

**Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung  
von Blechblasinstrumenten**

Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr. -Ing.)

genehmigte

Dissertation

von Dipl. -Ing. Klaus Wogram

aus Kopenhagen

Eingereicht am:	26. Juli 1971
Mündliche Prüfung am:	17. April 1972
Berichterstatter:	Prof. Dr. -Ing. H. Schönfelder
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. M. Grützmacher

1972

Die vorliegende Arbeit wurde im Laboratorium für Musikalische Akustik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durchgeführt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schönfelder danke ich für sein Interesse sowie für die Übernahme des Hauptreferates bei dieser Arbeit. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. M. Grütz-  
macher für zahlreiche aufschlußreiche Diskussionen und die Übernahme des Korreferates.

Den Herren Prof. Dr. H.G. Diestel, Prof. Dr. W. Lottermoser sowie Herrn Dr.-Ing. J. Meyer danke ich für die bereitwillige Unterstützung der Arbeit und die vielen Anregungen, die den Fortgang der Untersuchungen gefördert haben.

Allen Angehörigen der Abteilung Akustik - besonders meinen Kollegen des Laboratoriums für Musikalische Akustik - möchte ich auf diesem Wege meinen Dank für ihr großes Entgegenkommen aussprechen. Mein besonderer Dank gebührt Herrn K. Heim, der die mechanischen Arbeiten sowie die Zeichnungen mit großer Mühe und Sorgfalt ausführte.

Für die Finanzierung der Untersuchungen bin ich dem Bundesverband der Deutschen Musikinstrumentenhersteller, insbesondere Herrn Dr.-Ing. G. Zimmermann zu großem Dank verpflichtet.

Ganz besonders herzlich danke ich meiner lieben Frau für ihre Geduld und ihr Verständnis, das sie mir während der Anfertigung dieser Arbeit entgegenbrachte.

K. Wogram

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Aufbau und Wirkungsweise von Blechblasinstrumenten	9
2. <u>Meßverfahren für experimentelle Untersuchungen</u>	11
2.1 Bisher verwendete Meßverfahren	11
2.1.1 Nachbildung der schwingenden Lippen	12
2.1.2 Ankopplung an Lautsprecher über Drahtleitung	12
2.1.3 Ankopplung an Lautsprecher über Kapillarrohrchen	13
2.2 Neuentwickelte Meßverfahren	14
2.2.1 Vorversuche	14
2.2.1.1 Ermittlung der Stimmung mit Hilfe von Musikern	14
2.2.1.2 Reziproke Anregung mit Lautsprecher-schall	16
2.2.1.3 Anregung mit Impulsen	17
2.2.1.4 Bestimmung der Eingangsimpedanz	17
2.2.2 Entwicklung einer künstlichen Anblasvorrichtung	21
2.2.2.1 Konstruktionsgrundlagen	21
2.2.2.2 Prototyp der Anblasvorrichtung	24
2.2.2.3 Verbesserte Anblasvorrichtung	26
2.2.3 Meßaufbauten, die für die Untersuchungen verwendet wurden	28
2.2.3.1 Meßaufbau für die Stimmung	29
2.2.3.2 Meßaufbau für die Eingangsimpedanz	31
3. <u>Meßergebnisse und ihre Deutung</u>	32
3.1 Einfluß von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Stimmung	32
3.2 Zusammenhang zwischen Eingangsimpedanz und Stimmung	35

3.2.1 Impedanzkurven	35
3.2.2 Stimmungskurven mit der Anblasvorrichtung	36
3.2.3 Das "Summenprinzip"	38
3.3 Rechnerische Ermittlung der Stimmung eines Blechblasinstrumentes	41
3.3.1 Berechnung der Eingangsimpedanz	41
3.3.2 Anwendung des Summenprinzips	48
3.4 Einfluß der Bauelemente auf die Stimmung	49
3.4.1 Verhältnis von Konus zu zylindrischem Teil	50
3.4.1.1 Instrument nur zylindrisch	50
3.4.1.2 Instrument nur konisch	51
3.4.1.3 Instrument kombiniert zylindrisch- konisch	54
3.4.2 Mundstück und Mundrohr	56
3.4.2.1 Vereinfachte Darstellung des Mund- stückes	56
3.4.2.2 Einfluß des Kesselvolumens	58
3.4.2.3 Einfluß des Mundstückshalses	59
4. <u>Zusammenfassung</u>	61
5. <u>Literaturverzeichnis</u>	63
6. <u>Bildteil</u>	

Zusammenstellung der verwendeten Symbole, ihre Dimension  
und Bedeutung

Symbol	Dimension	Bedeutung
b	cm <sup>-1</sup>	Hilfsgröße in Gl. (3.10)
BZO, BZAO	gcm <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	Betrag einer Impedanz
c	cms <sup>-1</sup>	Schallgeschwindigkeit
C	gcm <sup>-4</sup> s <sup>-2</sup>	Federsteifigkeit
D	cm	Durchmesser
f, f <sub>o</sub> , f <sub>M</sub> , f <sub>T</sub> , f <sub>h</sub>	s <sup>-1</sup> = Hz	Frequenz
Δf	s <sup>-1</sup> = Hz	Intervallbreite
F <sub>L</sub>	cm <sup>2</sup>	Fläche
J <sub>1</sub>	-	Besselfunktion erster Ordnung
j	-	$\sqrt{-1}$
K, K <sub>m</sub> , K <sub>L</sub>	gcms <sup>-2</sup>	Kraft
K <sub>1</sub>	-	Rayleigh-Funktion
l, l <sub>1</sub> , l <sub>2</sub> , l <sub>H</sub>	cm	geometrische Länge
m	-	ganze Zahl
m	cm <sup>-1</sup>	Steigungsmaß
M, MO	gcm <sup>-4</sup>	spez. mitschwingende Masse
n	-	ganze Zahl
N, NO	cm <sup>4</sup> s <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	Nachgiebigkeit
P, P <sub>a</sub> , P <sub>e</sub> , P <sub>M</sub> , P <sub>o</sub>	gcm <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	Schalldruck
P	gcm <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	Schalleistung
r	cm	Radius (Trichteranfang)
R	cm	Radius (Trichterausgang)
S, S <sub>a</sub> , S <sub>e</sub> , S <sub>o</sub>	cm <sup>2</sup>	Fläche
S <sub>R</sub> , SAR	gcm <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	Summe von Impedanzrealteilen
t, t <sub>o</sub> , t <sub>z</sub>	s	Zeit
T	s	Periodendauer
u	cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Volumenstrom oder Schallfluß
v	cms <sup>-1</sup>	Schallschnelle
V	cm <sup>3</sup>	Volumen
x	cm	laufende Längenkoordinate

$\zeta$	$\text{gcm}^{-4}\text{s}^{-1}$	komplexe Impedanz
$Z, Z_R, Z_{OR}$	$\text{gcm}^{-4}\text{s}^{-1}$	Wellenwiderstand oder Realteil einer Impedanz
$\alpha$	$\text{cm}^{-1}$	Dämpfungskonstante
$\beta$	$\text{rad cm}^{-1}$	Phasenkonstante
$\gamma$	$\text{cm}^{-1}$	komplexes Übertragungsmaß
$\Theta$	rad oder Grad	Hilfsgröße in Gl.(3.10) und (3.17)
$\varphi, \varphi_0, \varphi_u, \varphi_r$	rad oder Grad	Phasenwinkel
$\lambda, \lambda_u, \lambda_0$	cm	Wellenlänge
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	Kreisfrequenz
$\rho$	$\text{gcm}^{-3}$	spez. Dichte der Luft

## 1. Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

Die geschichtliche Entwicklung der Blechblasinstrumente ist geprägt durch das handwerkliche Können der Instrumentenmacher, die bemüht sind, die wachsenden Ansprüche der Musiker und Komponisten an die Instrumente durch Veränderung der Bauform zu befriedigen. Durch das Fehlen physikalischer Grundlagen waren die Instrumentenmacher gezwungen, auf Neukonstruktionen zu verzichten und statt dessen die schon bestehenden Instrumente empirisch im Detail zu verbessern. Dabei spielte die ästhetische Formgestaltung oft eine größere Rolle als die klangliche Wirksamkeit der Veränderungen.

Nicht allein die Unkenntnis der physikalischen Grundlagen sondern auch der Einfluß des Musikers auf die Qualität des Blechblasinstrumentenklanges erschweren die objektive Beurteilung dieser Instrumente. Im Gegensatz zu sämtlichen anderen Instrumentengattungen wird der Klang beim Blechblasinstrument durch die Schwingungen von nicht zum Instrument gehörenden Elementen, nämlich den Bläserlippen erzeugt. Er ist somit abhängig von den physischen Merkmalen des Musikers, wie Zahnstellung, Lippenkraft usw. Diese Eigenheiten muß der Instrumentenmacher bei der Anfertigung und auch beim Verkauf eines Instrumentes berücksichtigen. Das hinderte ihn daran, allgemeingültige Qualitätsmerkmale zu erarbeiten, denn es war ihm nicht möglich, die Eigenschaften eines Instrumentes ohne die Hilfe eines Musikers zu bestimmen. In bisher veröffentlichten physikalischen Untersuchungen über Blechblasinstrumente [1] ... [7] haben die Autoren versucht, die Kopplung zwischen Instrument und Bläser zu lösen und das Instrument gesondert zu betrachten. Es ergab sich dabei jedoch stets zwischen den gemessenen und den geblasenen Tonfrequenzen eine Diskrepanz, die nicht geklärt werden konnte.

Die Parameter, die die Qualität eines Blechblasinstrumentes bestimmen, sind neben der handwerklichen Verarbeitung vor allem

Ansprache, Klangfarbe und Stimmung. Unter Stimmung versteht man dabei die Zuordnung der Grundtonfrequenzen der beim Blasen entstehenden Klänge zu den entsprechenden Tonfrequenzen einer musikalischen, meist temperierten Tonleiter. Stimmungsabweichungen werden in Cent angegeben; dabei entsprechen 100 Cent einem temperierten Halbtonschritt.

Durch die Verschiedenartigkeit mehrerer Bläser ist es nahezu unmöglich, die Stimmung eines Instrumentes unter Mitwirkung von Musikern reproduzierbar zu erfassen. Es ist daher erforderlich, objektive Meßmethoden zu schaffen, nach denen reproduzierbare Ergebnisse gewonnen werden können, ohne dabei den Einfluß des Musikers zu vernachlässigen.

Der Zweck dieser Arbeit ist es, derartige Meßverfahren zu entwickeln und den Einfluß des Musikers auf die Resonanzlage seines Instrumentes zu klären. Außerdem wird geprüft, ob die Möglichkeit besteht, die beim Blasen entstehenden Tonfrequenzen rechnerisch zu bestimmen. Dabei werden die Einflüsse der einzelnen Instrumententeile auf die Stimmung diskutiert.

### 1.2 Aufbau und Wirkungsweise von Blechblasinstrumenten

Die Blechblasinstrumente bestehen aus einer Kombination von zylindrischen und konischen Messingrohren sowie einem Trichter am Schallaustrittsende; für die Ankopplung des Bläasers dient ein ebenfalls aus Messing hergestelltes Mundstück. Aufgrund ihrer äußeren Form kann man zwei Instrumentengruppen unterscheiden. Die eine Gruppe besteht aus den sogenannten konischen Instrumenten, das sind z.B. Kornett, Flügelhorn und Tuba; ihnen gemeinsam ist ein großer Anteil an konischen Rohrteilen bezogen auf die Gesamtlänge. Die zweite Gruppe bilden die zylindrischen Instrumente, bei denen der zylindrische Rohrteil, bezogen auf die Gesamtlänge überwiegt; hierzu gehören Trompete, Posaune und Sousaphon. Der Tonumfang der Blechblasinstrumente reicht von der Contrabasslage eines Sousaphons, dessen tiefster Ton  $A_2$  bei etwa 27 Hz liegt, bis zur Diskantlage einer Hoch-B-Trompete, deren höchster Ton  $f^3$  eine Frequenz von etwa 1400 Hz hat.

Um die Untersuchungen in dieser Arbeit möglichst übersichtlich und allgemeingültig zu gestalten, wurde ein Instrument der mittleren Tenorlage, nämlich eine Posaune, ausgewählt; sie ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Durch ihre lange gestreckte Form ist die Tenorposaune besonders einfach in ihrem Aufbau. Das Mundstück, gegen dessen Rand die Bläserlippen gedrückt werden, besteht aus Kessel, Bohrung und Hals. Den Übergang zwischen dem konischen Mundstückshals und dem zylindrischen Zug bildet oftmals ein konisches Mundrohr. Dem zylindrischen Zug folgt das Schallstück, das aus konischem Verbindungsrohr, Stimmzug und Schalltrichter zusammengesetzt ist.

Beim Anblasen eines Blechblasinstrumentes wirken die Lippen des Spielers wie ein Tor, dessen Flügel von Federkräften in die geschlossene Ruhelage gedrückt werden. Diese Modellvorstellung ist in Bild 2 veranschaulicht. Die Torflügel bzw. Lippen haben eine Masse, die durch die Feder bzw. Muskelkraft gehalten wird. Die Lippen stellen also ein schwingungsfähiges System dar, das durch Veränderung der Muskelkraft abgestimmt werden kann.

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  sei die Kraft  $K_m$ , die durch den Luftdruck im Munde des Bläfers auf die Lippen wirkt, etwas kleiner als die Muskelkräfte  $K_L$ , die die Lippen geschlossen halten. Wird der innere Luftdruck gesteigert, so wächst auch  $K_m$  an, bis  $K_m = K_L$  geworden ist. Zu diesem Zeitpunkt öffnen sich die Lippen, und der Überdruck kann aus der Mundhöhle entweichen. Dadurch baut sich der Druck im Munde ab, und die Lippenkraft  $K_L$  wird größer als  $K_m$ . Die Lippen schließen sich wieder, und der Vorgang beginnt von neuem. Sind die Lippen als Feder-Masse-System auf die Frequenz  $f_L$  abgestimmt, so ist die Schwingbewegung rein sinusförmig, d.h. auch die Öffnungsfläche  $F_L$  zwischen den Lippen hat einen zeitlich sinusförmigen Verlauf [ 1 ].

Die ausströmende Luft wird im Takte der Schwingbewegung durchmoduliert und regt mit ihrem oszillierenden Anteil die angrenzende Luftsäule im Instrument zu Schwingungen an. Ist das Instrument auf die Schwingfrequenz der Lippen abgestimmt, so bildet sich zwischen Lippen und Trichterende eine stehende Welle, der durch die Schallabstrahlung am Ende Energie entzogen wird.

Zur Vereinfachung der Darstellung und Erläuterung von akustischen Vorgängen wird im allgemeinen eine Analogiebetrachtung zur Nachrichtentechnik gewählt, die es ermöglicht, mit elektrischen Ersatzschaltbildern zu arbeiten. Bei den Untersuchungen dieser Arbeit wird folgende Analogie angewandt:

Schalldruck	$p$	$\hat{=}$	Spannung $\mathcal{U}$
Schallfluß oder Volumenstrom	$u$	$\hat{=}$	Strom $\mathcal{I}$
Impedanz	$\mathcal{Z}$	$\hat{=}$	Impedanz $\mathcal{Z}$
Masse	$M$	$\hat{=}$	Induktivität $L$
Nachgiebigkeit	$N$	$\hat{=}$	Kapazität $C$

Mit dieser Analogie kann man den Bläser mit seinem angekoppelten Instrument als einen sehr einfachen elektrischen Kreis betrachten. In Bild 3 ist dieses Ersatzschaltbild dargestellt, in dem die akustischen Grundgrößen beibehalten worden sind.

Die Schallquelle entspricht durch die Strömungsmodulation einem Strom-Generator, dessen Innenwiderstand  $\mathcal{Z}_M$  wegen der geringen Größe der mittleren Lippenspaltfläche als hochohmig anzunehmen ist ( $|\mathcal{Z}_M| > 300 \text{ g/cm}^4\text{s}$ ). Die von der Schallquelle abgegebene Energie wird von der Eingangsimpedanz des angekoppelten Instrumentes aufgenommen, das eine akustische Leitung bildet. Die stehende Welle auf dieser Leitung weist am Ort der Lippen einen Druckbauch und am Trichterende wegen der geringen Größe des Strahlungswiderstandes [ 11 ] näherungsweise einen Druckknoten auf. Diese Annahme wird durch zahlreiche Messungen an einem Waldhorn bestätigt [ 6 ]. Die an das Instrument abgegebene akustische Leistung ist  $P = u^2 \cdot \mathcal{Z}_{OR}$ , sie weist also immer dann Maxima auf, wenn auch der Realteil des Eingangswiderstandes  $\mathcal{Z}_{OR}$  des Instrumentes einen Maximalwert erreicht.

Blechblasinstrumente haben also die Aufgabe, die hochohmige Schallquelle (Bläser) an den niederohmigen Außenraum anzupassen. Ähnlich wie bei Druckkammerlautsprechern verwendet man deshalb Trichter, die je nach Funktion ihrer Flächenänderung eine Anpassung an den Schallwellenwiderstand des freien Mediums erzielen. Als Beispiel sind in Bild 4 die berechneten Eingangswiderstände mehrerer Trichter als Funktion der Frequenz aufgetragen. Dabei handelt es sich um unendlich lange Trichter, die den gleichen Eintrittsquerschnitt und einen gemeinsamen Radius bei  $l = 100 \text{ cm}$  aufweisen.

## 2. Meßverfahren für experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Bisher verwendete Meßverfahren

Anders als bei den Holzblasinstrumenten, bei denen ein dünnes Holzblättchen oder Doppelrohrblatt die Schallschwingungen verursacht, wird der Klang eines Blechblasinstrumentes durch die Schwingungen der menschlichen Lippen erzeugt. Durch dieses Prinzip der Klangerzeugung werden experimentelle Untersuchungen sehr erschwert. Objektive Meßergebnisse können deshalb nur erzielt werden, wenn statt des Bläfers eine Ersatzschallquelle verwendet wird. In bisher veröffentlichten Arbeiten ist eine Vielzahl von Ersatzschallquellen entwickelt worden, die sich

jedoch zu einem großen Teil sehr ähnlich sind. Aus der Literatur sind deshalb drei charakteristische Meßverfahren ausgewählt worden, die im folgenden erörtert werden.

### 2.1.1 Nachbildung der schwingenden Lippen

Seit Beginn der Untersuchungen an Blechblasinstrumenten hat man versucht, die schwingenden Lippen als Schallquelle durch Nachbildungen aus Gummi oder Kunststoff zu ersetzen [ 1, 8 ]. Über den Mundstücksrand wurden Gummi- oder Kunststofffolien gespannt, in denen in der Mitte ein Schlitz eingeschnitten war. Mit Druckluft wurde die geschlitzte Membran zu Schwingungen angeregt. Den schematischen Aufbau zeigt Bild 5. Bei geeigneten Größen von Masse und Federsteifigkeit begannen die Membranhälften wie die menschlichen Lippen zu schwingen. Eine Abstimmung der Schwingfrequenz ließ sich jedoch nur in geringem Maße durch Verspannen des Gummis erreichen. Die Autoren konnten bei einer Trompete nur wenige verschiedene Töne zum Klingen bringen, deren Grundtonfrequenzen aber nicht mit denen übereinstimmten, die sich aus den von einem Musiker geblasenen Naturtönen ergaben.

### 2.1.2 Ankopplung an einen Lautsprecher über eine Drahtleitung

Eine andere Methode der künstlichen Anregung geht davon aus, daß die Bläserlippen eine hochohmige akustische Impedanz darstellen. Um einen Lautsprecher als Schallquelle verwenden zu können, wurde eine "Drahtleitung" zwischen Lautsprecher und Instrument angebracht, über die die Schallenergie geleitet wurde [ 3 ]. Die "Drahtleitung" bestand aus einem Rohr, das mit einer Vielzahl dünner Kupferdrähte in Längsrichtung gefüllt war (Bild 6). Dadurch entstanden zwischen den Drähten enge Kanäle, die eine sehr hohe Reibungsdämpfung bewirkten. Diese Dämpfung verhinderte, daß sich stehende Wellen auf der Drahtleitung bildeten, die den Transport der Schallenergie stören könnten [ 9 ].

Der Lautsprecher wurde mit einem Sinus-Signal variabler Frequenz angeregt und die Frequenzen gesucht, bei denen der Schalldruck vor dem Instrumententrichter Höchstwerte erreichte. Diese Frequenzen waren identisch mit der Lage der Impedanzmaxima des Instrumentes, entsprachen jedoch nicht den von einem Bläser erzeugten Naturtonfrequenzen. Diese Abweichungen wurden von den Autoren mit dem Unterschied zwischen den Innenwiderständen von Bläser und Drahtleitung erklärt.

### 2.1.3 Ankopplung an einen Lautsprecher über ein Kapillarröhrchen

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten bestand darin, einen Lautsprecher über ein Rohr an das Instrument anzukoppeln. Um dieser Schallquelle einen sehr hohen Innenwiderstand zu verleihen, war es notwendig, die Querabmessungen des Rohres klein zu halten [ 11 ]. In einer Arbeit von Webster [ 2 ] wurde der Durchmesser dieses Kapillarröhrchens zu 1 mm gewählt. Die Annahme des Autors, daß die stehende Welle im Instrument genau in der Mundstücksbohrung einen Druckbauch aufweist, führte dazu, das Kesselvolumen zu vernachlässigen, und das Kapillarröhrchen genau in der Ebene der Bohrung münden zu lassen [ 2, 10 ]. Bild 7 zeigt die Prinzipskizze dieser Ankopplung.

Bei der Ermittlung der Resonanzfrequenzen wurden mit diesem Verfahren wieder die Frequenzen bestimmt, bei denen die Eingangsimpedanz des Instrumentes - jetzt allerdings ohne Mundstückskessel - Maximalwerte erreichte. Diese Frequenzen entsprachen etwa den Grundtonfrequenzen der geblasenen Klänge, so daß das Verfahren zur Stimmungsmessung geeignet erschien. Betrachtet man die gemessenen Stimmungsverläufe der Trompeten in der zitierten Arbeit etwas genauer, so findet man die größten Abweichungen bei den tiefen Frequenzen. Werden mit diesem Verfahren z.B. Posaunen untersucht, bei



denen im Gegensatz zu den Trompeten auch die Resonanzfrequenzen der niedrigsten Ordnungszahl, die sog. Pedaltöne angeblasen werden, so werden die Abweichungen noch beträchtlich vergrößert. Zudem muß als Nachteil gewertet werden, daß bei dieser Meßmethode keine Möglichkeit besteht, den Einfluß des Mundstückskessels auf die Stimmung zu erfassen.

## 2.2 Neuentwickelte Meßverfahren

### 2.2.1 Vorversuche

Die aus der Literatur bekannten Meßverfahren haben gezeigt, daß mit ihnen keine genaue Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten beliebiger Art möglich ist. Die Entwicklung einer mechanischen Anblasvorrichtung erforderte deshalb einige grundsätzliche Voruntersuchungen über die mit Musikern gewonnene Stimmung eines Instrumentes und dessen Eingangsimpedanz. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden zudem Meßverfahren erprobt, die auf dem Gebiet der Akustik üblich sind und bei der Prüfung verschiedener akustischer Systeme verwendet werden.

#### 2.2.1.1 Ermittlung der Stimmung mit Hilfe von Musikern

Für die Entwicklung objektiver Meßverfahren war es erforderlich, zunächst die Stimmung eines Instrumentes zu ermitteln, wenn es von Musikern angeblasen wird. Für eine entsprechende Versuchsreihe wurde ein Tenorposaune verwendet, wie sie häufig in Tanzorchestern gespielt wird. Der Zug des Instrumentes wurde in der Ruhelage festgeklemmt, so daß nur die Naturtöne des "ersten Zuges" geblasen werden konnten. Eine Reihe von Berufsmusikern wurden gebeten, die Naturtöne des Versuchsinstrumentes anzublase. Dabei sollten sie versuchen, diejenigen Tonfrequenzen zu finden, bei denen sie die geringste Anstrengung aufbringen mußten.

Diese Forderung, sich ganz auf das Instrument einzustellen und keine Rücksicht auf das eigene Klangempfinden zu nehmen, ist von einem Berufsbläser nicht leicht zu erfüllen. Er ist es gewohnt, den Klang und die Stimmung seines Instrumentes durch Veränderung der Lippenanspannung dem Klang bzw. der Stimmung des übrigen Orchesters anzupassen. Im Gegensatz zur amerikanischen Literatur, in der

häufig Amateure für derartige Versuche bevorzugt wurden, erscheint es dennoch günstiger, die Messungen mit professionellen Bläsern durchzuführen. Denn ein Amateur besitzt meistens keine ausreichende Lippenkraft, um die Tonhöhe zu variieren und sich dem Instrument anzupassen. Außerdem ist sein Tonumfang aus den gleichen Gründen wesentlich geringer, so daß der untersuchte Frequenzbereich stark eingeschränkt werden müßte.

Unter gleichbleibenden Bedingungen wurde die Stimmung des Versuchsinstrumentes mit jedem der fünf Musiker aufgenommen. Die Meßreihen erstreckten sich dabei auf mehrere Tage, um die Reproduzierbarkeit zu prüfen. Dabei wurden die Grundtonfrequenzen der geblasenen Klänge mit denen der musikalischen Tonleiter gleichmäßig temperierter Stimmung verglichen und die Abweichungen in Cent über der Ordnungszahl des Naturtones aufgetragen. Bei der temperierten Skala wird eine Oktave in zwölf gleiche Halbtöne unterteilt. Bei jedem Halbtonintervall ist das Frequenzverhältnis der oberen zur unteren Intervallgrenze gleich  $\sqrt[12]{2}$  oder 100 Cent. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erwies sich als sehr gering, d.h. es ergaben sich bei einem Musiker sogar an ein und demselben Tage sehr unterschiedliche Stimmungskurven. Bild 8 zeigt die mittlere Stimmungskurve der Versuchsposaune mit Streubereich, wenn das Instrument von einem einzigen Musiker mehrmals hintereinander angeblasen wird. Die Unterschiede, die bis zu 30 Cent erreichen, lassen erkennen, daß die Beurteilung des Instrumentes durch den Musiker zu jedem Zeitpunkt anders ausfallen würde.

Wesentlich stärker noch ist die Streuung, wenn man die Ergebnisse mehrerer Musiker miteinander vergleicht. Um dennoch eine Stimmungskurve zu erhalten, die für das Instrument mit dem verwendeten Mundstück charakteristisch ist, wurden sämtliche Ergebnisse arithmetisch gemittelt. In Bild 9 ist diese Mittelwertkurve mit den Streubereichen wiedergegeben, sie wird im folgenden stets als echte Stimmungskurve der Versuchsposaune angesehen.

### 2.2.1.2 Reziproke Anregung mit Lautsprecherschall

Beim Anblasen eines Metallblasinstrumentes schwingen die Lippen um eine Ruhelage, und die dabei freiwerdende Fläche  $S$  ändert sich sinusförmig.

$$S = S_0 (1 + \sin \omega t)$$

Betrachtet man den Bläser als Schallquelle, so ist sein Innen-Widerstand nicht konstant, sondern er schwankt zwischen dem Wert "unendlich" bei geschlossenen Lippen ( $\omega t = -\frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{2} \dots$ ) und einem Minimalwert, der durch die Größe der Fläche  $S = 2 S_0$  bei  $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$  bestimmt wird. Wenn sich die durch  $S_0$  gegebene mittlere Impedanz nachbilden ließe, müßte das Reziprozitätsgesetz für die Stimmungsprüfung von Blechblasinstrumenten anwendbar sein.

