) S. 459
- [4] J. Meyer, Instr.-Bau-Z. 21 (1967) S. 3
- [5] H. Backhaus, Z. techn. Physik 13 (1932) S. 31
- [6] W. Lottermoser u. J. Meyer, Orgelakustik in Einzeldarstellungen Frkft. a. M. 1966
- [7] A. Rakowski, Bul. Soc. Amis Sc. et Lt. Poznan, Ser. B, 19 (1966) S. 157
- [8] J. Meyer, Das Musikinstrument 16 (1967) S. 32
- [9] H. Becker, Artikel „Orchester“ in MGG, Bd. 10, Kassel 1962
- [10] H. Kunitz, Die Instrumentation, Teil VI Horn, Lpz. 1961
- [11] F. Busch, Der Dirigent, Zürich 1961
- [12] H. F. Olson, Musical Engineering, New York 1952
- [13] W. Stauder, Artikel „Horninstrumente/Akustik“ in MGG, Bd. 6, Kassel 1957
- [14] D. W. Martin, Journ. Ac. Soc. Am. XIII (1942) S. 309