Bild 10 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau für die reziproke Anregung der Instrumente. Um ein diffuses Schallfeld zu vermeiden, wurden die Messungen im reflexionsfreien Raum durchgeführt. Ein Lautsprecher erzeugt ein Feld ebener Schallwellen gleitender Frequenz, die durch das Instrument in das Mundstück gelangen. An Stelle der Bläserlippen schließt eine feste Metallplatte das Mundstück ab. In der Plattenebene ist ein kleines Kondensatormikrophon montiert, mit dem der Schalldruck im Mundstück bestimmt werden kann. Zur Nachahmung der mittleren Bläserimpedanz sind in der Platte mehrere Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers angebracht, die verschlossen werden können.

Bei verschiedenen Lochflächen werden die Frequenzen gesucht, bei denen der Schalldruck im Mundstückskessel ein Maximum erreicht. Die Abweichungen dieser Frequenzen zu den geblasenen Tonfrequenzen nach Abschnitt 2.2.1.1 sind als Funktion der Lochfläche in Bild 11 aufgetragen. Man erkennt, daß bei schallhartem Abschluß (Fläche gleich Null) die Meßwerte stets zu tief liegen und mit Vergrößerung der Lochfläche ansteigen. Die Schnittpunkte der einzelnen Kurven mit der x-Achse ergeben die Lochflächen, die zu einer Übereinstimmung der gefundenen Resonanzen mit den geblasenen Werten führen. Ein

systematischer Zusammenhang zwischen Lochfläche und Tonhöhe besteht jedoch nicht, so daß diese Meßmethode nicht zur Ermittlung der Stimmung von Metallblasinstrumenten verwendbar zu sein scheint (Bild 12).

### 2.2.1.3 Anregung mit Impulsen

Die Resonanzfrequenzen eines akustischen Systems können ermittelt werden, wenn man es mit Schallimpulsen definierter Form anregt und die Impulsantwort mit dem ursprünglichen Signal vergleicht [12]. Schlägt man mit der flachen Hand auf den Mundstücksrand eines Blechblasinstrumentes, so erzeugt man damit einen Druckstoß im Mundstückskessel, der die Luftsäule im Instrument zu Schwingungen anregt. Das Schallsignal vor dem Trichter enthält dann Spektralkomponenten, die den Resonanzfrequenzen des Instrumentes entsprechen, wenn es am Mundstück schallhart abgeschlossen ist. Diese Frequenzen sind jedoch nicht identisch mit den geblasenen Tonfrequenzen. In Bild 12 sind die Stimmungsabweichungen aufgetragen, die bei einer derartigen Impulsanregung auftreten. Das Schallsignal wurde dabei mit einem Echtzeit-Spektrumsanalysator untersucht und die genaue Frequenzlage der einzelnen Komponenten durch Vergleich mit einem Sinusgenerator gemessen. Die Bilder 13 und 14 zeigen das Schallspektrum des Impulsklanges vor dem Trichter der Versuchsposaune. Wie man erkennt, lassen sich daraus die tiefsten Frequenzen kaum ermitteln, da ihr Pegel sehr niedrig ist.

### 2.2.1.4 Bestimmung der Eingangsimpedanz

In Analogie zur Elektrotechnik ist die Impedanz eines Systems definiert als Quotient aus Schalldruck und Volumenstrom:

$$Z = \frac{p}{u} \quad (2.1)$$

Dabei ist der Volumenstrom oder Schallfluß die Geschwindigkeit der Volumenverschiebung, also  $\frac{dV}{dt}$ , oder aber die Schallschnelle  $v$  multipliziert mit der Fläche  $S$ . In der Elektrotechnik ist es üblich, Spannung und Stromstärke nach

Betrag und Phase zu messen und daraus die Impedanz zu er-  
rechnen. Dieses Verfahren stößt in der Akustik auf Schwie-  
rigkeiten, da die Schallschnelle nicht mit einfachen Mitteln  
gemessen werden kann. Die Mikrophone, die in der akustischen  
Meßtechnik Verwendung finden, wirken aufgrund ihrer mechani-  
schen Konstruktion und ihrer elektrischen Schaltung als Druck-  
bzw. Druckgradientenempfänger. Alle jene Mikrophone, die als  
Druckgradienten- oder Schnelleempfänger bei Freifeldmessungen  
eingesetzt werden, weisen jedoch ungünstige geometrische Ab-  
messungen auf, die es nicht erlauben, diese Mikrophone für  
störungsfreie Schnellmessungen in engen Rohren bis herab zu  
Durchmessern von 4 mm zu verwenden. Leider scheidet auch der  
Hitzdraht als Schnelleempfänger aus, der zwar sehr kleine Ab-  
messungen, aber auch eine zu geringe Empfindlichkeit aufweist.  
Schnellmessungen an hochohmigen Resonanzsystemen wie Blech-  
blasinstrumenten erfordern jedoch eine hohe Empfindlichkeit  
der Mikrophone.

Da die Bestimmung der Schallschnelle in der Akustik fast immer  
mit Schwierigkeiten verbunden ist, war man stets bemüht, Methoden  
zur Messung akustischer Impedanzen zu entwickeln, bei denen eine  
Schalldruckmessung die Schnellmessung ersetzen kann.

Wird der Abschluß einer akustischen Leitung durch eine be-  
liebige Impedanz gebildet, die ungleich dem Wellenwiderstand  
der Leitung ist, so bilden sich stehende Wellen aus, deren  
Form und Verteilung sich mit der angekoppelten Impedanz ver-  
ändern. In Analogie zur Hochfrequenztechnik wird ein akustisches  
Impedanzrohr verwendet, um unbekannte Widerstände meßtechnisch  
zu bestimmen [13]. Aus dem Verhältnis von Maximum zu Minimum  
des Schalldruckes vor der zu prüfenden Impedanz wird der Be-  
trag des Reflexionsfaktors ermittelt. Seine Phase errechnet  
sich aus dem Abstand des Druckminimums vom Rohrende. Bezieht  
man das in der Leitungstheorie übliche Smith-Diagramm auf den  
reellen Wellenwiderstand der Rohrleitung, so kann die Größe der  
unbekannten Impedanz direkt nach Betrag und Phase abgelesen  
werden. Sind die Querabmessungen des Meßrohres klein im Ver-

gleich zur Wellenlänge, so ist der Wellenwiderstand gegeben  
durch

$$Z = \frac{\rho \cdot c}{S} \quad (2.2)$$

mit  $\rho$  als spezifischer Dichte des freien Mediums,  $c$  als  
Schallgeschwindigkeit und  $S$  als Querschnittsfläche des  
Rohres. Die Länge einer solchen Meßleitung wird bestimmt  
durch die untere Grenzfrequenz  $f_u$ , bei der noch niedrige  
Impedanzen gemessen werden sollen; der Durchmesser hin-  
gegen durch die obere Grenzfrequenz  $f_o$ . Es gelten die Be-  
dingungen [14]

$$2 R < \frac{\lambda_o}{3}$$

$$1 > \frac{\lambda_u}{2}$$

mit  $\lambda$  als Schallwellenlänge. Für den interessierenden  
Frequenzbereich von 30 Hz bis 2000 Hz müßte das Rohr  
bei 6 cm Durchmesser eine Länge von 6 m aufweisen. Außer-  
dem darf der Durchmesser des verschiebbaren Meßmikrophons  
nicht größer sein als 14 % des Rohrdurchmessers, da das  
Schallfeld im Impedanzrohr somit gestört werden würde [15].  
Durch diese Bedingungen ist der Aufbau eines solchen Impe-  
danzrohres sehr aufwendig, wenn nicht gar unmöglich.

In Bild 3 war die elektrische Ersatzschaltung für ein  
Instrument mit Bläser dargestellt. Ersetzt man den Bläser  
durch eine Schallquelle mit unendlich hohem Innenwiderstand  
 $\mathcal{Z}_M$ , so ist der Schallfluß  $u_M$  unabhängig von der angekoppel-  
ten Impedanz  $\mathcal{Z}_o$  des Instrumentes. Der Schalldruck im Mund-  
stück ergibt sich dann zu

$$p_o = \mathcal{Z}_o \cdot u_M \sim \mathcal{Z}_o \cdot$$

Wird  $p_M$  konstant gehalten, so kann die Impedanz direkt  
mit einem Mikrophon gemessen werden. Den Absolutwert er-  
hält man, wenn man das Instrument durch ein zylindrisches  
Rohr ersetzt, das eine sehr große Länge aufweist. Bei einem  
unendlich langem Rohr, bei dem keine reflektierte Schallwelle

vom Ende wieder an den Anfang gelangt, ist der Wellenwiderstand reell und errechnet sich zu  $Z = \rho c/S$ . Der Phasenwinkel der Impedanz des Instrumentes läßt sich dann auf ähnlich einfache Weise ermitteln. Man bestimmt die Phasenverschiebung  $\varphi_r$  zwischen  $p_o$  und  $p_M$  bei Verwendung eines nahezu unendlich langen Rohres sowie  $\varphi_u$  bei Ankopplung der unbekanntes Impedanz. Da der Wellenwiderstand der unendlich langen, zylindrischen Leitung konstant und reell ist, wird  $\varphi_r$  nur durch den Innenwiderstand  $Z_M$  der Quelle verursacht. Die Phase der Eingangsimpedanz des Instrumentes ergibt sich dann zu

$$\varphi_o = \varphi_u - \varphi_r \quad (2.3)$$

und der Eingangswiderstand  $Z_o$  zu

$$Z_o = \frac{p_o^{Instr.}}{p_o^{Rohr}} \cdot \frac{\rho c}{S_{Rohr}} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_o)} \quad (2.4)$$

Die für die Messung entwickelte Schallquelle ist in Bild 15 dargestellt. Vor einem Lautsprecher ist eine Druckkammer angebracht, in der sich ein Kondensatormikrophon  $M_1$  zur Kontrolle des Schalldruckes befindet. Eine Drahtleitung von 10 mm Durchmesser und 100 mm Länge dient als hochohmige akustische Impedanz zum ankoppeln an das Instrument. Direkt in der Lippebene des Mundstückes ist ein zweites Mikrophon  $M_2$  gegen Körperschall isoliert angebracht. Die Verwendung einer Mikrophonsonde, meist ein dynamisches Mikrophon mit vorgeschaltetem Röhrchen, war bei dieser Messung nicht möglich, da das Mundstücksvolumen durch den Röhrchenhohlraum vergrößert worden wäre. Bei dem Lautsprecher mit Druckkammer handelt es sich um den "künstlichen Mund" der Firma Brüel & Kjaer, bei dem der Schalldruck  $p_M$  über einen weiten Frequenzbereich konstant gehalten werden kann. Als Beispiel für eine Impedanzmessung zeigen die Bilder 16 und 17 den Verlauf der Eingangsimpedanz eines zylindrischen, offenen Rohres von 258 cm Länge und 20 mm Durchmesser. In Bild 16 ist der Betrag in Dezibel (dB) über  $Z = 15 \frac{g}{cm^4 s}$  und in Bild 17 der Phasenwinkel in Grad einge-

tragen. Man erkennt die Gesetzmäßigkeit der Resonanzfrequenzen ( $Z_o = \text{Max}$  oder  $\varphi_o = 0$ ), die sich für ein zylindrisches Rohr bei  $l = 1/4 \lambda, 3/4 \lambda, 5/4 \lambda \dots$  ergeben.

2.2.2 Entwicklung einer künstlichen Anblasvorrichtung

2.2.2.1 Konstruktionsgrundlagen

Zur Entwicklung einer künstlichen Anblasvorrichtung war es erforderlich, die Wirkungsweise der Bläserlippen als Schallquelle und die Ankopplung des Instrumentes näher zu untersuchen. Die Lippen werden zur Tonerzeugung auf die gewünschte Resonanzfrequenz abgestimmt, indem nicht die Masse, sondern die Federsteifigkeit durch Veränderung der Muskelkraft variiert wird. Für eine Posaune mit dem Grundton-Frequenzbereich von etwa 50 Hz bis 600 Hz errechnet sich der Variationsbereich der Federsteifigkeit  $C$  aus der Resonanzfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{C}{M}} \quad \text{mit } M = \text{const.} \quad (2.5)$$

$$\text{zu } \frac{C_1}{C_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \left(\frac{600}{50}\right)^2 = 144$$

Die mechanischen Eigenschaften von Gummi oder Kunststoffen lassen sich aber nicht über einen so großen Bereich verändern [1]. So muß man auf resonanzfähige Systeme verzichten und stattdessen die Luftsäule im Instrument zu erzwungenen Schwingungen anregen.

Wie stroboskopische Betrachtungen der schwingenden Bläserlippen zeigen, ändert sich die Spaltfläche nahezu sinusförmig im Takte der Schwingfrequenz. Bei konstantem statischem Luftdruck in der Mundhöhle erwartet man deshalb im Mundstück einen Schalldruck, der keine Oberwellen enthält. Zur Prüfung dieser Annahme wurden die Schalldruckverläufe im Mund und Mundstück bei Verwendung von zwei unabhängigen Kondensatormikrophonsonden beim Anblasen einer Posaune durch einen Musiker aufgenommen. Wie Bild 18 zeigt, stellte sich dabei jedoch heraus, daß die Signale bei tiefen Frequenzen

sehr obertonhaltig sind und erst bei sehr hohen Frequenzen annähernd sinusförmig werden. Diese Erscheinung läßt sich erklären, wenn man wieder das Ersatzschaltbild (Bild 3) vom Bläser mit Instrument zu Hilfe nimmt. Die akustische Leitung vom Mundraum des Bläusers in das Instrument wird durch den Lippenspalt gestört. Es entsteht ein Querschnittsprung, bei dem die Stetigkeitsbedingung von Schalldruck und Schallströmung erfüllt sein muß [16]. Betrachtet man den Lippenspalt ersatzweise als zylindrische Leitung der Querschnittsfläche  $S_M$ , so ist seine akustische Impedanz  $Z_M = \frac{\rho c}{S_M}$ . Da sich der Lippenspalt zeitlich ändert, ändert sich auch seine Impedanz. Hinzu kommt noch, daß  $Z_M$  eine komplexe Größe darstellt, deren Real- und Blindanteile sich nicht in gleicher Weise mit der Fläche verändern. Bei konstantem Druck  $p_M$  errechnet sich der Schalldruck  $p_o$  im Mundstück aus der Teilerschaltung

$$p_o = p_M \frac{Z_o}{Z_o + Z_M} = p_M \frac{1}{1 + \frac{Z_M}{Z_o}}, \quad (2.6)$$

d.h. der sinusförmige Verlauf wird mit einem gegenphasigen Signal gleicher Frequenz amplitudenmoduliert. Diese Modulation bewirkt eine Begrenzung der positiven und eine Verstärkung der negativen Halbwellen \*). Die gleiche Erscheinung einer Signalverzerrung durch den zeitlich variablen Innenwiderstand ist auch vom Kohlemikrophon bekannt, bei dem auf diese Weise Klirrfaktoren von über 30 % entstehen [17]. Für eine künstliche Anblasvorrichtung läßt sich aus diesen Überlegungen die Forderung ableiten, daß sie ebenso wie die Lippen des Bläusers einen zeitlich variablen Innenwiderstand aufweisen muß.

Faßt man die erarbeiteten Bedingungen für eine künstliche Anblasvorrichtung zusammen, so kann als Schallquelle eigentlich nur ein Gerät Verwendung finden, das einen pulsierenden Luftstrom erzeugt, nämlich eine Lochsirene. Durch die Änderung der Öffnungsfläche schwankt auch der Innenwiderstand der Quelle, so daß im Mundstück ein ähnliches Schallspektrum zu erwarten

\*) In einer kürzlich erschienenen Arbeit [28] wird der Einfluss der variablen Impedanz auf das Klangspektrum näher untersucht.

ist wie beim Musiker. Da das Instrument zu erzwungenen Schwingungen angeregt wird, können die Resonanzfrequenzen durch Aufsuchen der Schalldruckmaxima der abgestrahlten Klänge ermittelt werden.

Sollen die einzelnen Einflußparameter auf die Stimmung mit einer Lochsirene erfaßt werden, so ist es notwendig, zumindest die Größenordnung von statischem Luftdruck und Temperatur beim Anblasen mit einem Musiker zu kennen. Deshalb wurde in einer Versuchsreihe der statische Luftdruck im Mund des Posaunisten in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. Tonhöhe gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 19 eingetragen; dabei bedeuten die Dynamikstufen "pp", daß das Instrument so leise wie möglich angeblasen wurde, und "mf" eine mittlere Lautstärke. Der höchste statische Druck, der überhaupt erreicht werden konnte, lag bei 750 mmWS beim Ton  $b^1$ , wenn so kräftig wie möglich geblasen wurde. In einer früheren Arbeit von Barton wurden wesentlich niedrigere Drucke angegeben [18].

Da die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist, beeinflusst eine Erwärmung der schwingenden Luftsäule im Instrument die Stimmung [19]. Die durch die Lippen ausströmende Luft hat eine Temperatur von ca. 36° Celsius, die zum Schalltrichter hin abfällt. Mit einem Thermoelement als Meßsonde wurde der Temperaturverlauf der Luftsäule in einer Posaune beim Anblasen durch einen Musiker aufgenommen. Bild 20 zeigt den exponentiellen Abfall vom Mundstück zum Schalltrichter hin. Die Kurve ist abhängig von der Raumtemperatur, im vorliegenden Falle 24° C, und vor allem von der zeitlichen Dauer der geblasenen Töne. Denn die Wärmeenergie, die dem Instrument durch die Atemluft zugeführt wird, fließt sowohl mit dem Luftstrom durch den Trichter, als auch durch die wärmeleitende Metallwandung nach außen ab. Werden nur kurze Passagen in großen zeitlichen Abständen geblasen, so kühlt sich das Instrument in den Pausen fast auf Raumtemperatur ab. Die Schallgeschwindigkeit schwankt dann in wesentlich stärkerem Maße als bei ununterbrochenem Elasen. Bei Aufnahme der Kurve

von Bild 20 wurde deshalb ein kleines Musikstück mit gleichmäßiger Verteilung von Ton- und Pausendauer gespielt. Dabei ergab sich im Mittel eine Temperatur der schwingenden Luftsäule von  $27^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.2.2 Prototyp der Anblasvorrichtung

Die Überlegungen des vorhergehenden Kapitels führten zum Bau einer Lochsirene als künstliche Anblasvorrichtung, die in Bild 21 dargestellt ist. Stator und Rotor sind als Zylinder ausgebildet, so daß die Luftzuführung in Achsrichtung angebracht werden konnte. Auf dem Umfang des Rotors sind Schlitze angeordnet, deren Anzahl durch die obere Meßfrequenz bestimmt wird. Der höchste Ton, der noch erreicht werden sollte ist  $\text{fis}^3$  mit einer Frequenz von etwa 1500 Hz. Um für eine sehr hohe Stimmung noch eine Reserve von +100 Cent zu haben, sollte noch eine Frequenz von 1600 Hz meßbar sein. Wird die Sirene mit einem Motor, dessen Höchstdrehzahl bei ca. 5000 U/min liegt, angetrieben, so ergibt sich bei 5000 U/min eine Schlitzzahl von Zwanzig.

Bei der Ausführung der ersten Sirene richtete sich die Form der Schlitze in erster Linie nach den Fertigungsmethoden, die ein schnelles Anfertigen des Prototyps zuließen. Deshalb wurde eine angenäherte Rechteckform gewählt, die sich mit einem kleinen Fingerfräser herstellen ließ. Bild 22 zeigt schematisch den Rotor, der mit seinen Schlitzen hinter dem Statorschlitz gleitet, sowie die dadurch entstehende zeitliche Änderung der Austrittsfläche, die gestrichelt dargestellt ist. Durch die Abweichung vom geforderten Sinus-Verlauf enthielt der Instrumentenklang ein breiteres Spektrum bzw. eine hellere Klangfarbe als beim Anblasen durch einen Musiker.

Die ersten Messungen mit der Sirene zeigten befriedigende Ergebnisse hinsichtlich der Tendenz der Stimmungskurve. Lediglich die mittlere und obere Frequenzlage der Versuchsposaune war etwas zu tief, und zwar so, als wenn ein Mundstück mit wesentlich größerem Kesselvolumen verwendet worden wäre. Das ließ den Schluß zu, daß das effektive Mundstücksvolumen kleiner ist, als der

mechanische Aufbau ergibt. Beim Anblasen des Instrumentes drückt sich der Rand des Mundstückes in die Lippen, die dadurch etwas in den Kessel hineinragen. Dieser Effekt muß ebenso von der Anblasvorrichtung erreicht werden. Da sich der Sirenenschlitz nicht an die Stelle bringen läßt, wo die Bläserlippen schwingen, muß ein Adapter zwischen Sirene und Instrument eingefügt werden. Er muß einerseits wie die Lippen in das Mundstück hineinragen, darf andererseits aber nicht den Innenwiderstand der Sirene verändern. Ein solcher Adapter wurde aus einer kurzen Drahtleitung hergestellt, deren Ende halbkugelförmig angedreht war. Je nach Mundstücksdurchmesser ergibt sich eine andere Eintauchweite und damit ein ähnliches effektives Kesselvolumen wie beim Anblasen mit einem Musiker. Die mit dieser Anblasvorrichtung gemessene Stimmungskurve der Versuchsposaune ist zusammen mit der Mittelwertkurve aus der Messung mit den Musikern in Bild 23 eingezeichnet. Im Gegensatz zu sämtlichen in der Literatur beschriebenen Meßverfahren zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten erhält man mit dieser künstlichen Anblasvorrichtung einen Stimmungsverlauf, der sehr gut mit dem übereinstimmt, der sich beim Anblasen mit Musikern ergibt.

Allerdings hatte die Anblasvorrichtung in dieser Form noch einige Nachteile. So war die Schlitzgröße des Prototyps mit  $2 \times 15 \text{ mm}$  zu groß, um kürzere Instrumente mit kleineren Mundstücken als Posaunen untersuchen zu können. Andererseits war die Schlitzfläche zu klein, um die Stimmungskurve einer Tuba zu messen. Da eine Änderung der Rotorschlitze mechanisch nicht möglich war, mußte der Statorschlitz geändert werden. Dabei veränderte sich aber das Tastverhältnis  $t_o/t_z$  des Signales in Bild 22, so daß das abgestrahlte Klangspektrum keinen befriedigenden Verlauf mehr zeigte und die Stimmungskurve verfälscht wurde.

Bei der Anregung sehr tiefer Resonanzen unterhalb 50 Hz läuft der Antriebsmotor mit einer Drehzahl von weniger als 165 U/min. Da der Rundlauf hierbei nicht mehr ausreichend ist, kommt es zu Drehzahlschwankungen, die eine Frequenzmodulation des Ausgangssignales bewirken. Dadurch sind aber die recht scharfen Resonanzmaxima des Instrumentes nicht mehr eindeutig zu bestimmen. Außerdem erscheint im Schallspektrum eine zusätzliche Komponente, die sehr tief, nämlich bei  $1/20$  der Grundtonfrequenz entsteht. Sie liegt nicht-harmonisch zu sämtlichen Komponenten und stört das musikalische Klangempfinden in starkem Maße. Besser als Zwanzig wäre eine Schlitzanzahl von 2, 4, 8 oder 16, denn dann bilden die zusätzlichen Störkomponenten Unteroktaven der Grundtöne des Instrumentenklanges. Gegenüber solchen harmonischen Ergänzungen ist das menschliche Ohr nicht empfindlich.

### 2.2.2.3. Verbesserte Anblasvorrichtung

Mit der Kenntnis der Fehler und Nachteile des ersten Modells wurde eine verbesserte Anblasvorrichtung konstruiert, die später auch für Routine-Messungen verwendet werden sollte. Um die erwähnten nichtharmonischen Modulationsfrequenzen zu vermeiden, wurde eine Schlitzzahl von acht gewählt. Dadurch ergibt sich eine obere Frequenzgrenze von ca. 600 Hz, die es erlaubt, Instrumente der Baß- und der Tenorlage zu untersuchen. Da die Baßinstrumente wie Tuba und Sousaphon wegen der Größe ihrer Mundstücke eine sehr große Schlitzfläche erfordern, wurde diese gegenüber dem ersten Modell auf  $144 \text{ mm}^2$  vergrößert. Außerdem wurde die Form des Schlitzes neu gestaltet, um eine noch bessere Anpassung an die sinusförmige Flächenänderung zu erzielen. Rotor und Stator weisen jetzt Schlitz von quadratischer Fläche auf, die um  $45^\circ$  gegeneinander verdreht sind. Die Kantenlänge des Statorschlitzes beträgt 12 mm und die der Rotorschlitzes, entsprechend der Diagonalen des Statorschlitzes,  $12 \times \sqrt{2} \approx 17 \text{ mm}$ .

In Bild 24 sind Stator- und Rotorauschnitte sowie der zeitliche Verlauf der Schlitzfläche wiedergegeben. Die Annäherung des Verlaufes an eine Sinuskurve geschieht folgendermaßen: Der Rotor habe eine Umfangsgeschwindigkeit  $v$ ; zum Zeitpunkt  $t = 0$  sei der Statorschlitz gerade von einem Steg des Rotors verdeckt. Mit  $t > 0$  gibt der dem Steg folgende Rotorschlitz einen Teil des Statorschlitzes frei. Dieser Teil ist ein rechtwinkliges Dreieck der Höhe  $h = v \cdot t$  und der Hypotenuse  $b = 2h \cdot \text{tg } 45^\circ = 2h = 2vt$ . Die Fläche zum Zeitpunkt  $t > 0$  ergibt sich somit zu

$$S = \frac{h \cdot b}{2} = vt^2,$$

d.h. sie ändert sich nach der Parabel  $S \sim t^2$ , bis die erste Hälfte der gesamten Statorfläche freigegeben ist. Von diesem Zeitpunkt an erfolgt der Flächenzuwachs nicht mehr von der Spitze, sondern von der Grundlinie der Dreiecksfläche, so daß die Flächenänderung nach der gespiegelten Parabel verläuft. Auf diese Weise ergibt sich ein zeitlicher Verlauf der Fläche, der von derjenigen bei einem Musiker nur geringfügig abweicht. Der dadurch verursachte Schalldruck im Mundstück zeigt bei Verwendung dieser Anblasvorrichtung kaum meßbare Unterschiede zu dem, der sich bei einem Musiker ergab (vgl. Bild 18).

Die mittlere Lippenpaltfläche beim Musiker wird durch das zu blasende Instrument bzw. durch den Durchmesser des dabei verwendeten Mundstückes bestimmt. Je nach Instrument muß auch bei der Anblasvorrichtung die Einstellung einer entsprechenden Schlitzfläche möglich sein, ohne dabei den zeitlichen Verlauf der Fläche zu verändern. Insbesondere muß das Tastverhältnis des Signales erhalten bleiben, um Klangspektrumsänderungen zu vermeiden. Aus diesem Grund war eine sehr aufwendige Schlitzkonstruktion erforderlich, die schematisch in Bild 25 dargestellt ist. Der Statorschlitz wird durch vier dünne Blechsegmente von 0,15 mm Dicke begrenzt, die sich an den Eckpunkten überlappen. Durch ihre geringe

Dicke haben die Verstärkungen, die sich durch das Prinzip der photographischen Irisblende ergeben, keinen Einfluß auf die Ankopplung eines Instrumentes. Die vier Blechsegmente sind halbkreisförmig ausgebildet und haben an der äußeren Rundung eine Führungsleiste, die in einer Nut des festen Gehäuses gleitet. Die Gleitbahnen zweier nebeneinanderliegender Segmente sind so gestaltet, daß ihr Drehpunkt den oberen oder unteren Eckpunkt des Schlitzes bildet. Durch Mitnehmerstifte werden die Bewegungen je zweier gegenüberliegender Segmente von einem äußeren Einstellring übertragen. Bei Drehung der Einstellringe aus der Ruhelage verändert man die Schlitzfläche zu einem Parallelogramm, dessen eine Diagonale durch die feststehenden Drehpunkte der Segmente immer die gleiche Länge hat. Dadurch ändert sich die Schlitzlänge im Gegensatz zur Schlitzbreite nicht, und das Tastverhältnis sowie die Form des Verlaufes der Flächenänderung bleiben konstant. Durch dieses Verfahren kann die Schlitzfläche und mit ihr der Arbeitspunkt der Anblasvorrichtung kontinuierlich von Null bis zu ihrem Höchstwert von  $144 \text{ mm}^2$  eingestellt werden.

Die ganze Sirene wurde aus V2A-Stahl gefertigt, um Korrosionseinflüsse durch schwefelhaltige Gummidichtungen oder hohe Luftfeuchtigkeit auf die Gleitflächen zu vermeiden. Außerdem muß eine Prüfung des Einflusses feuchtegesättigter Luft auf die Stimmung von Metallblasinstrumenten ohne Beschädigung der Anblasvorrichtung durchgeführt werden können. Bild 26 zeigt einige Ansichten der fertigen Anblasvorrichtung mit bzw. ohne angekoppeltem Antriebsmotor. Neben dem Stutzen für die Luftzufuhr ist ein dünnes Röhrchen angebracht, das bis in den Hohlraum der Sirene ragt. An ihm können Druck- und Temperaturmeßgeräte angeschlossen werden.

### 2.2.3 Meßaufbauten, die für die Untersuchungen verwendet wurden

Mit den Vorrichtungen, die in den Abschnitten 2.2.1.4 sowie 2.2.2.3 beschrieben worden sind, wurden Meßplätze eingerichtet, mit denen die Impedanz und die Stimmung von Blechblasinstrumenten ermittelt werden kann. Um den Ablauf derartigen Messungen

zu verdeutlichen, wird der apparative Aufbau der beiden Meßplätze im folgenden beschrieben.

### 2.2.3.1 Meßaufbau für die Stimmung

Der Meßaufbau, der unter Verwendung der künstlichen Anblasvorrichtung für die Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten verwendet wird, ist als Blockschaltbild in Bild 27 dargestellt. Das zu prüfende Instrument wird über einen Drahtleitungsadapter an die Sirene angekoppelt, der von einem einstellbaren Gebläse Druckluft mit einer Temperatur von etwa  $40^\circ\text{C}$  zugeführt wird. Der statische Druck im Innern der Sirene wird mit einem Manometer kontrolliert. Als Antrieb dient ein Gleichstrom-Scheibenläufermotor der Firma AXEM-SERVALCO, auf dessen Achse ein Tachogenerator angebracht ist. Der Motor arbeitet nach dem Prinzip des Barlow'schen Rades, bei dem die Kraftwirkung eines magnetischen Feldes auf einen stromdurchflossenen Leiter ausgenutzt wird, um eine dünne Leiterscheibe in Rotation zu versetzen. Durch seine geringe Masse hat der Motor ein sehr kleines mechanisches Trägheitsmoment und kann deshalb in seiner Drehzahl sehr schnell geregelt werden. Außerdem besitzt der Motor keine Pollücken, die eine Unterbrechung des Kraftflusses und damit verbundene dynamische Drehzahlschwankungen bewirken. Wie erste Versuche gezeigt hatten, war ein normaler Gleichstrom-Motor mit Kollektor für den Antrieb nicht geeignet, da das sog. "Zahnen" zu unerwünschten Frequenzschwankungen führte.

Die Stromversorgung für den Motor besteht aus einem stabilisierten Gleichspannungsnetzteil mit nachgeschaltetem Regelverstärker hoher Leistung. Dieser arbeitet in allen vier Quadranten der Strom-Spannungscharakteristik als PD-(proportional-differential) Regler. Die Frequenz bzw. Drehzahl der Anblasvorrichtung wird entweder durch die Ausgangsspannung des fernbedienbaren Netzteiles oder durch ein zeitliches Sägezahnsignal von ca. 100 s Periodendauer, das von einem Funktions-Generator erzeugt wird, eingestellt. Die Sägezahnsteuerung wird benutzt, wenn die Resonanzkurven eines Instrumentes automatisch über der Frequenz geschrieben werden sollen.



Auf der Verbindungssachse zwischen Motor und Sirene ist eine kreisförmige Scheibe mit acht Löchern angebracht. Sie dient zur Unterbrechung des Lichtstrahles einer kleinen Lichtschranke, deren Signal von einem Schmitt-Trigger aufbereitet wird. Mit einem digitalen Frequenzzähler wird die Periodendauer gemessen und aus ihr die Frequenz des geblasenen Grundtones errechnet. Das Verfahren der Periodenmessung mit anschließender Umrechnung kann mit Hilfe eines elektronischen Tischrechners wesentlich schneller durchgeführt werden, als wenn die Frequenz direkt mit dem Zähler gemessen wird, denn bei einer Auflösung von 0,01 Hz würde die Frequenzzählung 100 Sekunden in Anspruch nehmen.

Der vom Instrument abgestrahlte Schalldruck wird mit einem Kondensatormikrophon mit direkt angekoppeltem Kathodenfolger gemessen, und sein Effektivwert auf einem Röhrenvoltmeter zur Anzeige gebracht. Gleichzeitig gelangt das Signal auf einen Echtzeit-Terz-Analysator, der auf einem Bildschirm eine vollständige Terz-Analyse des Instrumentenklanges liefert. Parallel zum Analysator sind ein Oszillograph sowie ein Pegelschreiber geschaltet. Um etwaige Störungen bei der Frequenzmessung sofort zu erkennen, wird der Oszillograph mit Impulsen getriggert, die der Digital-Zähler liefert, während er das Signal der Lichtschranke auszählt. Ist die Zählung durch falsche Triggerpegelwahl gestört, so verschwindet das Signal auf dem Bildschirm ohne Zeitverzögerung.

Die Messung der Stimmung von Blechblasinstrumenten mit der Anblasvorrichtung wird im echofreien Raum durchgeführt, um Rückwirkungen von Raumresonanzen und Schallreflexionen auf den Schalldruck am Orte des Mikrophones zu vermeiden. Bild 28 zeigt den Meßaufbau bei Prüfung einer Tenorposaune. Der Meßbereich umfaßt Frequenzen von 0...600 Hz mit einer Auflösung von etwa 0,1 % oberhalb 40 Hz. Die Langzeitstabilität war besser als 1 %, so daß sich eine theoretische Meßgenauigkeit von etwa  $\pm 1$  Cent ergibt. Eine solche Genauigkeit kann in der Praxis jedoch nicht erreicht werden. Da die Resonanzkurven

eines Blechblasinstrumentes oberhalb des vierten Naturtones schon sehr flach werden, ergibt sich in der Praxis eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei Konstanz der Lufttemperatur von  $\pm 2$  Cent. Diese Genauigkeit ist als außergewöhnlich hoch zu bezeichnen, insbesondere wenn man die starken Schwankungen beim Anblasen durch einen Musiker berücksichtigt (Bild 8).

### 2.2.3.2 Meßaufbau für die Eingangsimpedanz

Die Eingangsimpedanz von Blechblasinstrumenten wird mit dem in Bild 29 schematisch dargestellten Meßaufbau bestimmt. Als Schallquelle dient der "künstliche Mund" der Firma Brüel & Kjaer, ein kleiner Lautsprecher von 4 W Leistung bei Sinus-Dauerton, der auf eine Druckkammer arbeitet. In der Druckkammer ist ein 1/2-Zoll-Kondensatormikrophon Typ 4134 des gleichen Herstellers angebracht. Sein Ausgangssignal wird verstärkt und dem Dynamikkompressor eines Schwebungssummers zugeleitet, dessen Leistungsausgang derart geregelt wird, daß in der Druckkammer im Frequenzbereich 20 Hz bis 2000 Hz ein konstanter Schallpegel von 125 dB herrscht. Dieser Frequenzbereich ist für die Posaune breit genug, um auch die höchsten Resonanzfrequenzen ermitteln zu können.

Am Ende der Drahtleitung ist das eigentliche Meßmikrophon in der Lippebene des Mundstückes angebracht. Nach Verstärkung wird das Ausgangssignal, das proportional dem Betrag der Eingangsimpedanz ist, auf verschiedene Meßgeräte verzweigt. Zur Bestimmung des Effektivwertes dient ein Röhrenvoltmeter sowie ein Pegelschreiber, der mechanisch mit dem Schwebungssummer gekoppelt ist. Bei dem automatischen Durchlauf des Schwebungssummers von 20...2000 Hz erhält man auf dem Registrierstreifen einen einheitlichen Frequenzmaßstab, der den Vergleich vieler Impedanzkurven erleichtert.

Für die Bestimmung der Phase der Eingangsimpedanz wird ein direkt anzeigendes Phasenmeßgerät mit Gleichspannungsausgang verwendet. Mit ihm wird die Phasenverschiebung zwischen den

Schalldrucken in der Druckkammer und im Mundstück gemessen und mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet. Zur Ermittlung der Phasendrehung, die die Drahtleitung verursacht, wird statt eines Instrumentes ein zylindrisches Rohr von sehr großer Länge angekoppelt. Da ein unendlich langes Rohr mit reellem Eingangswiderstand nicht realisierbar ist, wird ein 10 m langes Kupferrohr verwendet, das durch einen Plastikschauch von 45 m mit den gleichen Querabmessungen verlängert wird. Um eine eventuelle Schallreflexion am offenen Ende zu vermindern, werden die letzten 5 m des Schlauches mit Wollfäden gefüllt. Die Ergebnisse von Betrag und Phase der Eingangsimpedanz dieser zylindrischen Rohrleitung gelten für alle folgenden Messungen als Bezugswerte:  $Z_{\text{Bezug}} = \frac{\rho c}{S_{\text{Rohr}}}$  und  $\varphi_{\text{Bezug}} = 0$ .

Bei der Phasenmessung des Rohres ergab sich eine frequenzproportionale Winkelerhöhung, die genau der Laufzeit der Schallwelle zwischen den beiden Mikrofonen entsprach. Da auch die Rohrimpedanz als fast konstant ermittelt wurde, kann man behaupten, daß die Drahtleitung bis 2000 Hz einen reellen Widerstand darstellt.

### 3. Meßergebnisse und ihre Deutung

#### 3.1 Einfluß von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Stimmung

Mit der verbesserten Anblasvorrichtung nach Abschnitt 2.2.3.1 wurde der Einfluß einiger Parameter auf die Stimmung ermittelt, um für die nachfolgenden Untersuchungen an verschiedenen Instrumenten die richtigen Anblasbedingungen erfüllen zu können. Die drei wichtigsten Einflußgrößen sind die Eigenschaften der schwingenden Luftsäule, Druck, Temperatur und Feuchtigkeit. Da sich Blechblasinstrumente in ihren geometrischen Abmessungen kaum durch diese drei Parameter ändern, ist eine eventuelle Stimmungsverschiebung nur durch Änderung der Schallgeschwindigkeit der Luft zu erwarten.

Die Ableitung der Schallgeschwindigkeit für ein ideales Gas ergibt bei Gültigkeit der adiabatischen Zustandsgleichung mit

dem Boyle-Mariotteschen Gesetz [13]

$$c = \sqrt{\kappa \frac{R \cdot T}{M}} \quad (3.1)$$

Dabei bedeuten: M das Molekulargewicht, R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur in Grad Kelvin und  $\kappa$  das Verhältnis der spezifischen Wärmen. Danach ist die Schallgeschwindigkeit unabhängig vom Druck, solange die Zustandsänderung adiabatisch verläuft, und proportional der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. Für eine Temperaturerhöhung von 25°C auf 26°C erhält man einen Schallgeschwindigkeitsanstieg von

$$\frac{c_{26}}{c_{25}} = \sqrt{\frac{273 + 26}{273 + 25}} = 1,00167644 ;$$

die Schallgeschwindigkeit wird also um 1,67 ‰ pro Grad Celsius verändert.

Die Anreicherung der Luft mit Wasserdampf ergibt eine Dichteänderung, die so klein ist, daß sie im Bereich des Hörschalles keinen wesentlichen Einfluß auf die Schallgeschwindigkeit hat. Trendelenburg [20] gibt den Unterschied zwischen den Schallgeschwindigkeitswerten von trockener Luft und von Luft mit 100 ‰ Feuchtigkeit bei 0°C mit 1,5 ‰ an.

Die experimentellen Untersuchungen über den Einfluß von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit wurden mit der Anblasvorrichtung an der Versuchsposaune durchgeführt. Die Druckluft wurde mit einem Staubsaugergebläse erzeugt, das gegen Schwingungen isoliert in einem schallgedämpften Holzkasten untergebracht war. Die Versorgungsspannung für das Gebläse konnte mit einem Stelltransformator stufenlos eingestellt werden, so daß mit Luftdrucken von 0...1500 mmWS gemessen werden konnte. Da es sich bei dem Staubsauger um ein Gebläse handelt, das sich durch den erzeugten Luftstrom selbst kühlt, war es einfach, die Temperatur der Druckluft zu erhöhen. Es brauchte nur der

Verbindungsschlauch zwischen Gebläse und Anblasvorrichtung zeitweilig verstopft zu werden, um die Betriebstemperatur des Gebläses ansteigen zu lassen. Durch die hohe thermische Trägheit des Systems blieb die Lufttemperatur während einer Meßreihe auf weniger als  $0,5^{\circ}\text{C}$  konstant. Die Anreicherung der Luft mit Feuchtigkeit wurde dadurch erreicht, daß der Luftstrom des Gebläses durch ein Gefäß geleitet wurde, das zur Hälfte mit warmem Wasser gefüllt war. Mit einem Haarygrometer konnte die Feuchtigkeit der Luft überprüft werden. Dieses Verfahren hat sich schon bei der Entwicklung von künstlichen Anblasvorrichtungen für Klarinetten und Blockflöten bewährt, wo die Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluß auf die elastischen Eigenschaften des schwingenden Blattes und die Oberflächen der hölzernen Instrumentenwandungen ausübt [ 21, 22 ] .

Die Ergebnisse der Meßreihen entsprachen voll den Erwartungen, die aus den Überlegungen am Anfang dieses Kapitels abgeleitet werden konnten. Etwaige Einflüsse von Druck (bis  $1500\text{mmWS}$ ) und Luftfeuchtigkeit (40 bis 100%) auf die Stimmung der Versuchsposaune waren so gering, daß sie mit der gegebenen Meßgenauigkeit von  $\pm 2$  Cent nicht nachgewiesen werden konnten. Der Schalldruckpegel wurde bei Verdoppelung des Luftdruckes um 6 dB erhöht. Das entspricht einer Konstanz der Umformung von statischem Druck in Schalldruck, wie sie schon mit einem Musiker gemessen werden konnte. Bild 30 zeigt die Abhängigkeit des Schalldruckpegels vom statischen Druck in der Sirene für verschiedene Naturtöne. Die Parallelverschiebung der Kurven wird durch die Frequenzabhängigkeit des Strahlungswiderstandes verursacht (vgl. Bild 4).

Bei Veränderung der Lufttemperatur schwankte die Stimmung einheitlich über den gesamten Naturtonbereich mit ca. 25 Cent pro  $10^{\circ}\text{C}$ . Dieser Wert wurde bei niedrigen Temperaturen von  $25^{\circ}\text{C}$  bis  $35^{\circ}\text{C}$  gemessen; bei  $35^{\circ}\text{C}$  bis  $45^{\circ}\text{C}$  ergab sich nur ein Zuwachs von 22 cent pro  $10^{\circ}\text{C}$ , und im höchsten erreichten Temperaturbereich bis zu  $54^{\circ}\text{C}$  betrug die Stimmungsänderung weniger als 20 cent pro  $10^{\circ}\text{C}$ . Da die Verschiebung der Stimmungskurve bei allen Naturtönen gleichmäßig war, ist anzunehmen, daß mit wachsendem Temperaturgefälle zwischen der

Luftsäule im Instrument und dem Außenraum eine höhere Wärmestrahlung durch die Blechwandung auftritt. Dadurch ist die Temperaturänderung im Schallstück geringer als im Mundrohr, d.h. es ergeben sich kleinere Differenzen zwischen den mittleren Temperaturen der Luftsäule als zwischen den eingestellten Temperaturen des zugeführten Luftstromes. Ist die Außentemperatur sehr niedrig, so wird die Stimmungserhöhung mit ansteigender Anblastemperatur noch geringer sein. Young [19] stellte bei Änderung der Außentemperatur und Anblasen durch einen Musiker (konstante Anblastemperatur von  $36^{\circ}\text{C}$ ) eine Erhöhung von 1,3 Cent pro  $^{\circ}\text{C}$  fest. Dieser niedrige Wert ist verständlich durch die Abkühlung des Instrumentes während der Spielpausen.

### 3.2 Zusammenhang zwischen Eingangsimpedanz und Stimmung

#### 3.2.1 Impedanzkurven

Mit der in Abschnitt 2.2.3.2 beschriebenen Meßapparatur wurde die Eingangsimpedanz der Versuchsposaune nach Betrag und Phase aufgenommen. Dabei wurde wieder das gleiche Mundstück verwendet, das auch schon bei der Ermittlung der Stimmung mit Musikern benutzt wurde. Das Ergebnis dieser Messung ist in Bild 31 eingetragen. Man erkennt eine Abnahme der Welligkeit von Impedanz- und Phasenkurve mit ansteigender Frequenz. Diese Erscheinung hat ihre Ursache in der Verminderung der Schallreflexionen am Trichterende, die durch eine zunehmende Anpassung der Trichterimpedanz an den Wellenwiderstand des umgebenden Luftraumes hervorgerufen wird (vgl. Bild 4). Das Mundstück wirkt mit seinem Kesselvolumen wie eine Feder, die parallel zum Eingang des Instrumentes geschaltet ist. Dadurch wird der zu übertragende Frequenzbereich nach oben begrenzt, und die Impedanzkurve fällt mit steigender Frequenz rasch ab. In dem Phasenverlauf zeigt sich dieser Einfluß durch Abnahme der Phase auf fast  $-90^{\circ}$ . Oberhalb 1000 Hz sind überhaupt keine Resonanzen mehr festzustellen, während der Phasenwinkel schon bei etwa 600 Hz in den kapazitiven Bereich läuft. Das hat zur Folge, daß eine angekoppelte

Schallquelle oberhalb von 600 Hz nahezu gegen einen Kurzschluß arbeiten muß. Deshalb ist es auch für einen geübten Posaunisten fast unmöglich, weit über diese Grenzfrequenz hinaus zu blasen.

Vergleicht man die Betrags- mit der Phasenkurve, so fällt auf, daß die Frequenzen, bei denen der Impedanzbetrag ein Maximum erreicht, genau denen entsprechen, bei denen der Phasenwinkel durch Null läuft. Die Maxima des Betrages entsprechen also hinsichtlich ihrer Frequenzlage genau den Maxima des Realteiles der Eingangsimpedanz. Die recht umständliche Messung der Resonanzlage des Instrumentes kann also durch eine einfache Bestimmung der Maximalwerte des Impedanzbetrages ersetzt werden.

Die drei tiefsten Resonanzfrequenzen wurden mit 41,4 Hz, 115,6 Hz sowie 175,1 Hz gemessen. Sie liegen alle tiefer als die Grundtonfrequenzen der von den Musikern geblasenen Klänge. Oberhalb etwa 250 Hz entsprechen sich Resonanzfrequenzen des Instrumentes und geblasene Tonfrequenzen jedoch weitgehend. Bei Ankopplung eines Bläusers an ein Blechblasinstrument verschieben sich also die Resonanzen niedriger Ordnungszahl zu höheren Frequenzen, während die Resonanzfrequenzen höherer Ordnung erhalten bleiben. Dies ist auch der Grund dafür, daß die herkömmlichen Verfahren der Stimmungsmessung mit künstlicher Anregung (Kap. 2.1.1 bis 2.1.3) bei den tiefen Naturtönen versagen mußten.

### 3.2.2 Stimmungskurven mit der Anblasvorrichtung

Zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten mit der Anblasvorrichtung werden die Frequenzen gesucht, bei denen die vom Instrument abgestrahlte Schallenergie Maximalwerte erreicht. Der Luftdruck in der Anblasvorrichtung wird auf einen beliebigen aber konstanten Wert geregelt, so daß der Schallpegel vor dem Instrumententrichter dem Wirkungsgrad des Instrumentes direkt proportional ist. Bild 32 zeigt den Verlauf des Schallpegels in Abhängigkeit von der Frequenz, der bei der Prüfung der Versuchsposaune in Achsrichtung

vor dem Trichter gemessen wurde. Eine Frequenzbewertung des recht obertonreichen Klanges wurde nicht vorgenommen, sondern das gesamte Schallspektrum linear erfaßt. Die Maximalwertfrequenzen entsprachen dabei genau den Frequenzen, die aus der Messung mit verschiedenen Musikern ermittelt worden waren (Bild 23).

Da bei der Bestimmung von Resonanzen eines Systems im allgemeinen ein sinusförmiges Signal verwendet wird, war die Frage, wie die Schallpegel- und Stimmungskurven der Versuchsposaune aussehen, wenn man bei dem abgestrahlten Klang nur die Grundwelle berücksichtigt. Für einen solchen Versuch wurde das Mikrophonsignal einem Echtzeit-Terz-Analysator zugeführt, dessen Filterausgang auf die einzelnen Terzbereiche umgeschaltet werden kann. Beim Frequenzdurchlauf der Anblasvorrichtung wurde der Terzbereich immer dann von Hand weitergeschaltet, wenn der Grundton des Klanges die obere Frequenzgrenze des Filterbereiches erreichte. Dadurch konnte der Frequenzgang des Schalldruckes der Grundwelle des abgestrahlten Klanges mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet werden. Die so erhaltene Kurve (Bild 31c) entspricht dem Impedanzverlauf der Versuchsposaune (Bild 31a), wenn man berücksichtigt, daß die frequenzabhängige Schallabstrahlung des Instrumententrichters (Strahlungswiderstand) einen Abfall der Pegelkurve bei tiefen Frequenzen hervorruft. Volle Übereinstimmung ergab sich in der Frequenzlage der Maxima von Grundwellenpegel und Impedanz. Hieraus folgt die äußerst wichtige Feststellung, daß der Bläser eines Blechblasinstrumentes nicht diejenigen Klänge erzeugt, bei denen die Grundtonfrequenz mit der Frequenz eines Impedanzmaximums zusammentrifft, sondern solche Klänge, bei denen die gesamte abgestrahlte Schallenergie Maximalwerte erreicht.

Der Unterschied dieser beiden Frequenzen ist bei den Naturtönen niedriger Ordnungszahl besonders deutlich und verschwindet mit ansteigender Frequenz vollständig. Um zu prüfen, ob der Effekt nicht nur bei der Anblasvorrichtung auftrat, wurde ein Musiker gebeten, beim Anblasen der Versuchsposaune den Pedalton B<sub>1</sub> (ca. 59 Hz) so weit wie möglich mit Lippenkraft

zu erniedrigen, ohne dabei den Zug zu Hilfe zu nehmen. Mit dem Echtzeit-Terz-Analysator wurde das Spektrum des Klages vor dem Trichter ermittelt. Dabei zeigte sich deutlich eine Verschiebung der Energie zum Grundton bei Erniedrigung der Tonhöhe, d.h. der zu tief angeblasene Klang besitzt einen höheren relativen Grundtonpegel als der normal angeblasene (Bild 31d und e).

### 3.2.3 Das "Summenprinzip"

Wie sich aus den experimentellen Untersuchungen über die Eingangsimpedanz und die Stimmung der Versuchsposaune ergibt, werden von einem Bläser nicht immer die Frequenzen angeregt, bei denen die Eingangsimpedanz für den Grundton des Klages einen Höchstwert erreicht. Geblasen werden vielmehr die Frequenzen, bei denen der Musiker die geringste Energie aufzuwenden braucht, d.h. bei denen von dem Instrument die beste Anpassung der Bläserlippen an den Außenraum erreicht wird. Deshalb muß bei dieser Betrachtung das gesamte Schallspektrum des Blälersignales berücksichtigt werden, denn die Energie des Blälers verteilt sich auf Grundwelle und Obertöne.

Fällt die Grundwellenfrequenz mit einem Impedanzmaximum zusammen, so sind die Lippen bei dieser Frequenz optimal angepaßt, und es bildet sich eine stabile Lippenschwingung aus. Fallen die Harmonischen dieses Klages dabei jedoch in Bereiche sehr niedriger Impedanzen des Instrumentes, so erreichen die im Instrument rücklaufenden Wellen die Lippen mit negativen Phasen und bewirken eine hohe Schallströmung. Dadurch bricht der Druck des Blälers zusammen, und es ist für ihn mit großer Anstrengung verbunden, die Schwingungen der Lippen aufrecht zu erhalten. Wenn die Harmonischen jedoch, ebenso wie der Grundton, Maxima der Eingangsimpedanz vorfinden, so ist der Energieentzug sehr klein, und das Instrument kann ohne große Anstrengung angeblasen werden. Diese breitbandige Rückwirkung der Rohrresonanzen auf die Schallquelle konnte auch schon in früheren Arbeiten über Zungenpfeifen von Orgeln festgestellt werden [23].

Nun gibt es kaum ein Metallblasinstrument, bei dem die Frequenzen der Impedanzmaxima streng harmonisch zueinanderliegen. Dadurch ist es nahezu unmöglich, daß sowohl der Grundton als auch sämtliche Obertöne eines Klages genau mit den Maximalwertfrequenzen übereinstimmen. Ebenso sind solche Klänge unwahrscheinlich, bei denen nur der Grundton allein und kein einziger Oberton mit einem Impedanzmaximum zusammentrifft. Durch die Dämpfung der stehenden Wellen im Instrument weisen die Impedanzkurven keine sehr scharfen Resonanzspitzen auf (Bild 31), so daß man nicht die Maximalwertfrequenzen allein betrachten muß, sondern die Bereiche hoher Impedanz in unmittelbarer Nachbarschaft der Maxima. Ein Musiker wird deshalb stets diejenigen Klänge blasen, bei denen möglichst viele Teiltöne in diese Bereiche hoher Impedanz fallen.

Aus diesen Überlegungen läßt sich ein "Summenprinzip" ableiten, das besagt, daß die Summe der Realteile der Eingangsimpedanzen, die ein Blechblasinstrument bei den Grund- und Obertonfrequenzen eines harmonischen Klages aufweist, ein Kriterium für eine stabile Schwingung der Bläserlippen darstellt. Diese Summe läßt sich formell als

$$S_R(f_0) = \sum_{f_T=f_0}^{f_T=f_h} Z_R(f_T) \quad (3.2)$$

angeben, wobei  $f_T$  die Teiltonfrequenz und  $f_0$  die Frequenz des Grundtones bedeuten. Die Frequenz  $f_h$  bezeichnet die höchste Obertonfrequenz, bei der noch Resonanzen des Instrumentes festgestellt werden können.  $Z_R(f_T)$  stellen die reellen Eingangswiderstände bei den einzelnen Teiltonfrequenzen dar.

Als Beispiel für die Gültigkeit dieses Prinzips kann man das Anblasen des Pedaltones des ersten Zuges einer Tenorposaune durch einen Musiker heranziehen. Das Impedanzmaximum liegt bei etwa 41 Hz (Bild 31), geblasen wird jedoch ein Klang mit einer Grundtonfrequenz von etwa 59 Hz. Würde der Posaunist einen Klang von 41 Hz blasen, so lägen dessen Harmonische bei

82 Hz, 123 Hz, 164 Hz, 205 Hz usw. Die Klangkomponenten von 82 Hz, 164 Hz und 205 Hz fallen in einen Bereich sehr niedriger Impedanz, so daß die Summe  $S_R(f_0)$  überwiegend aus den Realteilen der Impedanzen bei 41 Hz und 123 Hz gebildet wird. Bläst der Musiker jedoch einen Klang mit der Grundtonfrequenz von 59 Hz, so liegen außer dem Grundton nahezu alle Obertöne mit 118 Hz, 177 Hz, 236 Hz usw. in Bereichen sehr hoher Impedanz. Es ergibt sich eine große Summe  $S_R$ , so daß dieser Klang leichter zu erzeugen ist als der bei 41 Hz.

Das Summenprinzip zeigt eine Möglichkeit auf, die Stimmung eines Blechblasinstrumentes aus seinem frequenzabhängigen Impedanzverlauf zu ermitteln. Um das zu prüfen, wurde aus den Meßwerten von Betrag und Phase der Eingangsimpedanz der Versuchsposaune (Bild 31) der reelle Eingangswiderstand als Funktion der Frequenz errechnet. Mit Gl. (3.2) wurden dann die Summen für eine Vielzahl von Grundtonfrequenzen  $f_0$  gebildet. Die obere Grenze für  $f_h$  wurde mit 1500 Hz festgelegt, da oberhalb dieser Frequenz mit Sicherheit keine Resonanzen des Instrumentes mehr festzustellen waren. Zeichnet man die Summen in Abhängigkeit von der Grundtonfrequenz auf, so erhält man die "Summenfunktion", die in Bild 33 für die Versuchsposaune dargestellt ist. Der Anstieg bei tiefen Frequenzen wird durch die gegenüber höheren Grundtonfrequenzen größere Anzahl von Widerstandskomponenten verursacht. Dividiert man die Summen jeweils durch die Anzahl der Komponenten, so erhält man Bild 34, bei dem die Maxima fast die gleichen Werte erreichen.

Zwischen den Hauptmaxima der Summenfunktion, die den von einem Musiker erzeugten Naturtönen entsprechen, ist eine Reihe schwächerer Nebenmaxima zu erkennen. Sie entstehen bei den Frequenzen, bei denen zwar nicht der Grundton, jedoch eine größere Anzahl von Obertönen auf ein Impedanzmaximum fallen. In Bild 34 ist deshalb ein Maßstab eingezeichnet, aus dem die Zuordnung der Nebenmaxima zu den Hauptmaxima abzulesen ist. Unterhalb der Nebenmaxima ist dabei vermerkt, welche Widerstandskomponenten oder Obertöne (2...4) die Summe bei

dieser Grundtonfrequenz am stärksten beeinflussen. Zur besseren Unterscheidung sind die Hauptmaxima durch ihre musikalische Tonbezeichnung gekennzeichnet.

Vergleicht man die Summenfunktion mit dem Schalldruckverlauf von Bild 32, der mit der Anblasvorrichtung gemessen wurde, so erkennt man auch dort eine Reihe derartiger schwacher Nebenmaxima. Sie können von einem geübten Posaunisten angeblasen werden, obwohl die Grundtöne dieser Klänge keiner Instrumentenresonanz entsprechen. Durch das Summenprinzip ist eine Deutung dieser Erscheinung, die bisher nicht geklärt werden konnte, möglich geworden.

### 3.3 Rechnerische Ermittlung der Stimmung eines Blechblasinstrumentes

#### 3.3.1 Berechnung der Eingangsimpedanz

Bei der Ermittlung der Stimmung der Versuchsposaune nach dem Summenprinzip war die Summe der Eingangswiderstände aus gemessenen Werten gebildet worden. Soll die Stimmung auf rechnerischem Wege ermittelt werden, so ist zu prüfen, ob sich der Verlauf der Eingangsimpedanz berechnen läßt, und wie groß die Abweichungen gegenüber den Meßergebnissen dabei sind. Bei guter Übereinstimmung besteht dann die Möglichkeit, das Summenprinzip auch auf die theoretisch ermittelten Impedanzen anzuwenden. Dieses Verfahren ist gegenüber der Messung immer dann von Vorteil, wenn ein neues Instrument entwickelt werden soll. Die hohen Kosten der zu erstellenden Werkzeuge und Formen, die für jeden neuen Versuch entstehen, können somit vermieden werden.

Für die rechnerische Ermittlung der Eingangsimpedanz wurde ein Blechblasinstrument konstruiert, das aus einem zylindrischen Messingrohr von 145 cm Länge und 12 mm Durchmesser sowie einem Exponentialtrichter aus dem gleichen Material von 55 cm Länge zusammengesetzt war. Bild 47 zeigt den Trichter mit der Bezeichnung "exponential 4". Die Flächenänderung im Trichter verlief

nach der Funktion

$$s = s_0 e^{mx} \quad (3.3)$$

mit dem Steigungsmaß  $m = 0,096 \text{ cm}^{-1}$  und dem Anfangsquerschnitt für  $x = 0$

$$s_0 = \pi r_0^2 = \pi \cdot 0,6^2 = 1,1309 \text{ cm}^2 ;$$

$r_0$  ist dabei gleichzeitig der Radius des anschließenden zylindrischen Rohres. An der Stelle  $x = 55 \text{ cm}$  beträgt der Durchmesser der Trichteraustrittsfläche  $16,82 \text{ cm}$ . In Bild 35 ist eine Skizze des Versuchsinstrumentes wiedergegeben. Als Ersatz eines Mundstückes diente eine Kombination von zwei zylindrischen Rohrstutzen, die im Gegensatz zu den gebräuchlichen Mundstücken eine klare Trennung von Kessel und Hals zulassen. Die Abmessungen des Ersatzmundstückes betragen: Kesseldurchmesser =  $2,1 \text{ cm}$ , Kesseltiefe =  $2,7 \text{ cm}$ , Halsdurchmesser =  $0,6 \text{ cm}$  und Halslänge =  $6,3 \text{ cm}$ .

Das Instrument wird für die Berechnung der Eingangsimpedanz als eine Reihenschaltung mehrerer akustischer Leitungen betrachtet. In Analogie zur elektrischen Leitungstheorie ergibt sich für den Schalldruck  $p_a$  und den Schallfluß  $u_a$  am Anfang einer Leitung mit beliebigem Wellenwiderstand [24] :

$$p_a = p_e \cos h \gamma l + \mathcal{Z} u_e \sin h \gamma l \quad (3.4)$$

$$u_a = u_e \cos h \gamma l + \frac{p_e}{\mathcal{Z}} \sin h \gamma l . \quad (3.5)$$

Dabei weisen der Index "a" auf den Anfang, und der Index "e" auf das Ende der Leitung hin.  $\mathcal{Z}$  ist der komplexe Wellenwiderstand,  $\gamma$  das komplexe Übertragungsmaß, das aus der Dämpfungskonstanten  $\alpha$  und der Phasenkonstanten  $\beta = \frac{\omega}{c}$  gebildet wird.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.6)$$

Bei Abschluß der Leitung mit einer beliebigen Impedanz

$$\mathcal{Z}_e = \frac{p_e}{u_e}$$

ergibt sich die Eingangsimpedanz  $\mathcal{Z}_a$  des Systems aus dem Quotienten von Druck und Schallfluß der Gl. (3.4) und (3.5):

$$\mathcal{Z}_a = \mathcal{Z} \frac{\mathcal{Z}_e \cos h \gamma l + \mathcal{Z} \sin h \gamma l}{\mathcal{Z} \cos h \gamma l + \mathcal{Z}_e \sin h \gamma l} \quad (3.7)$$

Bei verlustlosen Leitungen ist  $\alpha = 0$ , und das Übertragungsmaß ist rein imaginär

$$\gamma = j\beta .$$

Berücksichtigt man die Umwandlung der Hyperbel - in Kreisfunktionen bei rein imaginärem Argument

$$\cos h j\beta = \cos\beta \quad \text{und} \quad \sin h j\beta = j \sin\beta ,$$

so ergibt sich für die Eingangsimpedanz in allgemeiner Form:

$$\mathcal{Z}_a = \mathcal{Z} \frac{\mathcal{Z}_e \cos\beta l + j \mathcal{Z} \sin\beta l}{\mathcal{Z} \cos\beta l + j \mathcal{Z}_e \sin\beta l} \quad (3.8)$$

Für zylindrische Leitungen mit dem reellen Wellenwiderstand

$$\mathcal{Z} = Z = \frac{\rho c}{S}$$

wird der Eingangswiderstand nach Gl. (3.8) zu:

$$\mathcal{Z}_a = \frac{\rho c}{S} \left( \frac{S \cdot \mathcal{Z}_e \cos\beta l + j\rho c \sin\beta l}{\rho c \cos\beta l + jS \mathcal{Z}_e \sin\beta l} \right) \quad (3.9)$$

Bei Leitungen veränderlicher Querabmessungen ist der Wellenwiderstand nicht mehr reell und konstant, sondern frequenz- und ortsabhängig. Für einen Exponentialtrichter endlicher Länge ergibt sich die Eingangsimpedanz zu [11]

$$\mathcal{Z}_a = \frac{\rho c}{S_a} \left( \frac{S_e \mathcal{Z}_e \cos(bl+\theta) + j\rho c \sin bl}{jS_e \mathcal{Z}_e \sin bl + \rho c \cos(bl-\theta)} \right) \quad (3.10)$$

Darin bedeuten:

$$\begin{aligned} S_a &= \text{Fläche am Trichtereingang} \\ S_e &= \text{Fläche am Trichterende} \\ b &= \frac{1}{2} \sqrt{4\beta^2 - m^2} \\ m &= \text{Steigungsmaß des Trichters} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\Theta = \arctg \frac{m}{2b} \quad (3.12)$$

Bei der Grenzfrequenz des Trichters, die durch

$$f_G = \frac{m \cdot c}{4\pi}$$

gegeben ist, wird  $b = 0$  (vgl. Bild 4). Da für diese Frequenz die Gl. (3.10) unbestimmt ist, müssen Zähler und Nenner nach  $b$  differenziert werden. Mit der Bedingung  $b = 0$  erhält man dann nach Olson [11]:

$$\zeta_a = \frac{\rho c}{S_a} \left( \frac{\zeta_e \left(1 - \frac{m \cdot 1}{2}\right) + j \frac{\rho c}{S_e} \cdot \frac{1m}{2}}{j \zeta_e \frac{1m}{2} + \frac{\rho c}{S_e} \left(1 + \frac{m1}{2}\right)} \right) \quad (3.13)$$

Unterhalb der Grenzfrequenz wird  $b$  imaginär und damit das Argument des Arcus-Tangens negativ imaginär. Für diesen Fall wird

$$\begin{aligned} \Theta &= \arctg -j \left( \left| \frac{m}{2b} \right| \right) = -j \operatorname{artan} h \left| \frac{m}{2b} \right| \\ \Theta &= -j \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \left| \frac{m}{2b} \right|}{1 - \left| \frac{m}{2b} \right|} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Wird der Ausdruck  $\left| \frac{m}{2b} \right|$  größer als 1, so muß die Beziehung

$$\ln(-1) = j\pi$$

angewendet werden, so daß  $\Theta$  berechnet wird zu:

$$\begin{aligned} \Theta &= -j \frac{1}{2} \ln(-1) \frac{\left| \frac{m}{2b} \right| + 1}{\left| \frac{m}{2b} \right| - 1} = -j \frac{1}{2} \ln(-1) + \ln \frac{\left| \frac{m}{2b} \right| + 1}{\left| \frac{m}{2b} \right| - 1} \\ \Theta &= -j \frac{1}{2} \pi - j \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{m}{2b} \right| + 1}{\left| \frac{m}{2b} \right| - 1} \\ \Theta &= \frac{\pi}{2} - j \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{m}{2b} \right| + 1}{\left| \frac{m}{2b} \right| - 1} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Für die Berechnung der Eingangsimpedanz eines Exponentialtrichters müssen also die Gleichungen (3.10) bis (3.15) je nach Frequenz einzeln verwendet werden.

Als Abschlußimpedanz  $\zeta_e$  eines akustischen Systems, das wie ein Rohr oder Trichter Schallenergie in den Luftraum abstrahlt, wird die akustische Impedanz einer Kolbenmembran angenommen, die in einer unendlich großen Schallwand angebracht ist [11]

$$\zeta_{A2} = \frac{\rho c}{\pi R^2} \left[ 1 - \frac{J_1(2\beta R)}{\beta R} \right] + \frac{j\omega \rho}{2\pi R^4 \beta^3} K_1(2\beta R) \quad (3.16)$$

Hierin bedeuten:  $R$  = Radius der Kolbenmembran bzw. des Trichterendes,  $J_1(2\beta R)$  = Bessel-Funktion erster Ordnung,  $K_1(2\beta R)$  = Eine von Lord Rayleigh [20] modifizierte Besselfunktion. Sie wird errechnet zu

$$K_1(2\beta R) = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{(2\beta R)^3}{3} - \frac{(2\beta R)^5}{3^2 \cdot 5} + \frac{(2\beta R)^7}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - + \dots \right] \quad (3.17)$$

Die so ermittelte Impedanz wird als Abschluß  $\zeta_e$  in Gl. (3.10) bzw. Gl. (3.13) eingesetzt und die Eingangsimpedanz  $\zeta_{A1}$  des Trichters mit  $l = l_2$  errechnet (Bild 35). Sie stellt die Abschlußimpedanz für die zylindrische Leitung dar und wird in Gl. (3.9) als  $\zeta_e$  eingesetzt. Mit  $l = l_1$  errechnet sich daraus die Eingangsimpedanz  $\zeta_{A0}$  des Instrumentes ohne Mundstück. Um die Impedanz  $\zeta_0$  des kompletten Instrumentes einschließlich des Mundstücks zu erhalten, wird die Gl. (3.9) jeweils für Hals und Kessel erneut angewendet.

Die Ermittlung der Eingangsimpedanzen  $\zeta_{A0}$  und  $\zeta_0$  erfordert im Normalfall einen sehr großen Rechenaufwand, wenn die Genauigkeit durch die fortlaufende Widerstandstransformation nicht zu gering werden soll. Die Berechnungen wurden deshalb mit der Datenverarbeitungsanlage (Siemens 4004) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführt, und die Ergebnisse mit einem Plotter aufgezeichnet. Die Bilder 36 und 37 zeigen die Beträge der Eingangsimpedanzen des Versuchsinstrumentes als Funktion der Frequenz. Da deutsche Buchstaben mit dem Plotter nicht gezeichnet werden können, wurden die Beträge der Impedanzen durch ein B gekennzeichnet, das vor den Impedanznamen gesetzt wurde. Es bedeuten dabei:



$$\begin{aligned} \text{BZA0} &= \left| \int_{\text{A0}} \right| = \text{Betrag der Impedanz ohne Mundstück} \\ \text{BZO} &= \left| \int_{\text{0}} \right| = \text{Betrag der Impedanz mit Mundstück.} \end{aligned}$$

Der Amplitudenmaßstab der Impedanzen ist in dB über  $1 \text{ g/cm}^4\text{s}$  angegeben. Eine Gegenüberstellung der beiden Kurven zeigt deutlich den Einfluß des Mundstücks auf den Impedanzverlauf. Die Maxima sind zu tiefen Frequenzen hin verschoben, und die Resonanzwirkung des Instrumentes nimmt mit steigender Frequenz durch die vorgeschaltete Druckkammer ab [25].

Zum Vergleich wurde die Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes meßtechnisch mit dem Aufbau nach Kap. 2.2.3.2 bestimmt. In Bild 38 und 39 sind die gemessenen Impedanzverläufe ohne bzw. mit Mundstück in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Sie zeigen die gleiche Tendenz wie die berechneten Kurven, weisen jedoch keine so hohen Resonanzspitzen auf. Der Unterschied ist auf die Vereinfachungen zurückzuführen, die sowohl bei der Berechnung, als auch bei der Messung angenommen wurden. Bei der Berechnung wurde die Dämpfung vernachlässigt, was immer zu sehr hohen Impedanzspitzen führt. Im Gegensatz dazu ist bei der Messung die Proportionalität zwischen Schalldruck und Eingangsimpedanz (Bild 3) bei hohen Impedanzwerten nicht mehr vorhanden, da der Innenwiderstand der Schallquelle einen endlichen Wert aufweist. Das bewirkt ein Abflachen der Impedanzspitzen, verändert jedoch nicht ihre Frequenzlage.

Überschlägig läßt sich der Innenwiderstand der Schallquelle aus der wirksamen Querschnittsfläche errechnen. Die Drahtleitung hat einen Bohrungsdurchmesser von ca. 10 mm und ist mit etwa 50 Kupferdrähten von 1,1 mm Durchmesser gefüllt. Die für den Transport der Schallenergie freibleibende Fläche ergibt sich daraus zu ca.  $22,5 \text{ mm}^2$ . Betrachtet man diese Fläche, die sich aus vielen Teilen zusammensetzt, als Querschnitt eines einzigen Rohres, so hätte dieses Rohr einen Wellenwiderstand von

$$Z = \frac{\rho c}{0,225} = 198 \frac{\text{g}}{\text{cm}^4\text{s}} \hat{=} 46 \text{ dB}.$$

Dieser Wert erscheint glaubwürdig, denn oberhalb von etwa 45 dB beginnt die gemessene Impedanzkurve abzuflachen.

Die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Frequenzwerten der Impedanzmaxima sind in Bild 40 über der Ordnungszahl der Resonanzen aufgetragen. Eine Fehlerkurve für die Berechnung der Resonanzfrequenzen des kurzen Trichters allein ist nicht in dem Diagramm enthalten, da die Abweichungen kleiner als 1 Hz waren. Bezogen auf die Frequenz des ersten Impedanzmaximums des Trichters von 332 Hz ergibt sich eine Abweichung von weniger als 0,33 %. Bei höherfrequenten Maxima ist die entsprechende Abweichung noch erheblich geringer.

Bei den Resonanzfrequenzen des gesamten Instrumentes mit und ohne Mundstück (BZO bzw. BZA0) ergaben sich weit höhere Abweichungen gegenüber den Meßwerten als für den Trichter allein. Bei den Kurven fällt auf, daß vor allem die drei niedrigsten Resonanzfrequenzen als zu tief berechnet wurden. Diese Frequenzen liegen unterhalb der Grenzfrequenz des Exponentialtrichters, die sich aus der Beziehung  $f_G = m \cdot c/4\pi$  zu 263 Hz berechnen läßt. Für die drei betrachteten Frequenzen ist die Eingangsimpedanz des Trichters aber nahezu rein imaginär und fällt mit abnehmender Frequenz ab (Bild 4). Je weiter die betrachtete Frequenz von der Grenzfrequenz entfernt ist, umso stärker nähert sich die Trichterimpedanz dem Wert Null. Dadurch sind die tiefsten Resonanzfrequenzen des zylindrischen Rohres nur durch seine geometrische Länge gegeben und genügen der bekannten Bedingung

$$l_1 = \frac{1}{4} \lambda, \frac{3}{4} \lambda \text{ und } \frac{5}{4} \lambda.$$

Bei der Messung sind jedoch höhere Frequenzen gefunden worden als sie die obige Bedingung liefert. Der Grund dafür liegt in den tatsächlichen Abmessungen des Trichters, die nicht ganz genau den Daten entsprachen, die für Gl. (3.3) angegeben wurden. Der enge Durchmesser betrug nicht 1,2 cm, sondern nahezu 1,4 cm, so daß man einen etwas kleineren Wert für das Steigungsmaß und damit auch für die Grenzfrequenz erhielt. Durch die große Steilheit der Impedanzkurve unterhalb der Grenzfrequenz ergab sich eine Vergrößerung der Abschluß-

impedanz des zylindrischen Rohres, so daß die Resonanzfrequenzen zu höheren Werten verschoben wurden.

### 3.3.2 Anwendung des Summenprinzips

Um aus den in Bild 37 dargestellten Meßwerten die Stimmung des Versuchsinstrumentes zu ermitteln, wurde die Summenfunktion SAR ( $f_0$ ) in Abhängigkeit von der Grundtonfrequenz errechnet aus

$$SAR(f_0) = \sum_{n=1}^{n=m} ZOR(n \cdot f_0)$$

m, n = ganze Zahlen

m = 1000 Hz/ $f_0$

SAR bedeutet die Summe am Anfang der akustischen Leitung, gebildet aus den Realteilen der Eingangsimpedanzen. ZOR sind dabei diese Realteile für das Instrument mit Mundstück. Bild 37 macht deutlich, daß oberhalb 1000 Hz keine Resonanzen mehr vorhanden sind. Deshalb ist die obere Grenze der Impedanzsummanden mit 1000 Hz festgelegt, d.h. es werden nur Komponenten der Frequenz  $n \cdot f_0$  berücksichtigt, für die  $n \cdot f_0 \leq 1000$  Hz ist.

Die berechnete Summenfunktion ist in Bild 41 wiedergegeben. Die Pfeile deuten auf diejenigen "Resonanzspitzen" hin, die ein Bläser auf dem Instrument bevorzugt. Im unteren Frequenzgebiet (Pedallage) ist das Instrument durch die Vielzahl dieser Spitzen sehr schwer zu erregen, und auch bei der Messung mit der Anblasvorrichtung zeigen sich viele Maxima, die dicht gedrängt nebeneinander liegen. Als Kriterium für die "echten Naturtonfrequenzen" wurden deshalb die Frequenzen ausgewählt, bei denen die Summenfunktion möglichst stark von den tiefen Frequenzen gebildet wird. Diese Naturtonfrequenzen wählt auch ein Musiker aus der Vielzahl der Spitzen aus.

Bild 42 zeigt die Stimmungskurven des Versuchsinstrumentes, die lt. Bild 41 berechnet bzw. gemessen worden sind. Da mit der Anblasvorrichtung nur bis etwa 600 Hz gemessen werden konnte, bricht die Stimmungskurve beim 8. Naturton mit ca. 575 Hz ab. Die Zu-

ordnung der Tonbezeichnungen zu den Ordnungszahlen der Naturtöne ist dabei in Anlehnung an die üblichen Tonlagen der Blechblasinstrumente vorgenommen worden. Bei dem Versuchsinstrument war die Wahl der mathematischen Funktionen des Trichters dadurch bestimmt, daß die in der Akustik bekannten Gleichungen zur Impedanzberechnung verwendet werden konnten. Dabei war kein Wert auf eine günstige Lage der Resonanzfrequenzen gelegt worden. Dadurch weist das Versuchsinstrument einen zusätzlichen Naturton ( $g^1$ ) auf, der auf den meisten bekannten Instrumenten nicht erzeugt werden kann. Dadurch ändert sich aber die übliche Zuordnung von Ordnungszahl und Ton- bzw. Intervallbezeichnung. Auf einem üblichen Instrument, das in F (Pedalton) gestimmt ist, ist der 5. Naturton ein  $a^1$ , also eine Terz zur Oktave f. Bei dem Versuchsinstrument ist der 5. Naturton jedoch ein  $g^1$ , also eine Sekunde zum Grundton f; die Terz  $a^1$  erscheint deshalb erst beim 6. Naturton, die Quinte  $c^2$  beim 7. Naturton usw.

Die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Stimmungskurven sind bemerkenswert gering, so daß das Summenprinzip selbst dann Gültigkeit hat, wenn es auf ein nahezu vollkommen verstimmtes Blechblasinstrument angewendet wird. Wichtig ist vor allem auch, daß die Impedanz des Bläasers, die ja zeit- und frequenzabhängig ist, bei der Ermittlung der Stimmung nach dem Summenprinzip nicht berücksichtigt zu werden braucht.

### 3.4 Einfluß der Bauelemente auf die Stimmung

Beim Entwurf eines neuen Blechblasinstrumentes geht der Instrumentenmacher in erster Linie von der Klangfarbe aus, die das neue Instrument beim Blasen entwickeln soll. Da das Klangspektrum im wesentlichen von den Abstrahlungsbedingungen des Trichters geprägt wird, beginnt der Instrumentenmacher also mit der Konstruktion des Schallstückes, an das er die übrigen Instrumententeile empirisch anpaßt. Dabei kann es vorkommen, daß das Instrument nach seiner Fertigstellung sehr große Stimmungsfehler aufweist, ohne daß die Ursachen dafür geklärt werden können. Ein ähnlicher Fall kann ein-

treten, wenn der Instrumentenmacher ein Blechblasinstrument zur Reparatur erhält und gezwungen ist, einige für die Stimmung wichtige Instrumententeile zu erneuern.

Es ist daher für die Praxis von Bedeutung, die Einflüsse der wichtigsten Bauelemente auf die Stimmung im folgenden zu erörtern. Die Diskussion dieser Stimmungseinflüsse kann wegen des Summenprinzips nur an Hand der Eingangsimpedanz vorgenommen werden. Es erscheint deshalb ratsam, direkt die Änderung der Impedanzverläufe in Abhängigkeit von der Frequenz zu untersuchen.

### 3.4.1 Verhältnis von Konus zu zylindrischem Teil

Jedes Blechblasinstrument besteht aus zylindrischen und konischen Rohren, die zu verschiedenen Kombinationen zusammengesetzt sind. Unter "konisch" ist dabei nicht unbedingt die Eigenschaft zu verstehen, daß sich der Radius linear mit der Länge ändert, sondern allein die Tatsache, daß er längenabhängig ist. Die mathematische Funktion, nach der diese Durchmesseränderung erfolgt, ist für diese Definition also ohne Bedeutung. Demzufolge werden auch die Schalltrichter als konisch bezeichnet, wenngleich ihre Durchmesseränderungen oftmals nach Hyperbelfunktionen verlaufen.

Zur Vereinfachung der Darstellung werden die Unterschiede diskutiert, die sich ergeben, wenn das Instrument entweder nur zylindrisch oder nur konisch ist. Der Einfluß des Verhältnisses von Konus zu zylindrischem Teil eines üblichen Blechblasinstrumentes auf die Stimmung läßt sich dann aus den Ergebnissen dieser extremen Formen erklären.

#### 3.4.1.1 Instrument nur zylindrisch

Besteht das Instrument nur aus einem zylindrischen Rohr, dessen Querabmessungen klein im Vergleich zur Schallwellenlänge sind, so werden seine Resonanzen oder Frequenzen der Impedanzmaxima durch die Berechnung

$$l = \frac{1}{4} \lambda, \frac{3}{4} \lambda, \frac{5}{4} \lambda \dots \frac{2n-1}{4} \lambda$$

bestimmt; denn die Abschlußimpedanz stellt am offenen Ende in erster Näherung einen Kurzschluß dar. Die Intervallbreite zwischen den Resonanzen ist konstant und beträgt den doppelten Wert der tiefsten Frequenz,  $\Delta f = 2f_0$ . Bläst man solch ein zylindrisches Rohr an, so stimmen die Grundtöne der Klänge genau mit den Maximalwertfrequenzen der Eingangsimpedanz überein, und das Spektrum enthält wie bei der ebenfalls zylindrischen Klarinette nahezu nur die ungeradzahligen Harmonischen. Bei Anwendung des Summenprinzips errechnet man eine Summenfunktion, die ebenfalls eindeutige Maxima bei denjenigen Frequenzen aufweist, bei denen die Eingangsimpedanz des Rohres bei dem Grundton Höchstwerte erreicht.

Bezieht man die Resonanzfrequenzen des Rohres auf eine vollständige harmonische Obertonreihe, deren Grundtonfrequenz gleich der Intervallbreite  $\Delta f$  ist, so ergeben sich negative Abweichungen, die mit steigender Ordnungszahl der Resonanzen abnehmen. In Bild 43 sind diese Abweichungen als Kurve mit der Bezeichnung "2/2" eingetragen. Bezieht man die Resonanzfrequenzen hingegen auf den Grundton  $f_0$  des zylindrischen Rohres, bzw. auf seine Harmonischen  $2f_0, 3f_0 \dots nf_0$ , so nehmen die Abweichungen mit der Ordnungszahl zu und nähern sich asymptotisch dem Wert 100 %, d.h. die Kurve "2/2" wird etwa um 50 % in Richtung positiver Abweichungen verschoben. Ein Musiker versucht nun beim Anblasen des zylindrischen Rohres die Tonhöhe der einzelnen Klänge so zu beeinflussen, daß sie denen einer harmonischen Reihe entsprechen, die sich auf der Frequenz der 3. Resonanz aufbaut. Dadurch erscheint ihm das zylindrische Instrument bei den oberen Naturtönen zu hoch und bei den unteren zu tief in der Frequenzlage.

#### 3.4.1.2 Instrument nur konisch

Ist das Instrument über seiner ganzen Länge konisch, so hängt seine Impedanzkurve von der mathematischen Form des konischen Verlaufes ab. Betrachtet man einen rein konischen Trichter, dessen Querabmessungen sich linear mit der Länge

ändern, so ist sein Impedanzverlauf, und damit auch die Lage seiner Impedanzmaxima, eine Funktion des Steigungsmaßes  $\operatorname{tg}\alpha$  oder des Öffnungswinkels  $\alpha$ . Für  $\alpha = 0$  entartet der Trichter zu einem zylindrischen Rohr, und bei  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  ist die Eingangsimpedanz der einer Kolbenmembran in einer unendlich großen Schallwand gleichzusetzen.

Jede beliebige Trichterform kann durch eine Reihenschaltung vieler kurzer, linear-konischer Trichterelemente angenähert werden, so daß sich der Impedanzverlauf des Trichters aus denen der linear-konischen Elemente ableiten läßt. Deshalb erscheint es vorteilhaft, die Resonanzfrequenzen einiger rein konischer Trichter verschiedener Öffnungswinkel miteinander zu vergleichen.

Drei konische Instrumente der mathematischen Form  $S = S_0 x^2$  (mit  $x$  als Längenkoordinate) und dem Steigungsmaß  $\operatorname{tg}\alpha = (R-r)/l$  (mit  $r$  als Radius der Eintrittsfläche und  $R$  als Radius der Austrittsfläche) wurden bei gleicher Länge  $l = 200$  cm aber verschiedenen Öffnungswinkeln  $\alpha$  auf ihre Resonanzlagen hin untersucht. Die Impedanzberechnung erfolgte dabei nach der Gleichung [11]

$$Z_{A0} = \frac{\rho c}{S_0} \left[ \frac{j Z_{A2} \frac{\sin\beta(1-\theta_2)}{\sin\beta\theta_2} + \frac{\rho c}{S_2} \sin\beta l}{j Z_{A2} \frac{\sin\beta(1+\theta_1-\theta_2)}{\sin\beta\theta_1 \sin\beta\theta_2} - j \frac{\rho c}{S_2} \frac{\sin\beta(1+\theta_1)}{\sin\beta\theta_1}} \right] \quad (3.17)$$

wobei  $S_0 = \pi r^2$   
 $S_2 = \pi R^2$   
 $\theta_1 = \frac{1}{\beta} \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} \beta x_1$   
 $\theta_2 = \frac{1}{\beta} \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} \beta x_2$   
 $x_1 =$  Abstand von der Eintrittsfläche zum Punkte, wo  $S = 0$  würde (Spitze des Kegels)  
 $x_2 = x_1 + l$   
 $Z_{A2} =$  akustische Impedanz der Kolbenmembran nach Gl. (3.16)

Die Bilder 44 bis 46 zeigen den Verlauf der Eingangsimpedanzen für die Radius-Kombinationen  $r/R = 1/2, 2/10, \text{ und } 0,5/15$ . In Bild 43 sind die Abweichungen der Resonanzfrequenzen von einer

vollständigen harmonischen Obertonreihe mit 80 Hz Grundtonfrequenz eingetragen. Aus dem Verhältnis der Radien ergeben sich die Öffnungswinkel zu  $\alpha = 0,28^\circ, 2,29^\circ$  und  $4,16^\circ$ .

In der Literatur [10, 26, 27] wird häufig angegeben, daß sich die Resonanzfrequenzen eines einseitig schallhart abgeschlossenen Trichters genauso zueinander verhalten wie die eines beidseitig offenen zylindrischen Rohres mit einer Länge, die dem Abstand von der Trichteraustrittsfläche zu dem Punkt entspricht, bei dem sich die Begrenzungslinien des Trichters schneiden. Dieser Abstand wird mit abnehmendem Öffnungswinkel größer und würde für  $\alpha \rightarrow 0$  ("zylindrischer Trichter") gegen den Wert unendlich laufen. Ein zylindrisches Rohr endlicher Länge hat aber bekanntlich eine ungeradzahlige Folge seiner Resonanzfrequenzen.

Allein aus dieser Überlegung folgt, daß der oben angegebene Vergleich zwischen Trichter und zylindrischem Rohr nur dann Gültigkeit besitzt, wenn  $\alpha \gg 0$ ; im übrigen verhält sich der Trichter für kleine Öffnungswinkel nahezu wie ein zylindrisches Rohr der gleichen Länge. In den Impedanzverläufen (Bild 44 bis 46) kann man diese Tendenz schon erkennen, die in Bild 47 noch deutlicher wird. Sind die Abweichungen von der harmonischen Reihe für den steilen Trichter ( $0,5/15; \alpha = 4,16^\circ$ ) noch gering, so entspricht der Verlauf des flachen Trichters ( $1/2; \alpha = 0,28^\circ$ ) schon nahezu dem des zylindrischen Rohres ( $2/2; \alpha = 0$ ).

Ein rein konisches Instrument ohne Mundstück besitzt gemäß Bild 47 eine Folge von Resonanzfrequenzen, die umso weniger von den gewünschten Frequenzen einer harmonischen Reihe abweichen, je größer der Öffnungswinkel des Konus gewählt wird. Bei konstantem Eintrittsquerschnitt bedeutet eine Vergrößerung der Steilheit jedoch eine Vergrößerung des Austrittsquerschnittes. Damit verbunden nimmt die Resonanzschärfe oder Güte der Impedanzmaxima ab, und die Naturtöne sprechen beim Blasen nicht sehr leicht an. Zudem tritt schon bei tiefen

Frequenzen eine Anpassung der Bläserlippen an die Impedanz des Außenraumes auf, so daß die tieffrequenten Komponenten im Klangspektrum stark vertreten sind. Dadurch wirkt der Instrumentenklang leicht dumpf und besitzt unter Umständen eine zu geringe Zahl von Obertonkomponenten, so daß der strahlende Klang, der die Blechblasinstrumente ausmacht nicht zustande kommt. Berücksichtigt man aber in erster Linie die Stimmung eines Instrumentes, so muß gesagt werden, daß das konische Rohr dem zylindrischen Rohr vorzuziehen ist, da die Stimmungsabweichungen geringer sein werden als bei einem zylindrischen Rohr.

3.4.1.3 Instrument kombiniert zylindrisch-konisch

Bei einem Blechblasinstrument versucht man, durch geeignete Kombination von konischen und zylindrischen Röhren möglichst günstige Werte für Stimmung, Ansprache und Klang zu erzielen. Die Vorteile des zylindrischen Rohres (scharfe Resonanzen bei tiefen Frequenzen) und die Vorteile des konischen Rohres (ganzahlige Frequenzfolge der Resonanzen) sind dabei oft schwer miteinander zu verbinden, so daß Nachteile wie schlechte Stimmung, unbefriedigende Klangfarbe und schwere Ansprache auftreten.

Um den Einfluß des Schalltrichters, also des wichtigsten konischen Teiles, auf die Stimmung einer Posaune zu erfassen, wurden drei Trichter konstruiert, die mit den Bezeichnungen "hyperbolisch 1", "hyperbolisch 2" und "exponentiell 3" in Bild 47 dargestellt sind. Ihre mathematischen Funktionen, nach denen sich die Radien mit der Länge ändern, lauten:

$$\text{hyperbolisch 1: } r_1(x) = \frac{9,4}{\left(\frac{x}{2,0754} + 1\right)^{0,7}}$$

$$\text{hyperbolisch 2: } r_2(x) = 0,176812 + \frac{44,78319}{x+4,8555}$$

$$\text{exponentiell 3: } r_3(x) = 0,74829 + 8,647668e^{-0,070737x}$$

mit der Längen-Koordinate x, die vom Austrittsende zum engen Trichteranfang läuft. Die drei Trichter besitzen die gleiche

Länge und die gleichen Durchmesser am Anfang und am Ende. Außerdem hat die Steigung am Anfang für alle Trichter die gleiche Größe.

$$r_1(0) = r_2(0) = r_3(0) = 94 \text{ mm}$$

$$r_1(55) = r_2(55) = r_3(55) = 9,25 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{d r_1(x)}{dx}\right)_{x=55} = \left(\frac{d r_2(x)}{dx}\right)_{x=55} = \left(\frac{d r_3(x)}{dx}\right)_{x=55}$$

Mit steigendem Index nimmt die Trichterform immer mehr Ähnlichkeit mit einem rein konischen Trichter der Funktion  $r = r_0 \cdot x$  an. In erster Näherung kann deshalb folgende Vereinfachung gemacht werden: der Trichter mit der Bezeichnung "hyperbolisch 1" wird ersetzt durch ein zylindrisches Rohr von ca. 2/3 der Gesamtlänge sowie einen kurzen Trichter von 1/3 der Gesamtlänge; das Verhältnis von konischem zu zylindrischem Teil ergibt sich somit zu 1/2. Für den Trichter 2 wäre eine Aufteilung von 1/3 und für den Trichter 3 etwa 1/4 zu wählen.

Bei einer engmensurierten Tenorposaune üblicher Bauart wurde der Schalltrichter durch je einen der drei Versuchstrichter ersetzt und die Stimmung unter gleichbleibenden Bedingungen mit der Anblasvorrichtung aufgenommen. Zur Gegenüberstellung sind die Stimmungskurven in Bild 48 bis zum 10. Naturton aufgetragen. Man erkennt deutlich den Einfluß des zunehmenden zylindrischen Teiles, das eine Erniedrigung der Stimmung bei tiefen Frequenzen bewirkt (vgl. Bild 43). Durch das Summenprinzip wird die Verschiebung der Resonanzfrequenzen der einzelnen Komponenten zum Teil ausgeglichen, so daß die Stimmungsunterschiede wesentlich geringer ausfallen, als die Unterschiede der Frequenzen der einzelnen Impedanzmaxima vermuten lassen. Die Stimmungsabweichungen des Bildes 48 oberhalb des 7. Naturtones werden hauptsächlich durch das Mundstück verursacht, dessen Wirkung im nächsten Abschnitt behandelt wird.

### 3.4.2 Mundstück und Mundrohr

Das Mundstück mit dem angekoppelten Mundrohr bildet das Verbindungsglied zwischen Musiker und Instrument. Es ist eine weit verbreitete Meinung der Musiker, daß das Mundstück nicht zum Instrument, sondern zum Musiker gehört. Beim Erwerb eines neuen Instrumentes wird es von den Musikern deshalb meistens abgelehnt, mit dem Instrument auch das Mundstück durch ein neues zu ersetzen. Daß diese Einstellung falsch ist und das Mundstück vielmehr als zum Instrument gehörend betrachtet werden muß, sollen die Ausführungen dieses Abschnittes erläutern.

Das Mundrohr kann als konisches Rohr mit geringer Steigung angesehen werden; sein Einfluß auf die Lage der Impedanzmaxima wurde schon in Abschnitt 3.4.1.2 behandelt, darüber hinaus ist seine Wirkung in stärkerem Maße bei der Betrachtung von Ansprache und Klangfarbe eines Instrumentes zu berücksichtigen.

#### 3.4.2.1 Vereinfachte Darstellung des Mundstückes

Das Mundstück des Versuchsinstrumentes war aus zylindrischen Teilen zusammengesetzt worden, um die bekannten Leitungsgleichungen für zylindrische Rohre anwenden zu können. Nun haben die in der Praxis üblichen Mundstücke eine recht komplexe Form, die nicht mit zylindrischen Rohren angenähert werden kann. Um diese Mundstücke dennoch in die Berechnung mit einbeziehen zu können, wurde versucht, sie als konzentrierte Schaltelemente darzustellen, die dann einfach vor das Instrument geschaltet werden. Betrachtet man das Luftvolumen im Kessel als Feder, so errechnet sich ihre Nachgiebigkeit  $N$  zu

$$N = \frac{V}{\rho c^2} \quad \text{in} \quad \frac{\text{cm}^4 \text{s}^2}{\text{g}} \quad (3.18)$$

mit dem Volumen  $V$ . Der Hals des Mundstückes wird wegen seiner geringen Querabmessungen als Masse  $M$  angesehen, die sich mit

der Halslänge  $l_H$  und der Querschnittsfläche  $S_H$  zu

$$M = \frac{\rho l_H}{S_H} \quad \text{in} \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^4} \quad (3.19)$$

errechnen läßt. Durch die hohe Impedanz der Bläserlippen ist der Kessel als Hohlraum anzusehen, der in den Hals mündet. Das Mundstück stellt somit einen Helmholtz-Resonator dar, dessen Resonanzfrequenz durch

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M \cdot N}} \quad (3.20)$$

bestimmt ist. Koppelt man diesen Resonator an das Instrument, so kann man das Ersatzschaltbild, das in Bild 49 dargestellt ist, für die Impedanzberechnung zu Grunde legen. Die Eingangsimpedanz  $Z_0$  errechnet sich daraus zu

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{\frac{1}{j\omega N} (j\omega M + Z_{AO})}{\frac{1}{j\omega N} + j\omega M + Z_{AO}} \\ &= \frac{j\omega M + Z_{AO}}{1 - \omega^2 MN + j\omega N Z_{AO}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Mit den Gleichungen (3.18) und (3.19) ergeben sich die Elemente für das zylindrische Mundstück des Versuchsinstrumentes zu

$$\begin{aligned} M &= 0.02874333 \frac{\text{g}}{\text{cm}^4} \\ \text{sowie} \quad N &= 0.00000612 \frac{\text{cm}^4 \text{s}^2}{\text{g}} \end{aligned}$$

Die Berechnung der Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes unter Verwendung der Gl. (3.21) ergab Maximalwertfrequenzen, die kaum von denen abwichen, die mit der Darstellung des Mundstückes als Leitungen errechnet worden waren. Bei der Summenbildung mittelten sich diese kleinen Abweichungen fast vollständig aus, so daß die Vereinfachung durch Darstellung des Mundstückes als konzentrische Elemente zulässig ist.

Dieses Ergebnis ermöglicht die genaue Berechnung der Stimmung eines Blechblasinstrumentes mit beliebig geformten Mundstücken. Dazu bestimmt man das genaue Kesselvolumen sowie die Resonanzfrequenz auf experimentelle Weise. Die einfachste, aber dennoch sehr genaue Messung der Resonanzfrequenz erhält man, wenn man mit dem flachen Handteller auf den Mundstücksrand schlägt und die Grundtonfrequenz des erzeugten Klangimpulses mit einer abstimmbaren Sinus-Frequenz vergleicht. Aus den Meßwerten von Volumen und Resonanzfrequenz wird dann die Nachgiebigkeit nach Gl. (3.18) und die Masse mit der umgeformten Gl. (3.20) errechnet. Mit diesen Werten kann der Einfluß des Mundstückes auf Impedanz und Maximalwertfrequenz über die Gl. (3.21) sehr einfach erfaßt werden.

#### 3.4.2.2 Einfluß des Kesselvolumens

Eine Veränderung der Größe eines der beiden Mundstückselemente Kessel und Hals ergibt eine Verschiebung der Resonanzfrequenz des Helmholtz-Resonators gemäß Gl. (3.20). Diese Resonanzfrequenz ist aber ein sehr wichtiges Hilfsmittel zur Erlangung einer günstigen Stimmungskurve eines Metalblasinstrumentes. Für die rücklaufende Schallwelle im Instrument verhält sich das Mundstück wie eine Reihenschaltung von Nachgiebigkeit und Masse. In der Nähe der Resonanzfrequenz ist die rückwärtige Eingangsimpedanz des Mundstückes durch die Reihenresonanz sehr niedrig, so daß die rücklaufende Welle bis zu den Lippen vordringen kann und erst dort reflektiert wird. Unterhalb und oberhalb der Resonanzfrequenz nimmt die Größe der rückwärtigen Eingangsimpedanz mit dem Abstand von der Resonanzfrequenz zu, so daß die rücklaufende Welle schon am Eintritt des Mundstückshalses reflektiert wird. Dadurch ergibt sich eine "Verlängerung" der schwingenden Luftsäule im Instrument, die in der Nähe der Helmholtz-Resonanz des Mundstückes einen Höchstwert erreicht. Für die einlaufende Welle sind die Verhältnisse nicht so übersichtlich, da der Abschluß des Mundstückshalbgliebes die Eingangsimpedanz des Instrumentes darstellt.

Wie sich eine Verringerung des Kesselvolumens um jeweils 25 % auf die Frequenzlage der Impedanzmaxima auswirkt, ist in Bild 50 dargestellt. Bei dem ursprünglichen Kesselvolumen mit der Nachgiebigkeit  $N_0$  tritt eine maximale negative Abweichung im Bereich der Resonanzfrequenz (5. bis 6. Resonanz) auf. Durch Verringerung des Volumens auf  $0,5 N_0$  bzw.  $0,25 N_0$  verschiebt sich die Resonanzfrequenz zu höheren Werten, so daß der Einfluß des Mundstückes bei tiefen Frequenzen abnimmt. Für  $N=0$  ist die Wirkung einer "Verlängerung" des Instrumentes durch das Volumen vollständig aufgehoben, und es tritt sogar eine "Verkürzung" ein, die durch die Querschnittsänderung an der Verbindungsstelle von Hals und Mundrohr verursacht wird.

#### 3.4.2.3 Einfluß des Mundstückshalses

Werden die Dimensionen des Mundstückshalses verändert, so verschiebt sich zwar auch die Helmholtz-Resonanz des Mundstückes, die Abweichungen der Instrumentenresonanzen sind jedoch nicht so groß wie bei der Kesseländerung. Bild 51 zeigt die Abweichungen bei Verringerung der Halsmasse um jeweils 25 %. Die grundsätzliche "Verlängerung" des Instrumentes durch das Kesselvolumen bleibt nahezu für alle Frequenzen erhalten, und nur das Maximum der negativen Abweichungen im Bereich der Mundstücksresonanz flacht mit abnehmenden  $M$ -Werten ab. Dadurch kann die Stimmung eines Blechblasinstrumentes durch Veränderung der Bohrung und des angrenzenden Halskonus sehr fein abgestimmt werden.

Die Veränderung der Mundstücksdimensionen wirkt sich jedoch nicht nur auf die Resonanzlage des Instrumentes aus, sondern sie hat auch einen starken Einfluß auf die Ansprache und das Klangspektrum. Betrachtet man z.B. das Bild 41, in dem die Summenfunktion des Versuchsinstrumentes aufgetragen ist, so stellt man fest, daß eine Trennung der Naturtöne bei tiefen Frequenzen schwierig ist. Das liegt daran, daß das verwendete Mundstück mit  $M_0$  und  $N_0$  viel zu groß für dieses Instrument ist.

Vergleicht man die Summenfunktionen bei Änderung der Mundstückselemente M und N, so findet man heraus, daß  $N = 0,25 N_0$  und  $M = M_0$  die günstigsten Parameter für dieses Instrument darstellen. Das wird besonders deutlich, wenn man die Summenfunktion von Bild 52 mit der von Bild 41 vergleicht. Die Naturtöne niedriger Frequenz sind bei diesem Mundstück ( $N = 0,25 N_0$ ) besonders gut definiert und können auch wesentlich leichter angeblasen werden als mit dem großen Mundstückskessel.

#### 4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Zusammenhang abgeleitet zwischen den Resonanzfrequenzen eines Blechblasinstrumentes und den Naturtonfrequenzen, die ein Musiker auf dem Instrument erzeugt. Ausgangspunkt ist dabei die Tatsache, daß die durch die Schwingungen der Lippen verursachte zeitliche Abhängigkeit der Bläserimpedanz trotz sinusförmiger Anregung ein Schalldrucksignal erzeugt, das einen relativ hohen Obertongehalt aufweist. Deshalb muß nicht nur die Energie der Grundwelle, sondern die gesamte vom Bläser abgegebene Schallenergie berücksichtigt werden. Unter dieser Voraussetzung lassen sich die Naturtonfrequenzen aus dem Frequenzverlauf der Eingangsimpedanz errechnen, indem die Summe aller Realteile gebildet wird, die das Instrument bei den Grund- und Obertonfrequenzen eines Klangspektrums besitzt. Die Maxima der so erhaltenen Summenfunktion entsprechen hinsichtlich ihrer Frequenzlage genau den Naturtonfrequenzen, die beim Anblasen durch mehrere Musiker gemessen wurden.

Zur Bestimmung der Eingangsimpedanz auch bei sehr tiefen Frequenzen wurde ein Meßverfahren entwickelt, bei dem die Impedanzmessung durch eine Schalldruckmessung ersetzt wird. Mit diesem Verfahren können sowohl der Betrag als auch der Phasenwinkel der akustischen Impedanz ermittelt werden.

Für objektive Untersuchungen von Blechblasinstrumenten wurde eine künstliche Anblasvorrichtung konstruiert, mit der erstmals diejenigen Naturtonfrequenzen gefunden wurden, die auch ein Musiker auf dem Instrument erzeugt. Die Anblasvorrichtung besitzt wie der Bläser einen zeitabhängigen Innenwiderstand, so daß auch ihr Anregungssignal dem des Bläusers gleicht.

Mit der Anblasvorrichtung wurden die Einflüsse von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Stimmung einer Posaune untersucht. Dabei zeigte sich lediglich eine Temperaturabhängigkeit, die durch die veränderte Schallgeschwindigkeit verursacht wird.



Zur rechnerischen Ermittlung der Stimmung wurde ein Versuchsinstrument konstruiert, das aus einem zylindrischen Rohr mit einem Exponentialtrichter sowie einem zylindrischen Mundstück bestand. Die mathematischen Funktionen der Bauelemente wurden dabei derart gewählt, daß ihre Impedanzen mit in der Akustik bekannten Gleichungen ermittelt werden konnten. Durch mehrfache Impedanztransformation wurde die Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes in Abhängigkeit von der Frequenz berechnet. Mit Hilfe des Summenprinzips wurden die Naturtonfrequenzen ermittelt und mit den gemessenen Werten verglichen. Die Übereinstimmung war sehr gut, so daß mit diesem Verfahren erstmals ein Weg gefunden wurde, um die Stimmung von Blechblasinstrumenten zu berechnen.

Die Beeinflussung der Stimmung durch Änderung der einzelnen Bauelemente wie zylindrisches Rohr, konisches Rohr und Mundstück wird an Hand von Beispielen untersucht. Dabei wird eine Ersatzschaltung des Mundstückes gewählt, die eine übersichtliche Betrachtung der komplexen Mundstücksformen zuläßt. Aus den Ergebnissen folgt, daß vor allem dann dem Mundstück eine besondere Bedeutung zukommt, wenn die Instrumentenstimmung in engen Bereichen geändert werden soll. Das Mundstück ist deshalb, entgegen der üblichen Meinung, als zum Instrument gehörend zu betrachten.

### 5. Literaturverzeichnis

- [ 1 ] Martin, D.W.: A Physical Investigation of the Performance of Brass Musical Wind Instruments. Dissertation 1941. University of Illinois.
- [ 2 ] Webster, J.C.: An Electrical Method of Measuring the Intonation of Cup-Mouthpiece Instruments. JASA 19, 1947, 902.
- [ 3 ] Igarashi, J. und Koyasu, M.: Acoustical Properties of Trumpets. JASA 25, 1953, 122.
- [ 4 ] Krüger, W.: Objektive Untersuchungsmethoden bei Metallblasinstrumenten. Das Musikinstrument 3, 1968.
- [ 5 ] Lieber, E.: Ermittlung der Naturtonlagen bei Metallblasinstrumenten. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Band 69, Heft 1, 1960, 29.
- [ 6 ] Aebi, W.: Das Waldhorn und seine innere Akustik. Schweizerische Bauzeitung 87, 38, 1969.
- [ 7 ] Webster, J.C.: Internal Tuning Differences due to Players and the Taper of Trumpet Bells. JASA 21, 1949, 208.
- [ 8 ] Kurka, M.J.: A Study of the Acoustical Effects of Mutes on Wind Instruments. M.Mus.Thesis 1958, University of South Dakota.
- [ 9 ] Hunt, F.V.: Investigation of Room Acoustics by Steady-State Transmission Measurements. JASA 10, 1939, 216.
- [ 10 ] Long, T.H.: The Performance of Cup-Mouthpiece Instruments, JASA 19, 1947, 892.
- [ 11 ] Olson, H.F.: Acoustical Engineering. D. van Nostrand Company Inc. Princeton, New Jersey 1957.
- [ 12 ] Louden, M.E.L.: Untersuchungen von Reflexionsvorgängen in Rohren mit Hilfe akustischer Impulse. Dissertation 1964, TH Braunschweig.
- [ 13 ] Skudrzyk, E.: Die Grundlagen der Akustik. Springer-Verlag Wien 1954.

- [14] Bürck, W. und Lichte, H.: Über die Schallfortpflanzung in Rohren. Akustische Zeitschrift 3, 1938.
- [15] DIN 52 215, Schallabsorptionsgrad im Rohr, Ausgabe 1963.
- [16] Wogram, K.: Untersuchung über die Eignung des Lautsprecher- und Preßluftverfahrens zur Prüfung von Kraftfahrzeugschalldämpfern. Diplomarbeit 1967, TH Braunschweig.
- [17] Reichardt, W.: Grundlagen der Technischen Akustik. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1968.
- [18] Barton, E.H. und Laws, S.C.: Air Pressure Used in Playing Brass Instruments. Phil.Mag. 3, 1902, 385.
- [19] Young, R.W.: Dependence of Tuning of Wind Instruments on Temperature. JASA 17, 1946, 187.
- [20] Trendelenburg, F.: Einführung in die Akustik. Springer-Verlag Berlin, 1961.
- [21] Mühle, Ch.: Untersuchungen über die Resonanzeigenschaften der Blockflöte. Dissertation 1966, TH Braunschweig.
- [22] Meyer, J.: Über die Intonation bei den Klarinetten. Instrumentenbau-Zeitschrift 23, 1969, 480.
- [23] Lottermoser, W.: Klanganalytische Untersuchungen an Zungenpfeifen. Neue deutsche Forschung. Band 105, Berlin 1936.
- [24] Unger, H.-G.: Theorie der Leitungen. Vorlesungsniederschrift, TH Braunschweig 1963.
- [25] Lange, Th.: Die Eigenfrequenzen von Trichtern. Acustica 5, 1955, 323.
- [26] Nederveen, C.J.: Acoustical Aspects of Woodwind Instruments. Frits Knut, Amsterdam 1969.
- [27] Lord Rayleigh: Theory of Sound. New York 1945.
- [28] Backus, J. und Hundley, T.C.: Harmonic Generation in the Trumpet. JASA 49(2), 1971, 509.

Weitere Literatur, die zur Einarbeitung in das Fachgebiet der Akustik der Blechblasinstrumente benutzt wurde:

- 1) Ancell, J.E.: Sound Pressure Spectra of a Muted Cornet. JASA 32, 1960.
- 2) Backhaus, H.: i.Hdbuch d. Experimentalphysik. Akadem. Verlagsges. Leipzig 1934.
- 3) Backhaus, H.: Über die Bedeutung der Ausgleichsvorgänge in der Akustik. Z.f.techn.Physik XIII, 1932.
- 4) Bahnert, H., u.a.: "Metallblasinstrumente". Fachbuchverlag Leipzig 1958.
- 5) Ballantine, S.: On the Propagation of Sound in the General Bessel Horn of Infinite Length. Journal Fr. Inst. 203, 85, 1927.
- 6) Bate, A.E.: Resonance in Coupled Pipes. Phil. Mag. 16, 1933.
- 7) Benade, A.H.: Wind Instruments Performance. Annals o.t. New York Academy of Sciences 155, 1968.
- 8) Benade, A.H. u. Worman, W.E.: Oscillation in a Clarinet-like System. Report from Case Western Reserve University Cleveland, Ohio 1969.
- 9) Blaikley, D.J.: Experiments for Determining the Correction to be added to the Length of a Cylindrical Resonant Tube to find the true Wavelength, and the Velocity of Sound in Small Tubes. Phil. Mag. 5, 7, 1879.
- 10) Boehm, W.M.: Determination of the Correction for the Open End of a Cylindrical Resonator. Phys. Rev. 31, 1910.
- 11) Büttner, M.: Nur der Edle sei Trompeter. VDI-Nachr. 13/26, 1959.
- 12) Campbell, R.A.: A Study of the Effects of Selected Interior Contours of the Trombone Mouthpiece upon the Tone Quality of a Trombone. M.Mus.Thesis. Univers. of Texas, 1954.
- 13) Carse, A.: "Mus. Wind Instruments". McMillan & Co., London, 1939.

- 14) Colwell, R.C. u. Gipson, L.H.: Sound Velocity of Gases Under Different Pressures. JASA 12, 1941.
- 15) Cremer, L.: "Die wissenschaftl.Grundlg. der Raumakustik". Hirzel-Verlag, Leipzig 1950.
- 16) Deditius, K.: Die Fehler des Blechblasinstrumentes. Mus. Instr. Zeitung 1896/97.
- 17) Draper, F.C.: "Notes on the Boosey & Hawkes System of Automatic Compensation of Valves Brass Wind Instruments". London 1953.
- 18) Drechsel, F.A.: "Zur Akustik der Blasinstrumente", Paul de Wit. Lpz. 1927.
- 19) Eichhorn, H.: "Über das Oktavierungsprinzip bei Blechblasinstrumenten, insbesondere bei Waldhörnern", Lpz.1889.
- 20) Fay, R.D.: Attenuation of Sound in Tubes. JASA 12, 1940
- 21) Fickenscher, A.: The Polytone and the Potentials of a Purer Intonation. The Musical Quarterly 27, 1941.
- 22) Hall, J.C.: "The Proper Selection of Cup Mouthpieces. Conn Education Serie 1963.
- 23) Hardy, H.C., u.a.: The Velocity of Sound in Air. JASA 13, 1942.
- 24) Henderson, H.W.: An Experimental Study of Trumpet Embouchure. JASA 13, 1942.
- 25) Hofmann, H.: "Über den Ansatz der Blechbläser". BVK, Kassel und Basel 1956.
- 26) Ingard, U., u.a.: Acoustic Nonlinearity of an Orifice. JASA 42, 1967.
- 27) Ingard, U.: On the Turbulence Limit for Sound through Apertures. JASA 22, 1950.
- 28) Jones, A.T.: Resonance in Certain Non-Uniform Tubes. JASA 10, 1939.
- 29) Kalähne, A.: Schallerzeugung mit mechanischen Mitteln. Hdbuch d. Physik VIII, 1927.

- 30) Kirchmeyer, H.: Die Rekonstruktion der Bach-Trompete. Das Musikinstrument 12, 1961 und 1, 1962.
- 31) Leipp, E.: Die Mundhöhle, ein empfindlicher Parameter der von Blasinstrumenten ausgestrahlten Spektren. Vortrag 4. ICA, Kopenhagen 1962.
- 32) Luce, D.R. u. Clark, M.: Physical Correlates of Brass Instrument Tones. JASA 42, 1967.
- 33) Mang, W.: Zur Tonreinheit der Blechblasinstrumente. Instrumentenbau-Zeitschrift 2, 1948.
- 34) Martin, D.W.: Directivity and the Acoustic Spectra of Brass Instruments. JASA 13, 1942, 2 Arbeiten.
- 35) Meyer, E. u. Buchmann, G.: Die Klangspektren der Musikinstrumente. I.Abh.d.Kgl.Preuß.Akad.d.Wissensch., Math.-Phys. Klasse 32, 1931.
- 36) Meyer, J.: Über Resonanzeigenschaften und Einschwingvorgänge von labialen Orgelpfeifen. Dissertation, TH Braunschweig, 1960.
- 37) Meyer, J.: Akustik der Holzblasinstrumente in Einzeldarstellungen. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt, 1966.
- 38) Meyer, J. u. Wogram, K.: Die Richtcharakteristiken des Hornes. Das Musikinstrument 18, 1969.
- 39) Meyer, J. u. Wogram, K.: Die Richtcharakteristiken von Trompete, Posaune und Tuba. Das Musikinstrument 19, 1970.
- 40) Meinel, H.: Zur Stimmung der Musikinstrumente. Acustica 4, 1954.
- 41) Meinel, H.: Zum Einfluß der Tonsysteme auf den Normstimmton. Acustica 5, 1955.
- 42) Moritz, C.: "Die Orchesterinstrumente in akust. u. techn. Betrachtung". Berlin 1943.
- 43) Morse, P.M.: "Vibration and Sound". McGraw-Hill, New York 1948.
- 44) Nix, J.: Kleiner Lehrgang der Stimmpraxis. Das Musikinstrument 7, 1958.
- 45) Pielemeier, W.H.: Velocity of Sound in Air. JASA 10, 1939.

- 46) Pietzsch, H.: Die Trompete als Orchesterinstrument. Heilbronn 1901.
- 47) Rayleigh, J.W.S.: Perception of the Direction of a Source of Sound. Phil. Mag. Ser. 5, 3, 1877.
- 48) Redfield, J.: Minimizing Discrepancies of Intonation in Valve-Instruments. JASA 3, 1931.
- 49) Redfield, J.: Certain Anomalies in the Theory of Air Column Behaviour in Orchestral Instruments. JASA 6, 1934.
- 50) Richardson, E.G.: The Transient Tones of Wind Instruments. JASA 26, 1954.
- 51) Richardson, E.G.: Acoustics of Orchestral Instruments. Arnold 1926.
- 52) Richardson, E.G.: Sound. Arnold, London 1929.
- 53) Seiberth, H.: Mitnahmeerscheinungen in der Akustik. HF- u. Elektroakustik 45, 1935.
- 54) Simbringer, H. u. Zehlein, A.: Handbuch der Mus.Akustik. Regensburg 1951.
- 55) Sivian, L.J.: Acoustical Impedance of Small Orifices. JASA 7, 1935.
- 56) Sounders, F.A.: Analyzes of the Tones of a few Wind Instruments. JASA 18, 1946.
- 57) Shields, F.D. u.a.: Numerical Solution of Sound Velocity and Absorption in Cylindrical Tubes. JASA 37, 1965.
- 58) Schemintzky, F.: Die Welt des Schalles. Das Bergland-Buch, Graz-Wien 1935.
- 59) Schmidt, H.: "Die phys. Grundlagen der Musik". Franzis-Verlag, München 1956.
- 60) Stauffer, D.W.: Intonation Deficiencies of Wind Instruments in Ensemble. JASA 27, 1955.
- 61) Tischner, H.: Über die Fortpflanzung des Schalles in Röhren. E.N.T. 7, 1930.
- 62) Trendelenburg, F.: Klänge und Geräusche. Springer-Verlag Berlin 1935.

- 63) Trimmer, J.D.: Resonant Frequencies of Certain Pipe Combinations. JASA 11, 1939.
- 64) Vêr, J.L.: Wellentheoretische Betrachtung akustischer Grundelemente. Frequenz 18, 1964.
- 65) Woodward, J.G.: Resonance Characteristics of a Cornet. JASA 13, 1941.
- 66) Young, R.W.: Some Characteristics of the Tuning of Valved Wind Instruments. JASA 13, 1941.
- 67) Young, F.J.: The Natural Frequencies of Musical Horns. Acustica 10, 1960.
- 68) Young, T.C.: The Making of Musical Instruments. OUP London 1939.

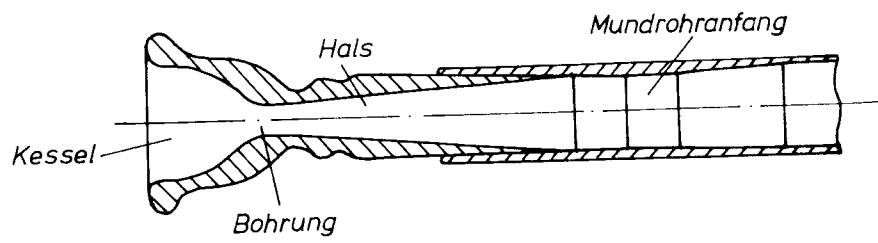
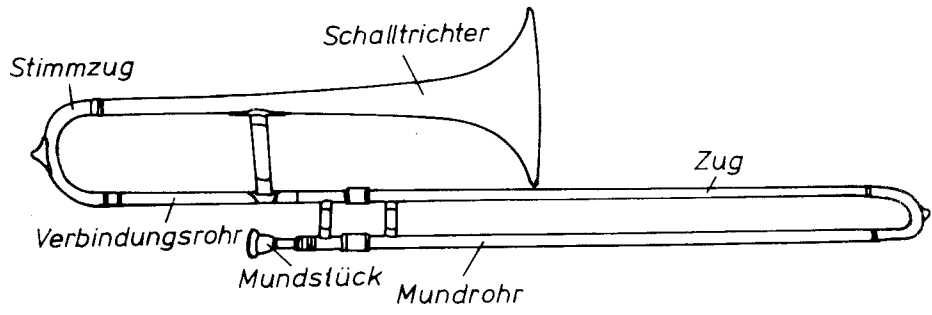


Bild 1 Aufbau einer Posaune

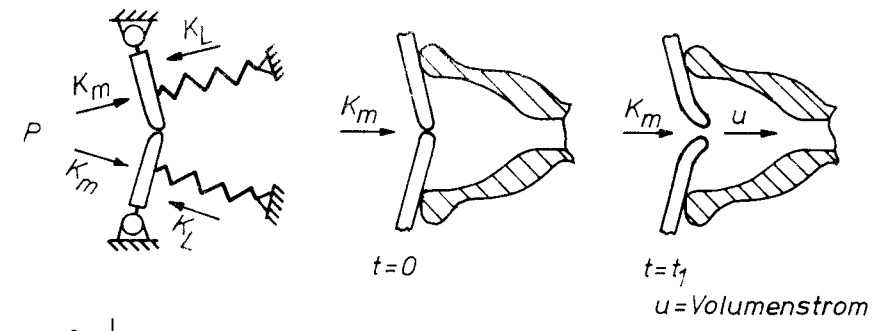


Bild 2 Ersatzmodell der Bläserlippen mit dem zeitlichen Verlauf der Lippenspalitfläche

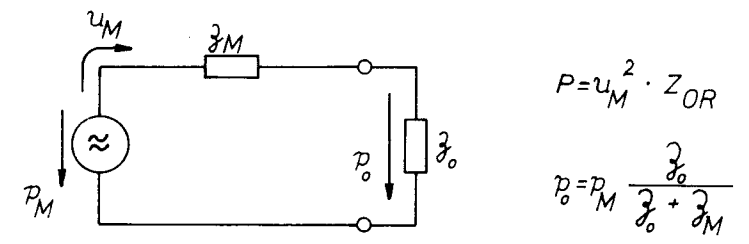


Bild 3 Ersatzschaltbild für den Bläser mit Instrument

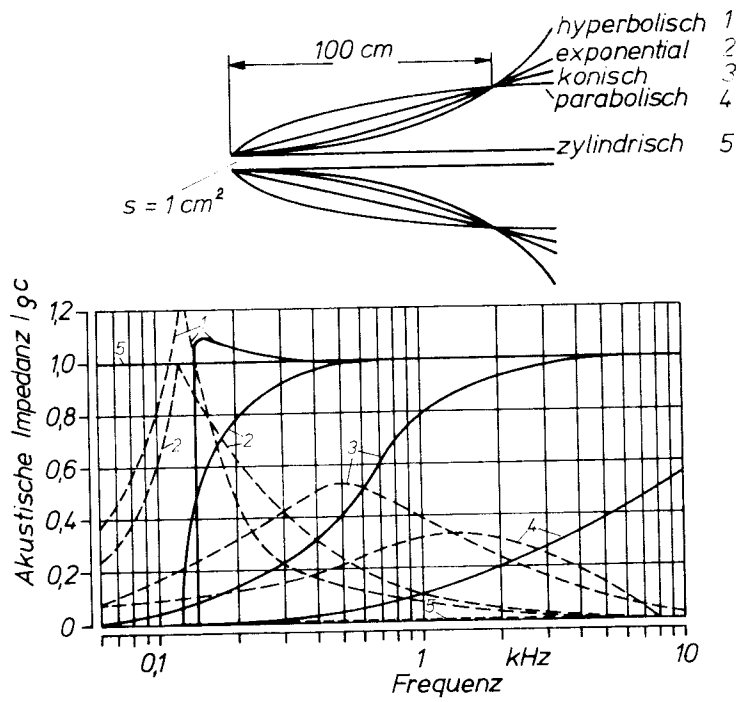


Bild 4 Real- und Imaginärteile der Eingangsimpedanzen mehrerer unendlich langer Trichter bezogen auf  $g c$  [11]  
 ———  $\hat{=}$  Realteil; - - - -  $\hat{=}$  Imaginärteil

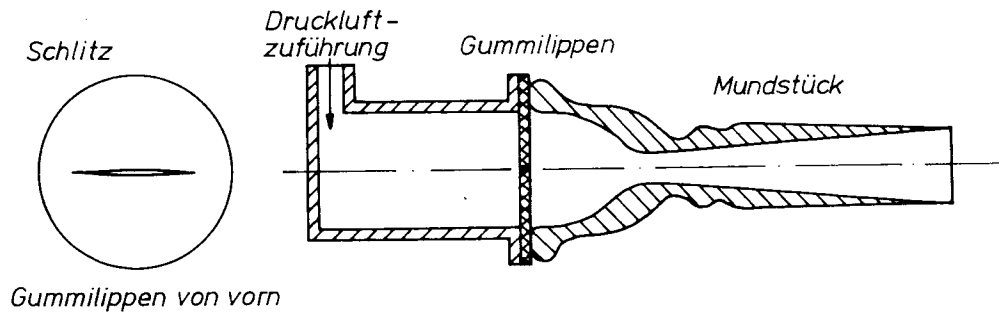


Bild 5 Prinzipskizze des Anregungssystems mit Gummilippen

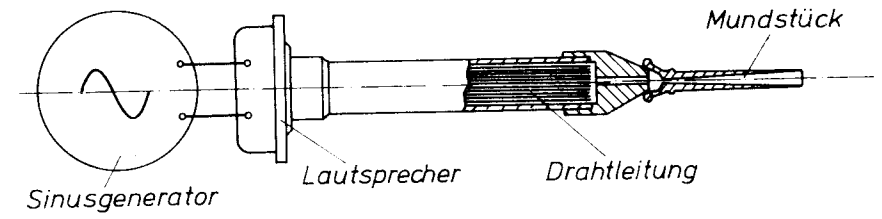


Bild 6 Prinzipskizze des akustischen Anregungssystems mit Lautsprecher und Drahtleitung (nicht maßstabsgerecht)

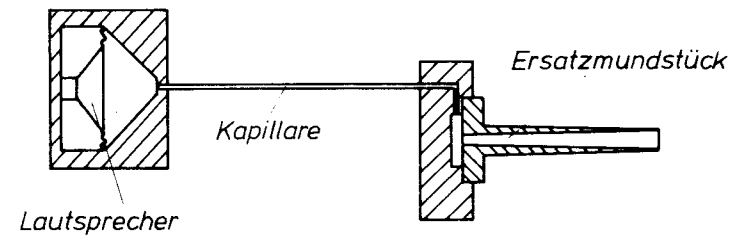


Bild 7 Prinzipskizze der Schallquelle bei Anregung über eine Kapillare

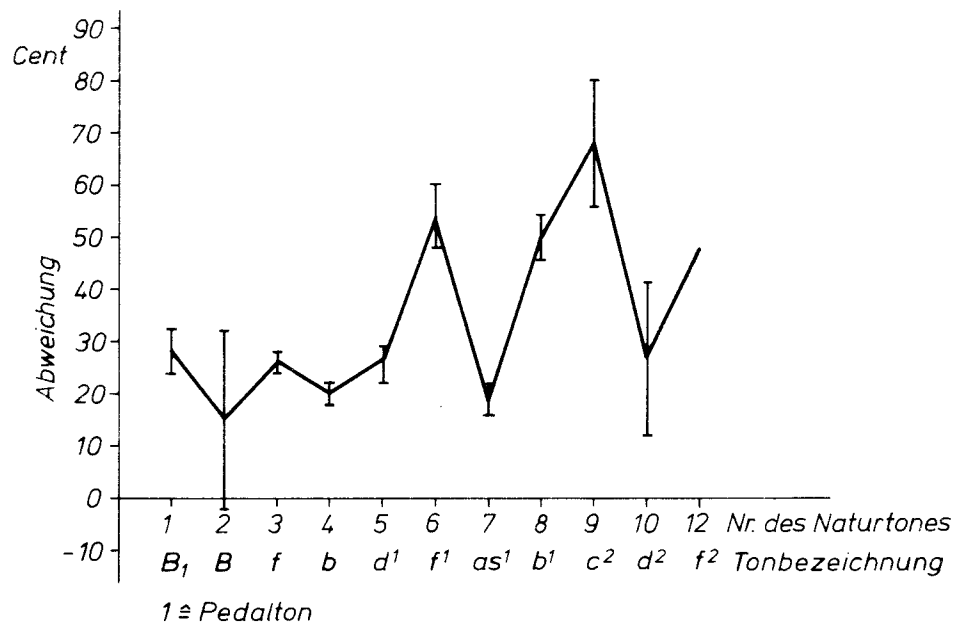


Bild 8 Stimmungsverlauf mit Streuung der Versuchsperson  
bei einem einzigen Musiker  
( der 11. Naturton konnte nicht angeblasen werden )

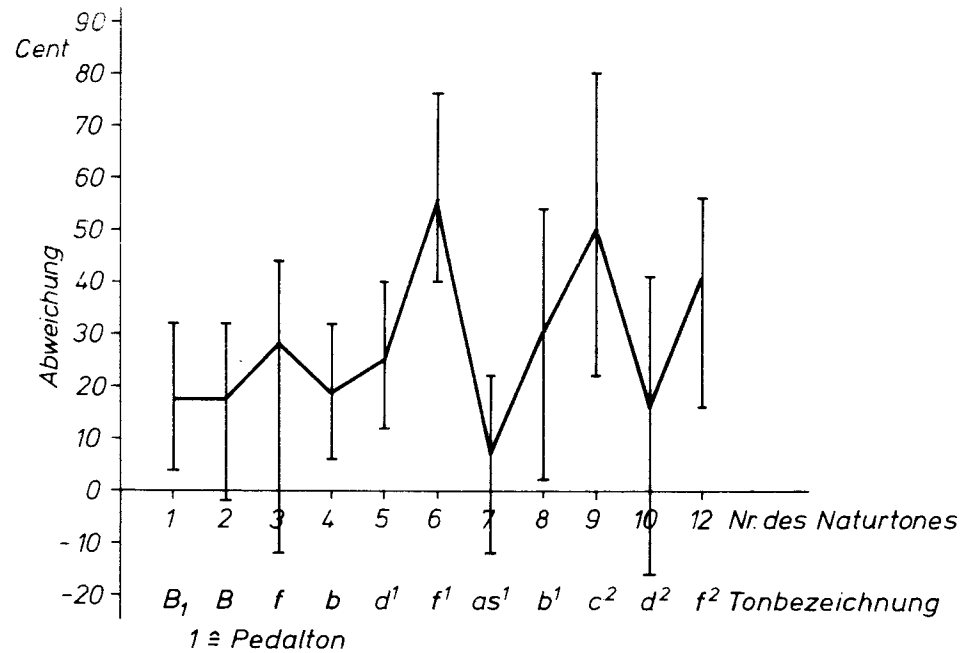


Bild 9 Stimmungsverlauf mit Streuung der Versuchsperson  
bei mehreren Musikern  
( der 11. Naturton konnte nicht angeblasen werden )

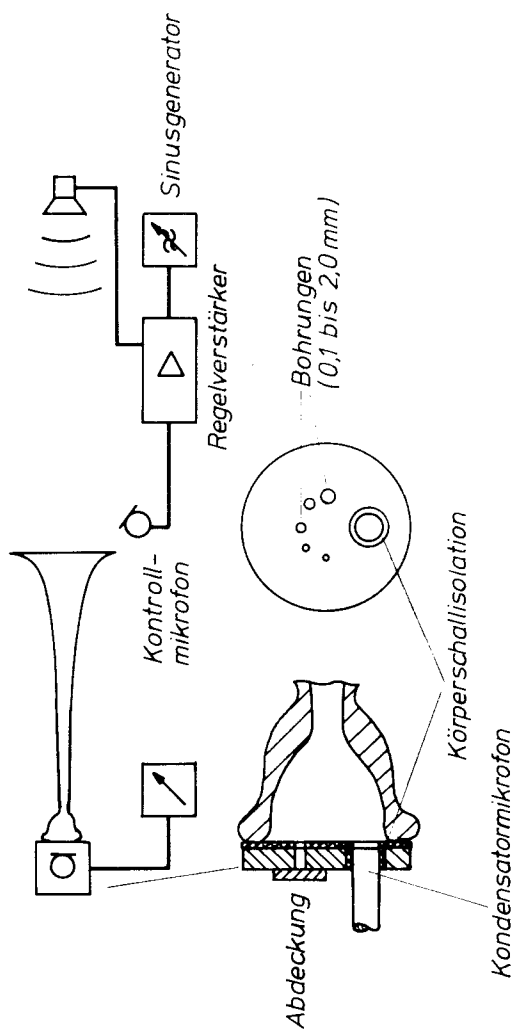


Bild 10 Blockschaltbild des Meßaufbaues bei reziproker Anregung

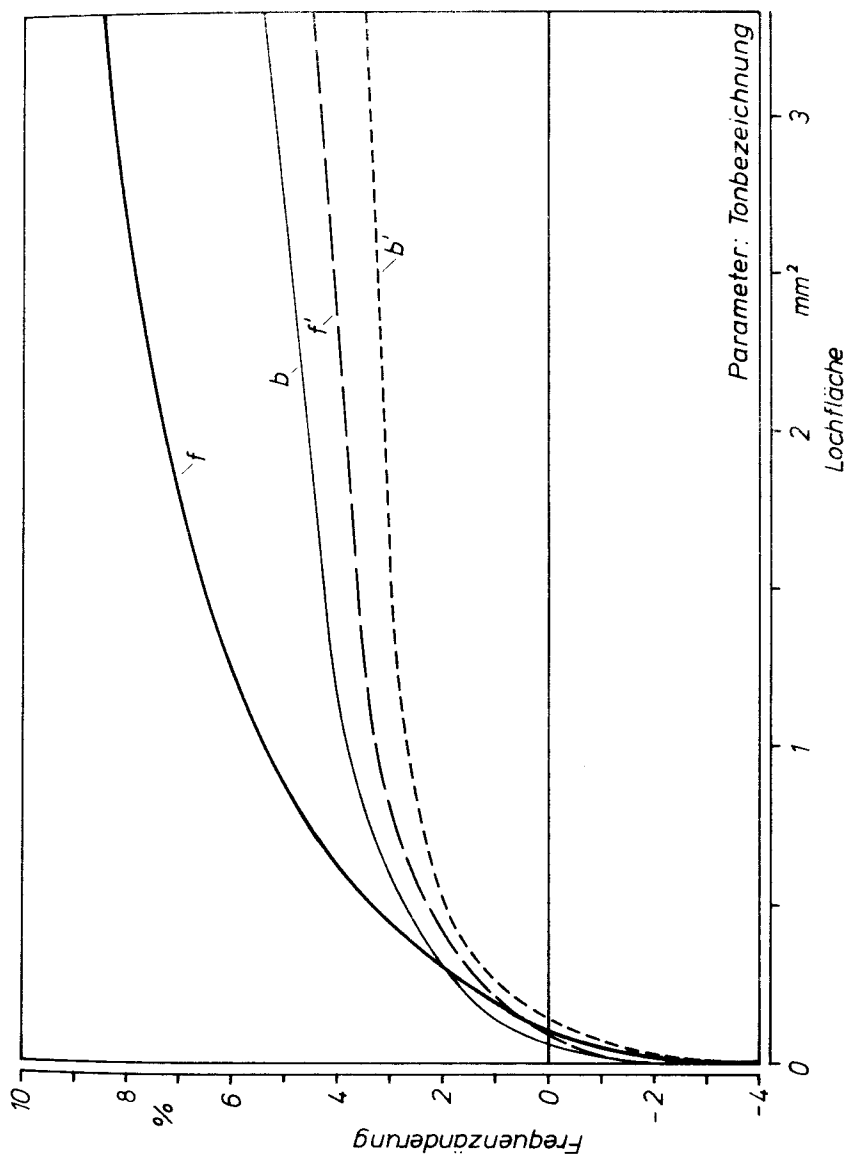


Bild 11 Frequenzänderung bei reziproker Anregung gegenüber den geblasenen Tonfrequenzen



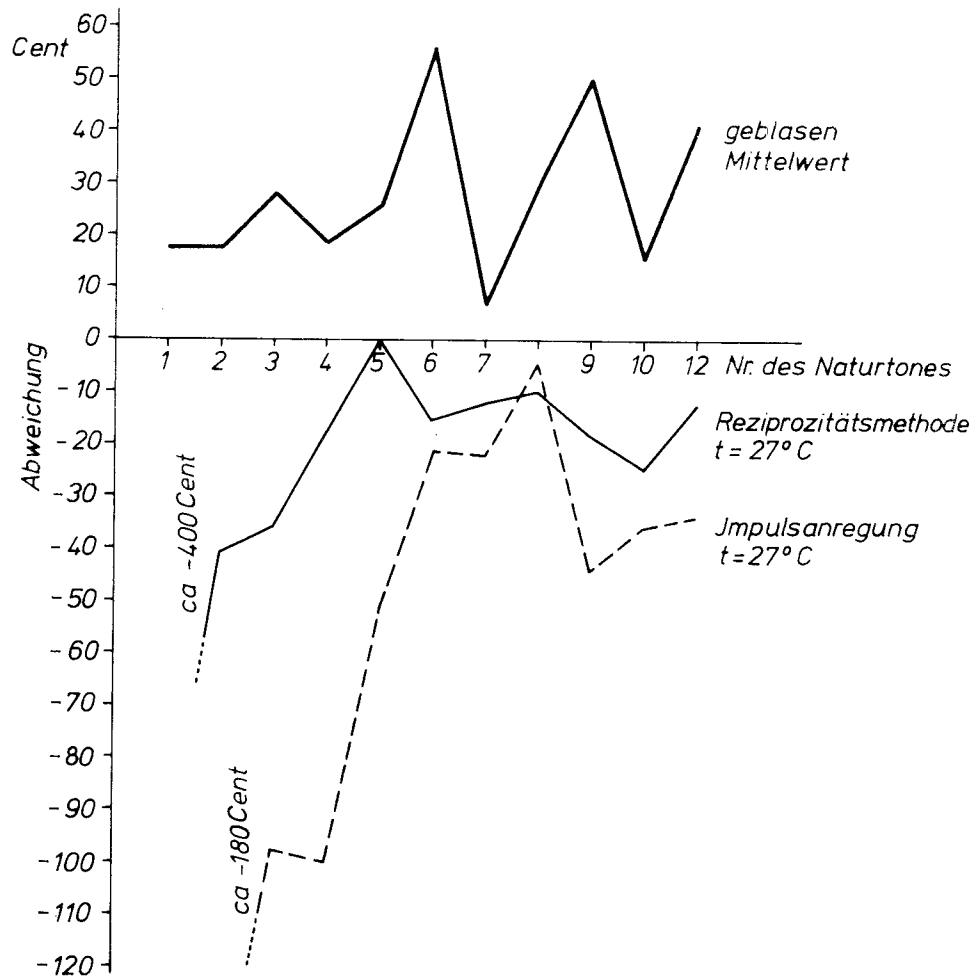


Bild 12 Stimmungsverlauf der Versuchsposaune bei versch. Meßmethoden

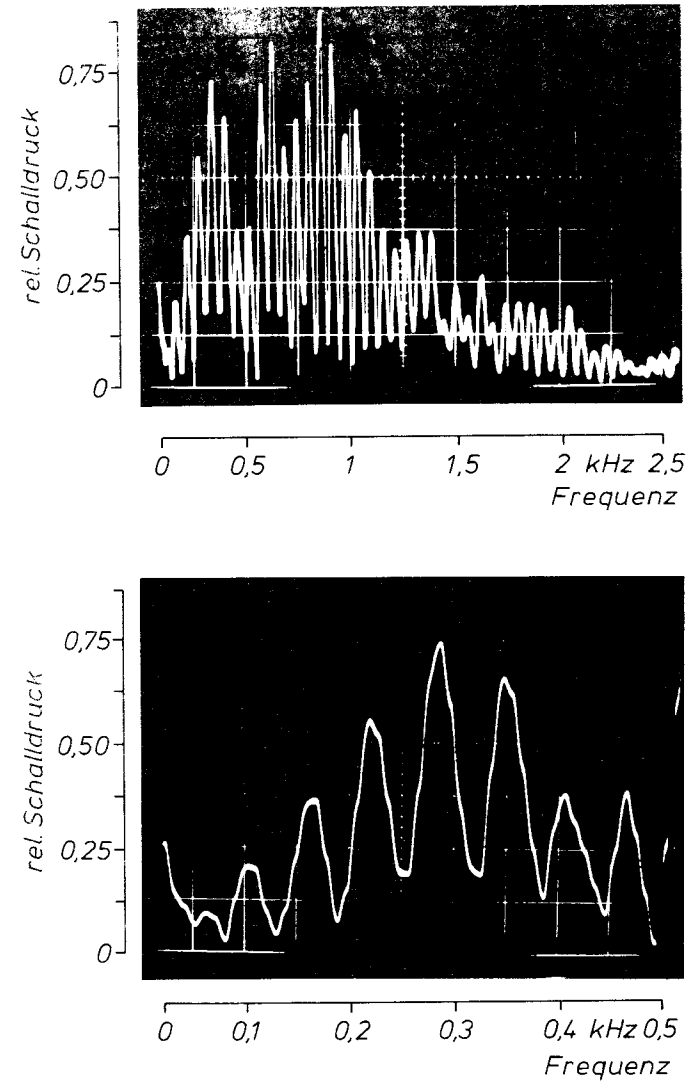


Bild 13 u. 14 Impulsspektrum des Schalldruckes vor dem Trichter einer Posaune

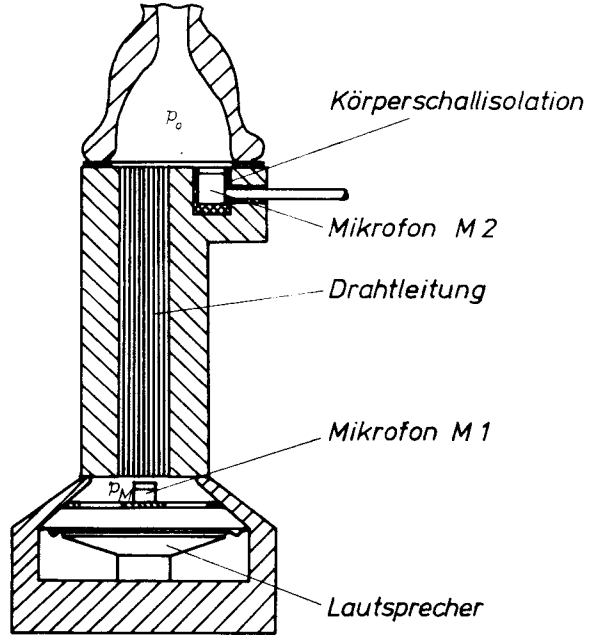


Bild 15 Aufbau der Schallquelle zur Messung der Impedanz

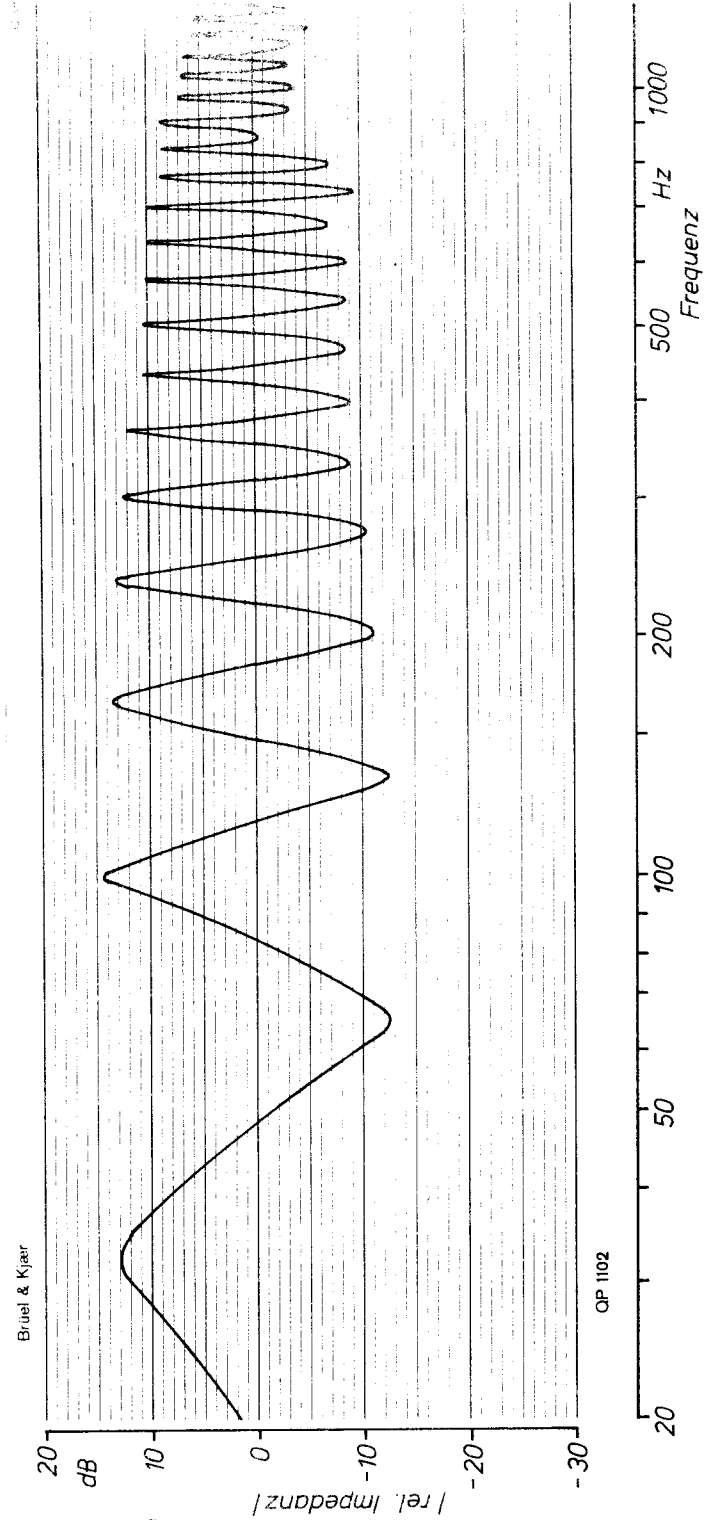


Bild 16 Gemessener Verlauf der Eingangsimpedanz eines zylindrischen Rohres ( $l=25.8\text{ cm}$ ,  $D=20\text{ mm}$ )

$$0\text{ dB} \approx 15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{sec}}$$

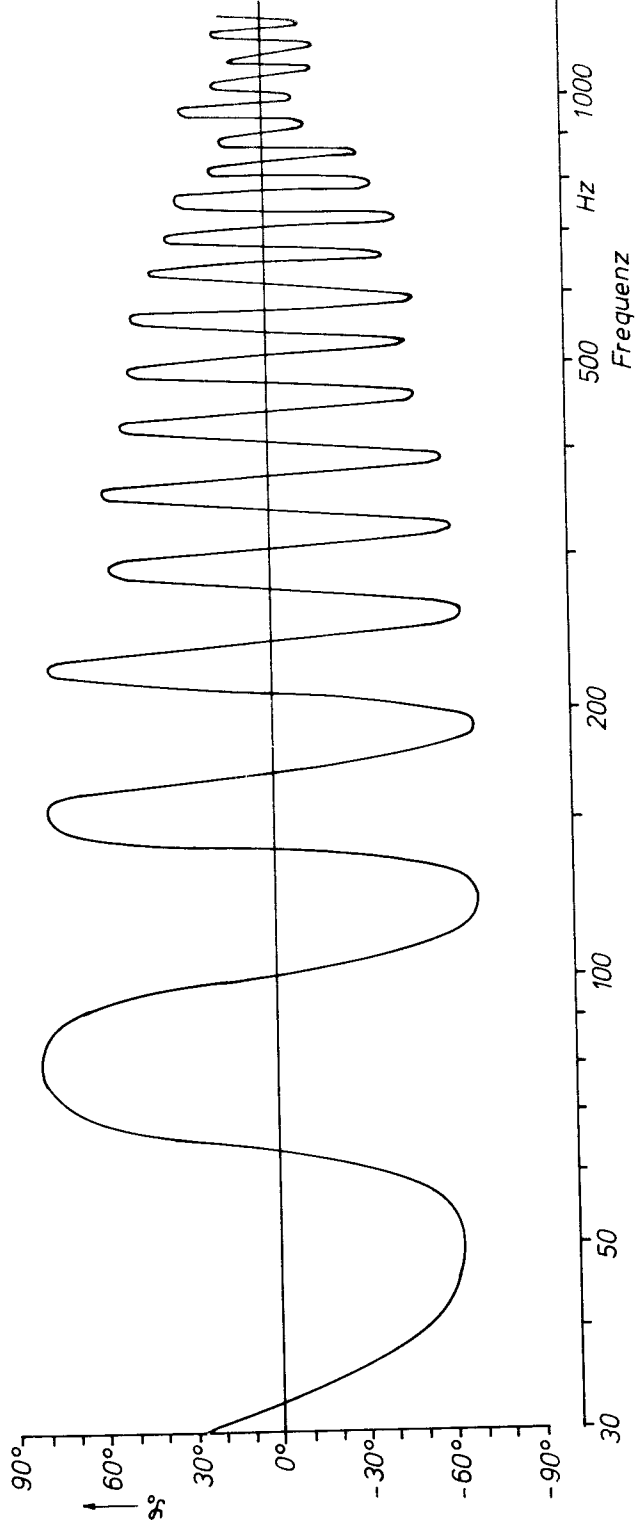


Bild 17 Gemessener Verlauf des Phasenwinkels bei Eingangsimpedanz eines zylindrischen Rohres  
 (  $l = 258\text{cm}$ ,  $D = 20\text{mm}$  )

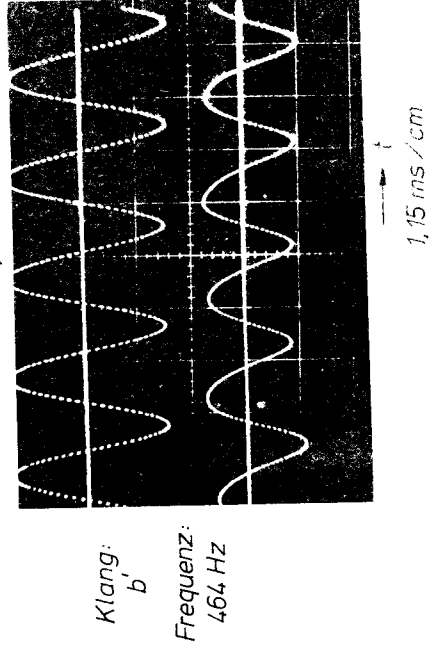
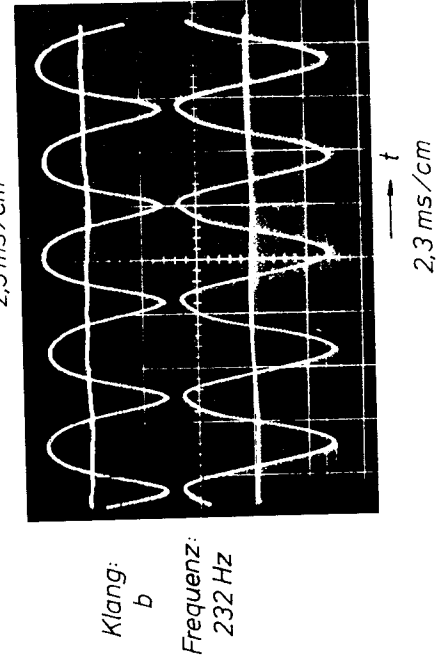
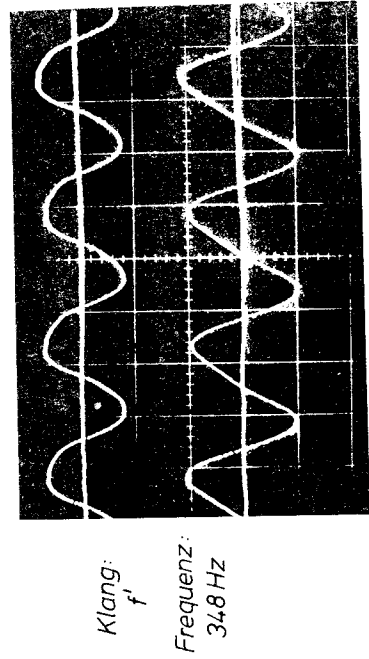
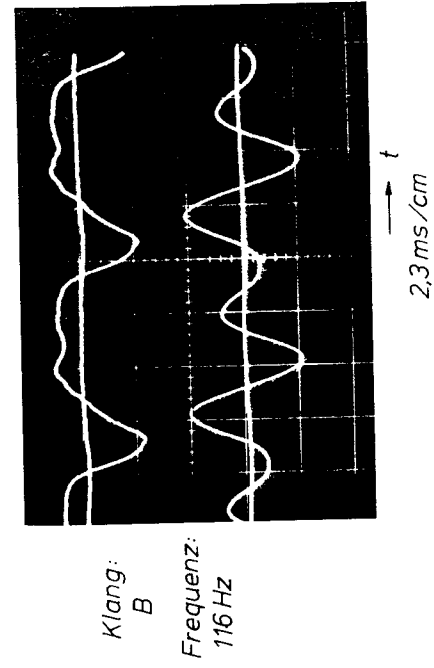


Bild 18 Schalldruckverlauf beim Anblasen einer Posaune

oben: im Mundstück unten: im Mund

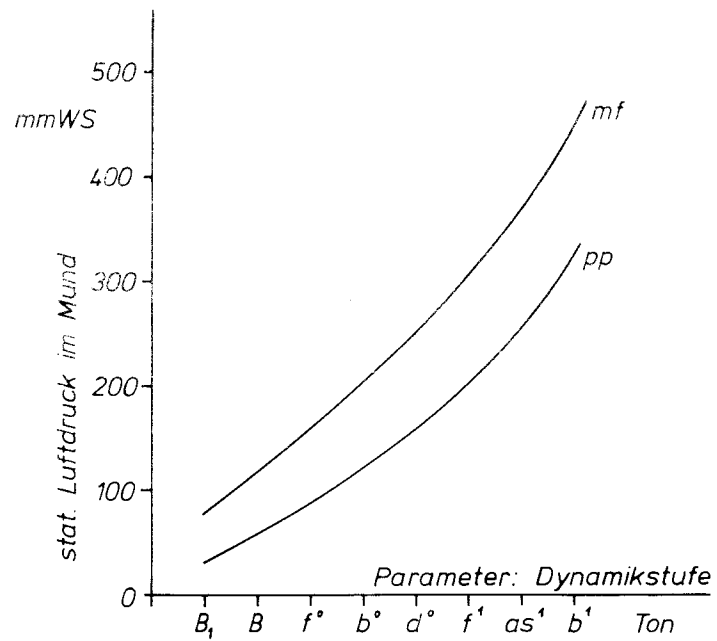


Bild 19 Abhängigkeit des statischen Luftdruckes von der Tonhöhe beim Anblasen einer Posaune

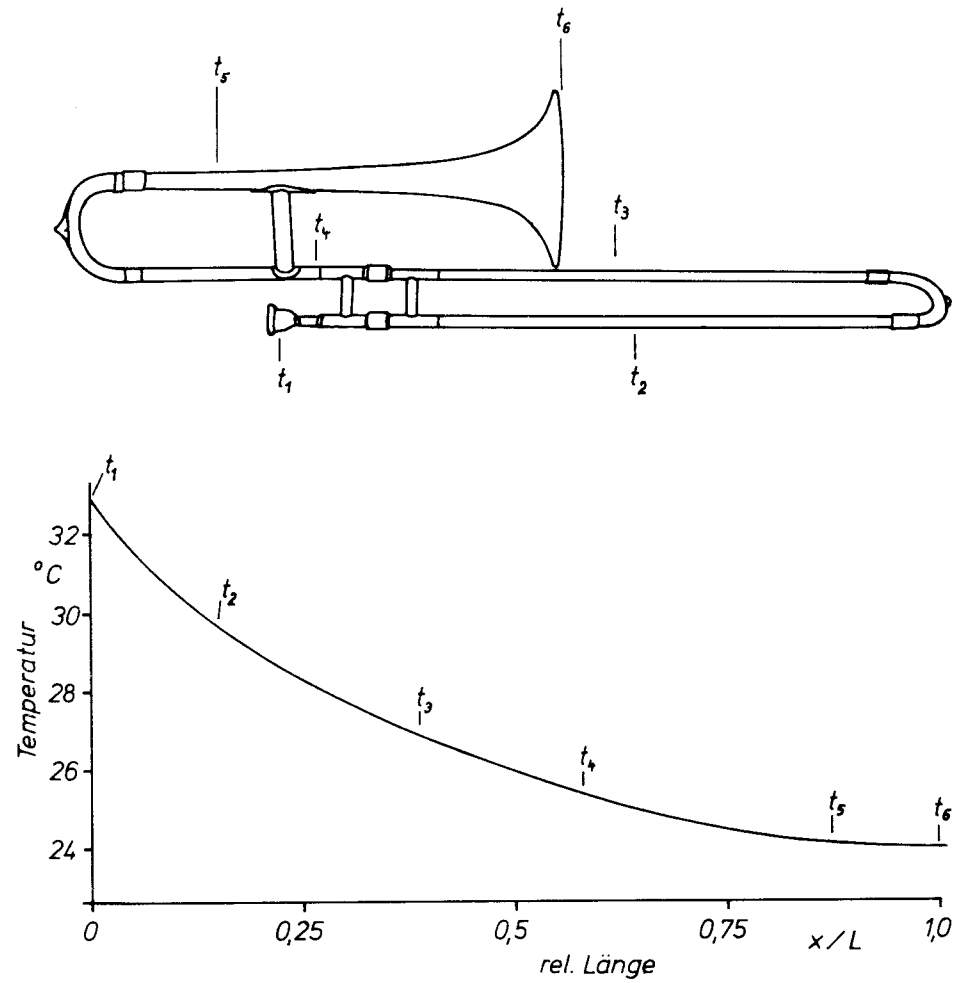


Bild 20 Temperaturverlauf in einer Posaune ( $L = 275 \text{ cm}$ , Umgebungstemperatur =  $24^\circ\text{C}$ )

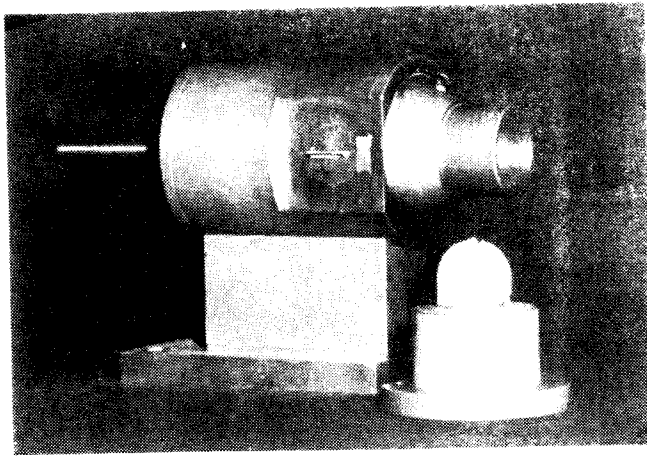


Bild 21 Der Prototyp der Anblasvorrichtung

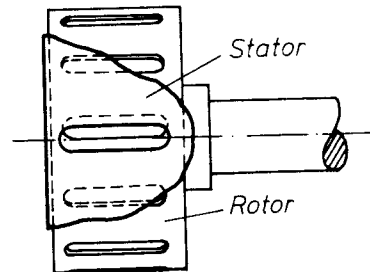


Bild 22 Schlitzanordnung der ersten Sirene und zeitlicher Verlauf der Schlitzfläche

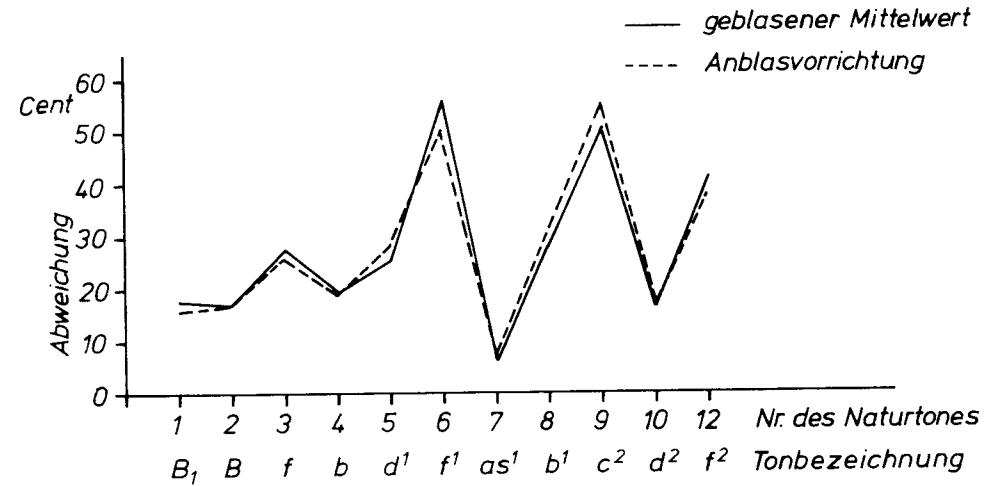


Bild 23 Stimmungsverlauf der Versuchsposaune bei Messung mit Musikern und der Anblasvorrichtung

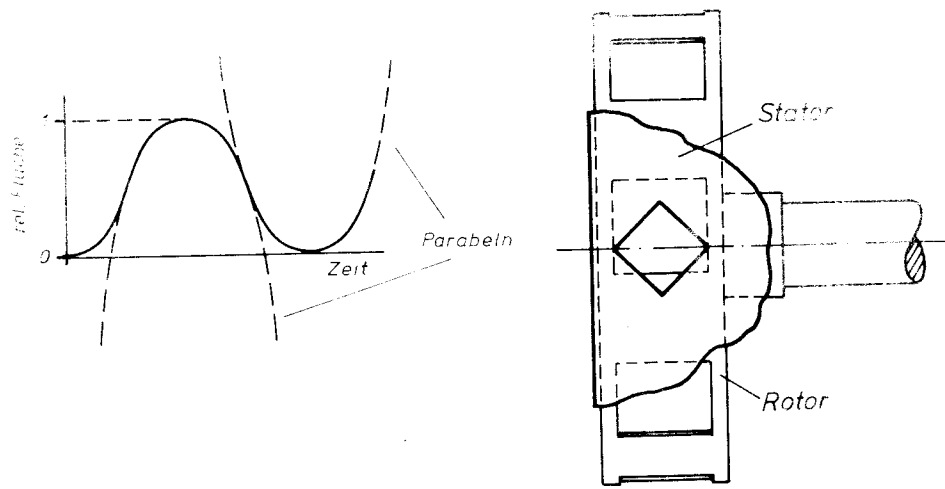


Bild 24 Schlitzanordnung der verbesserten Sirene und zeitlicher Verlauf der Schlitzfläche

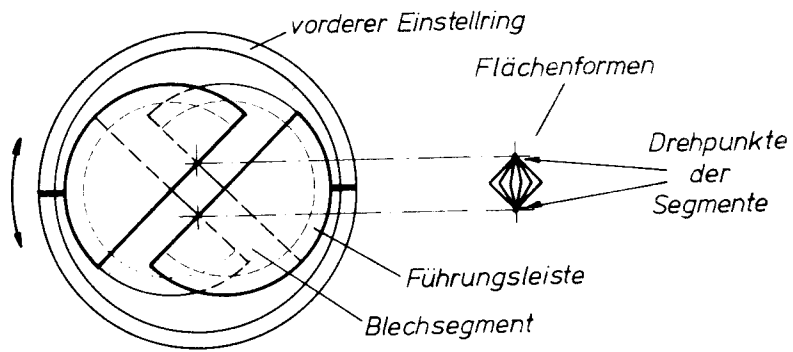


Bild 25 Prinzipskizze des einstellbaren Schlitzes

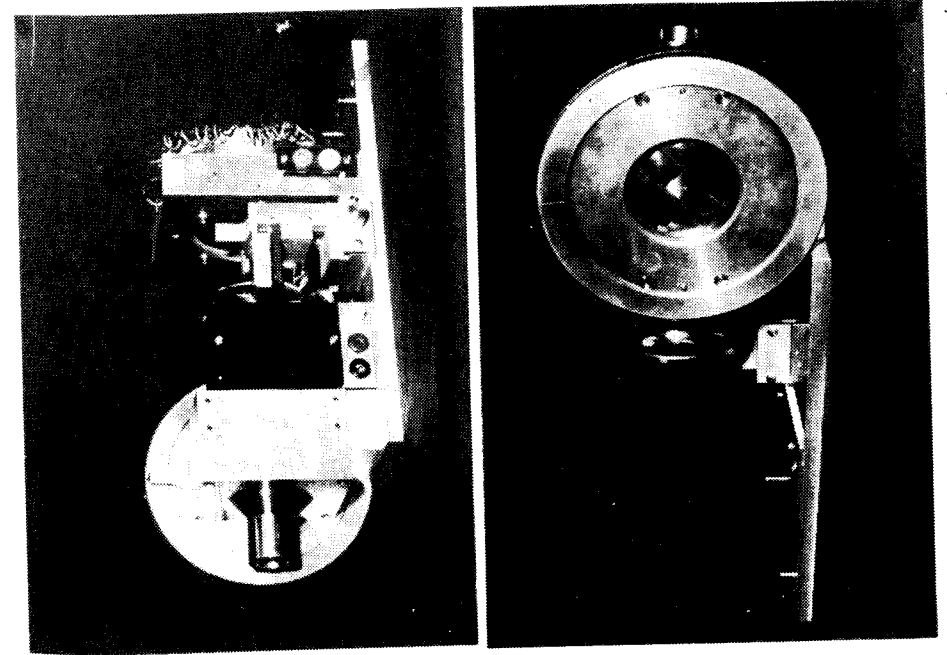
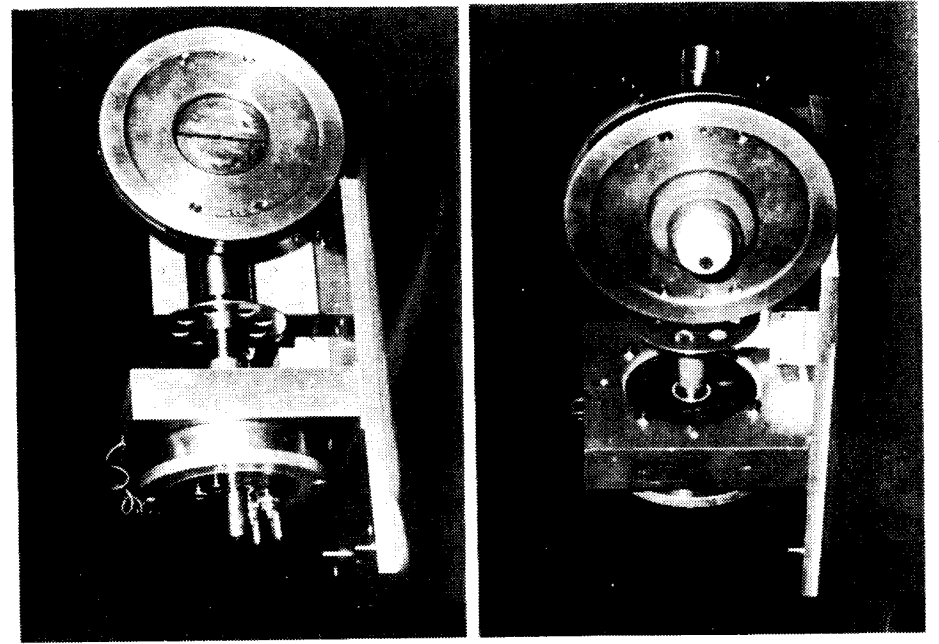


Bild 26 Einige Ansichten der verbesserten Anblasvorrichtung ( mit bzw. ohne Motor )

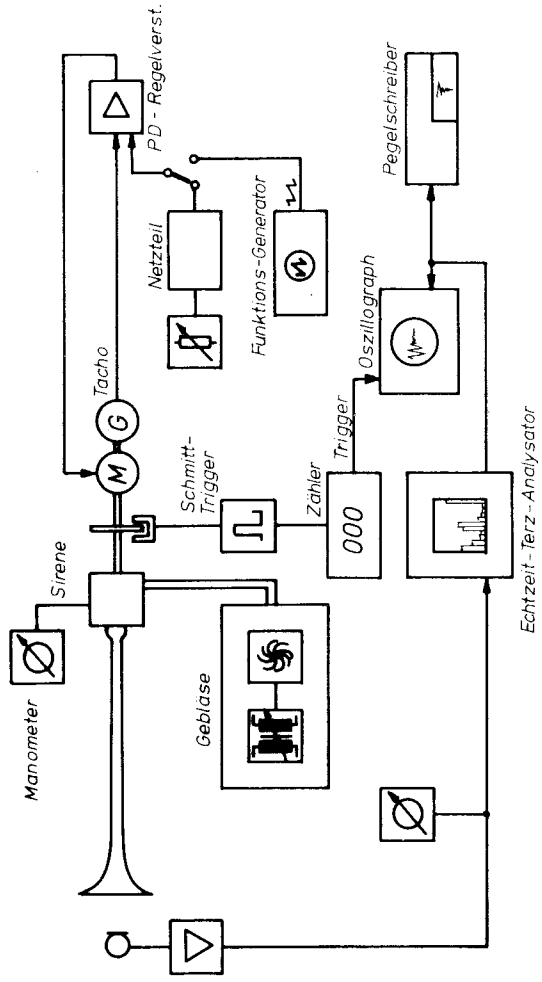


Bild 27 Blockschaltbild zur Messung der Stimmung

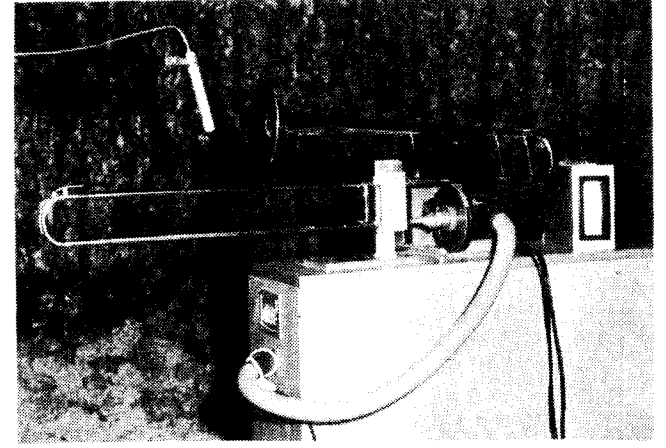


Bild 28 Ansicht des Meßaufbaus für die Ermittlung der Stimmung einer Posaune

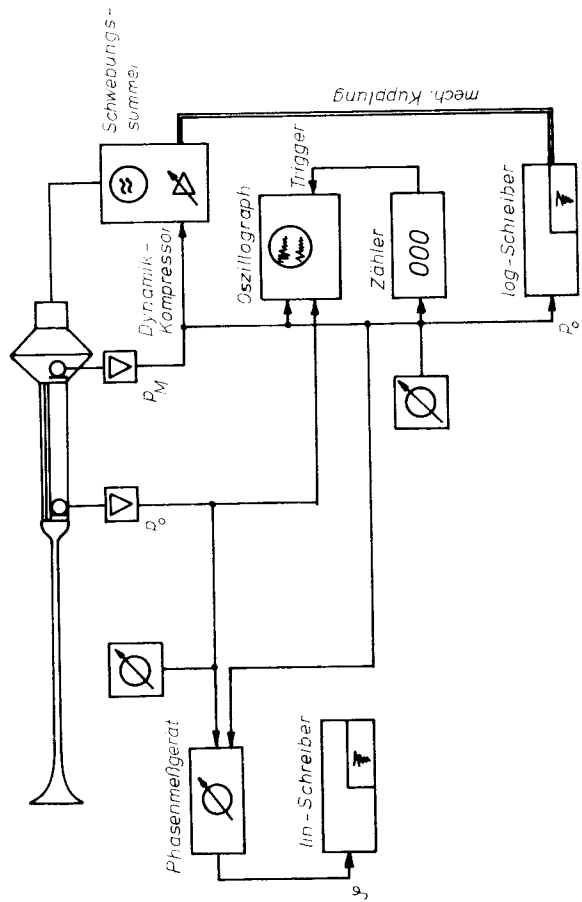


Bild 29 Blockschaltbild zur Messung der Eingangsimpedanz

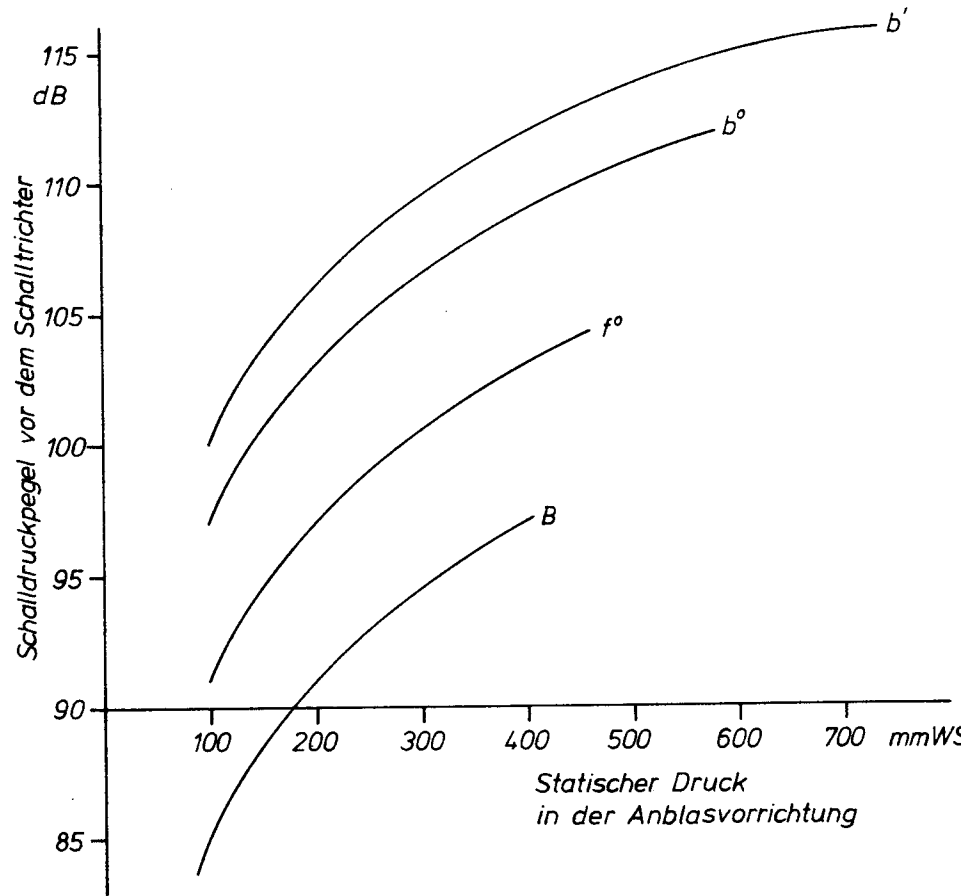


Bild 30 Schalldruckpegel vor dem Schalltrichter in Abhängigkeit vom statischen Druck in der Anblasvorrichtung



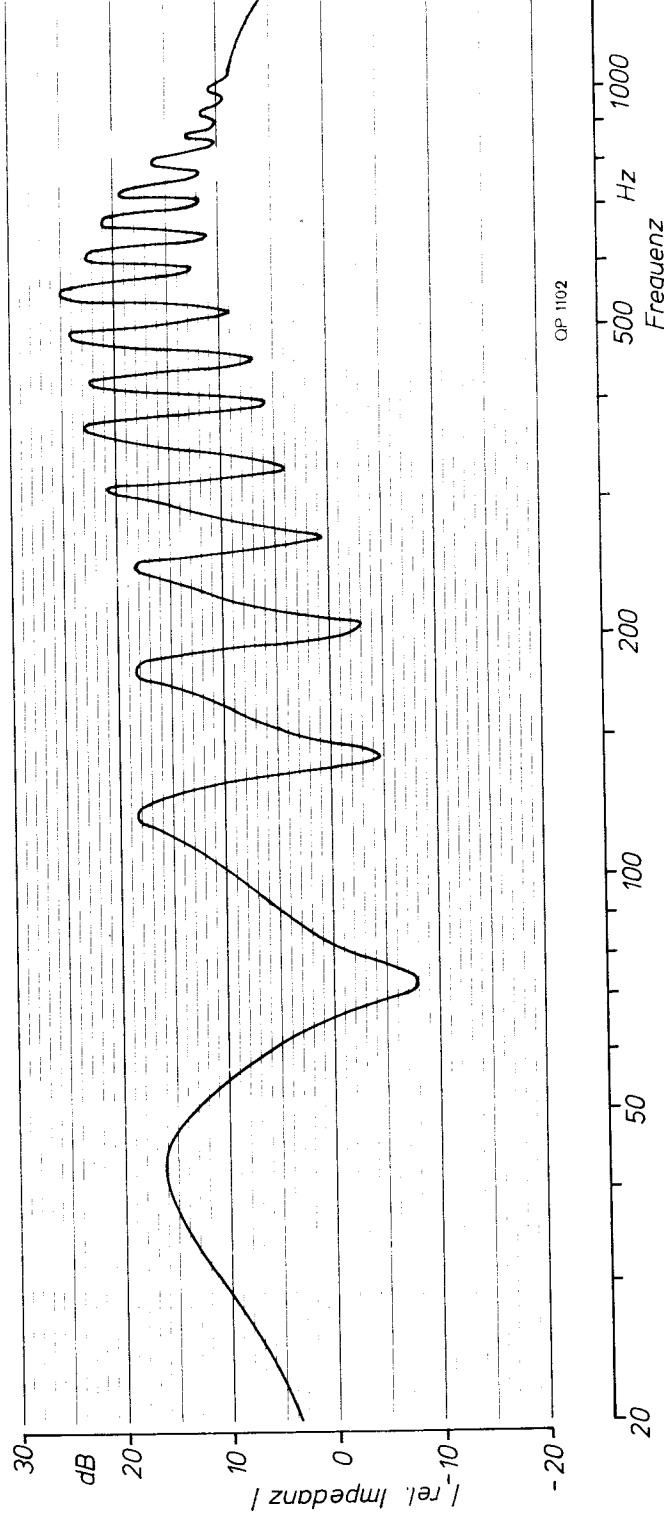


Bild 31a Gemessener Verlauf der Eingangsimpedanz der Versuchsposaune mit Mundstück,  $0 \text{ dB} \pm 15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$

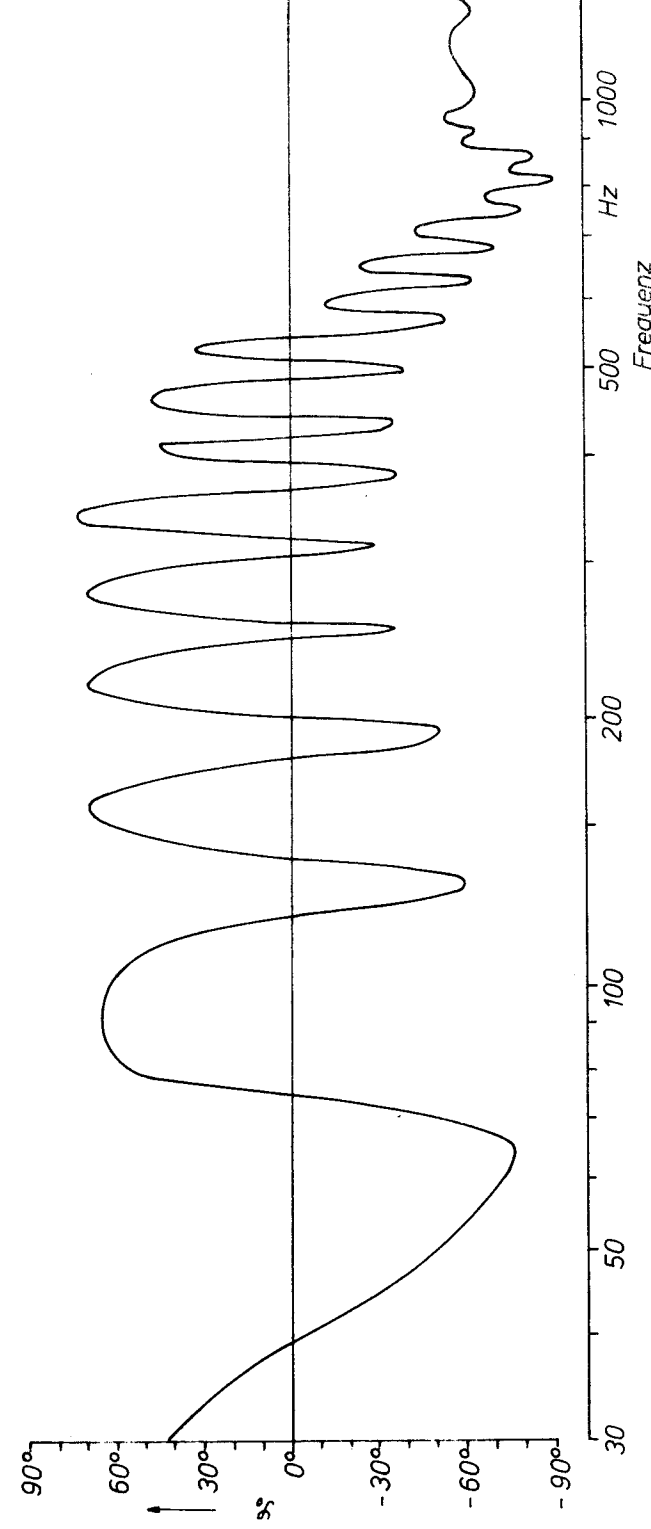


Bild 31b Verlauf des Phasenwinkels der Eingangsimpedanz  $Z_0$  der Versuchsposaune mit Mundstück

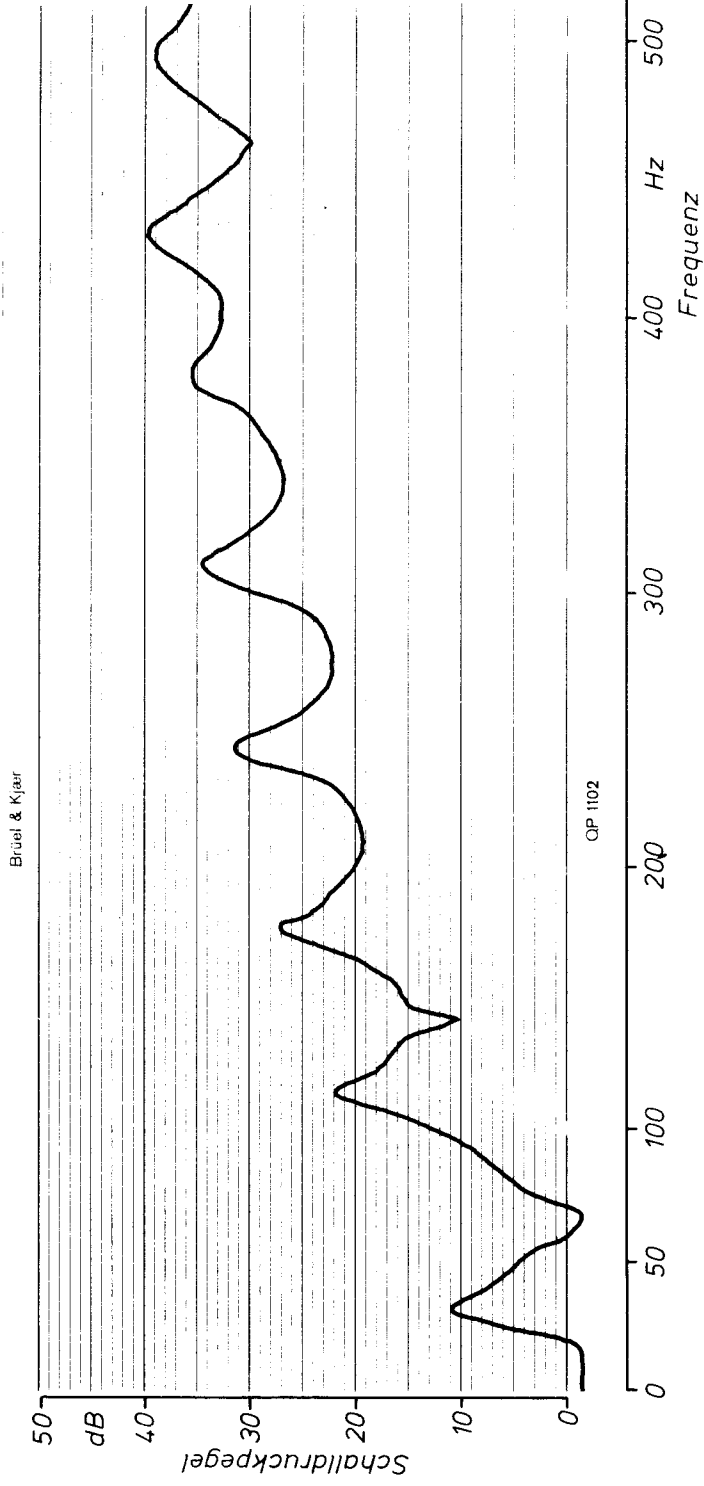


Bild 31c Schallpegelverlauf der Grundwelle vor dem Trichter der Versuchsposaune bei Anregung mit der Anblasvorrichtung

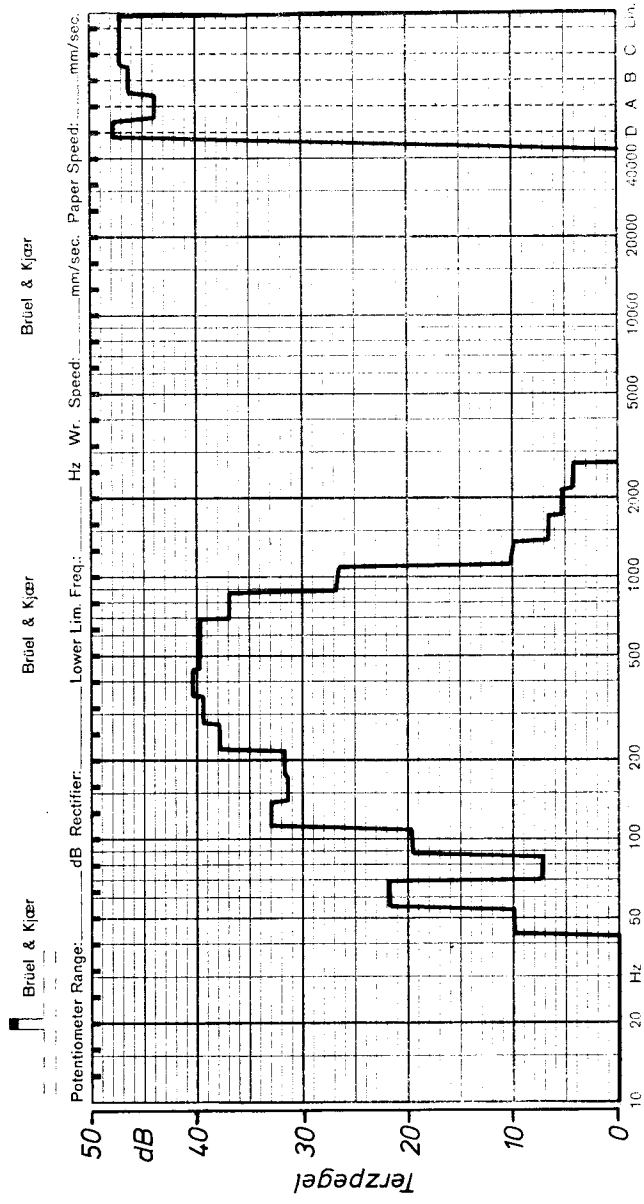


Bild 31d Terzpegeldiagramm des geblasenen Posaunenklanges vor dem Trichter bei der Naturtonfrequenz  $f_0 = 59 \text{ Hz}$ ;  $p_{Lin} / p_{f_0} \approx 25 \text{ dB}$

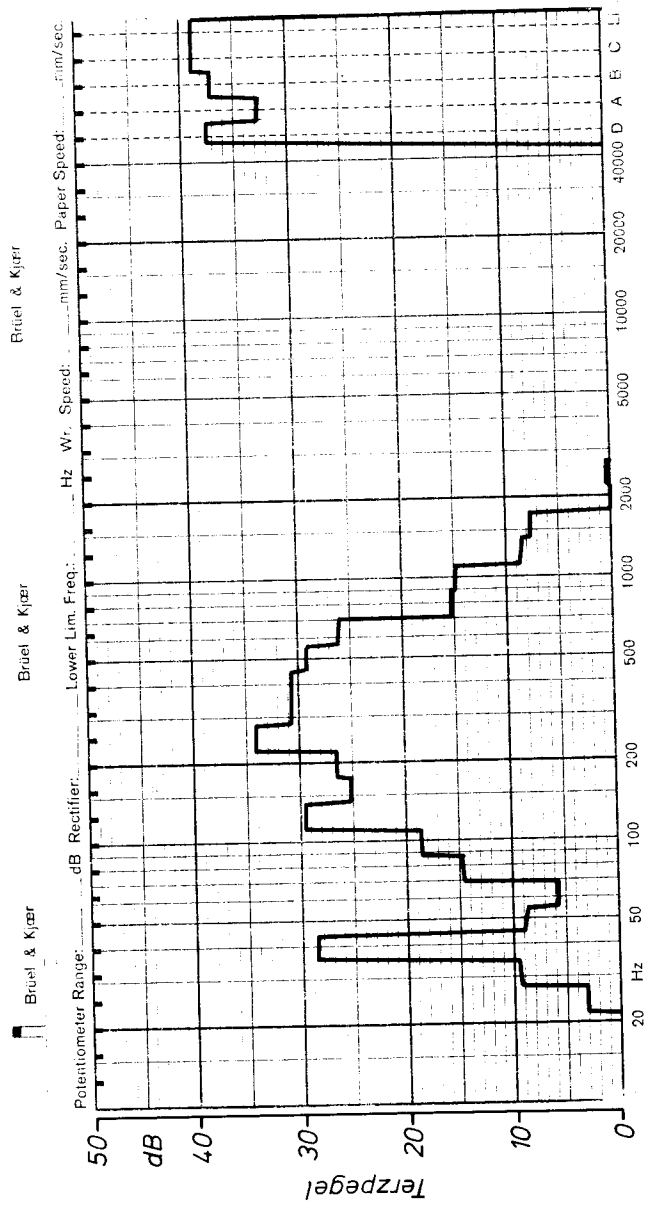


Bild 31e Terzpegeldiagramm des geblasenen Posaunenklanges vor dem Trichter  
 bei der Resonanzfrequenz  $f_R = 41 \text{ Hz}$ ;  $p_{Lin} / p_{fe} \approx 10,5 \text{ dB}$

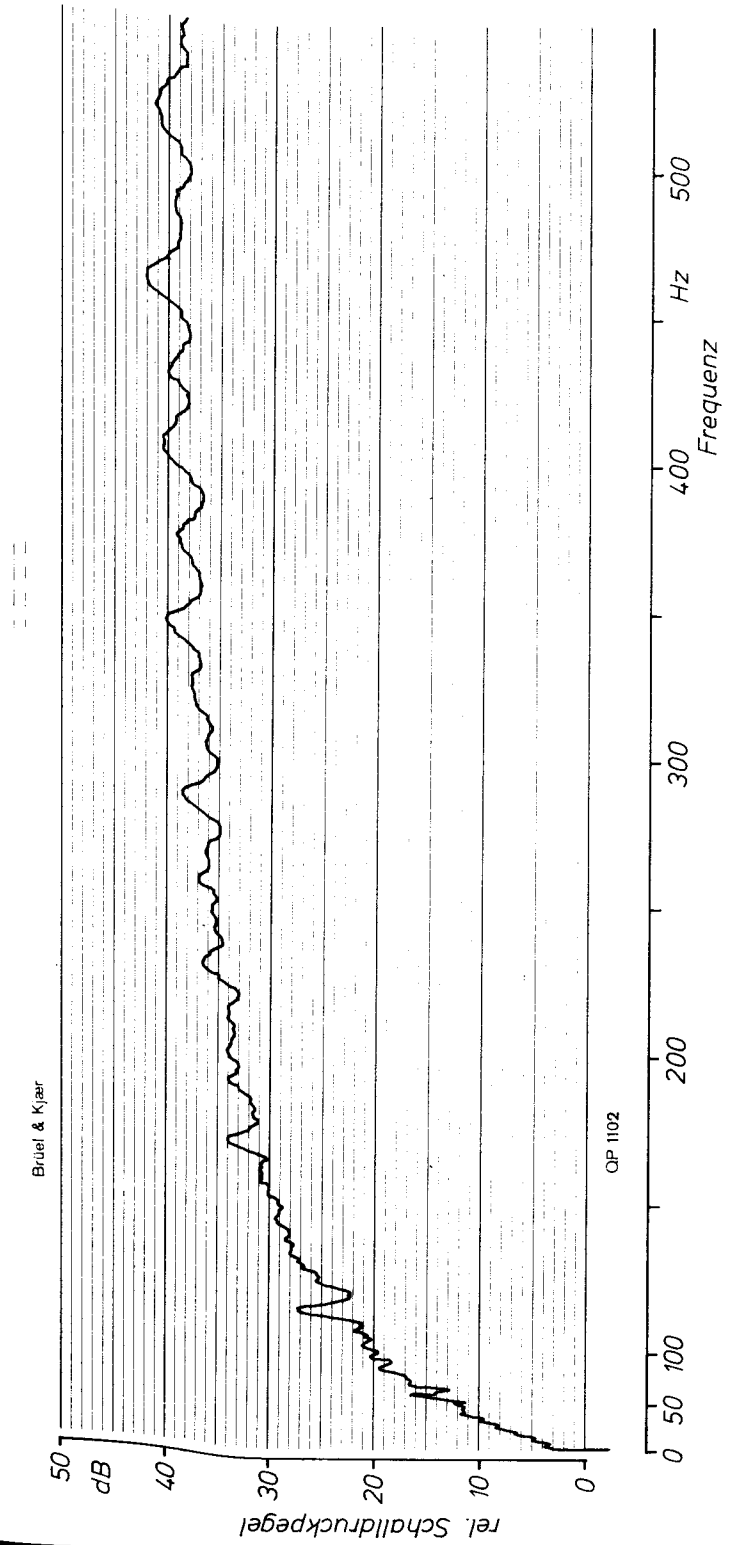


Bild 32 Schallpegelverlauf vor dem Trichter der Versuchsposaune bei Anregung mit der Anblasvorrichtung

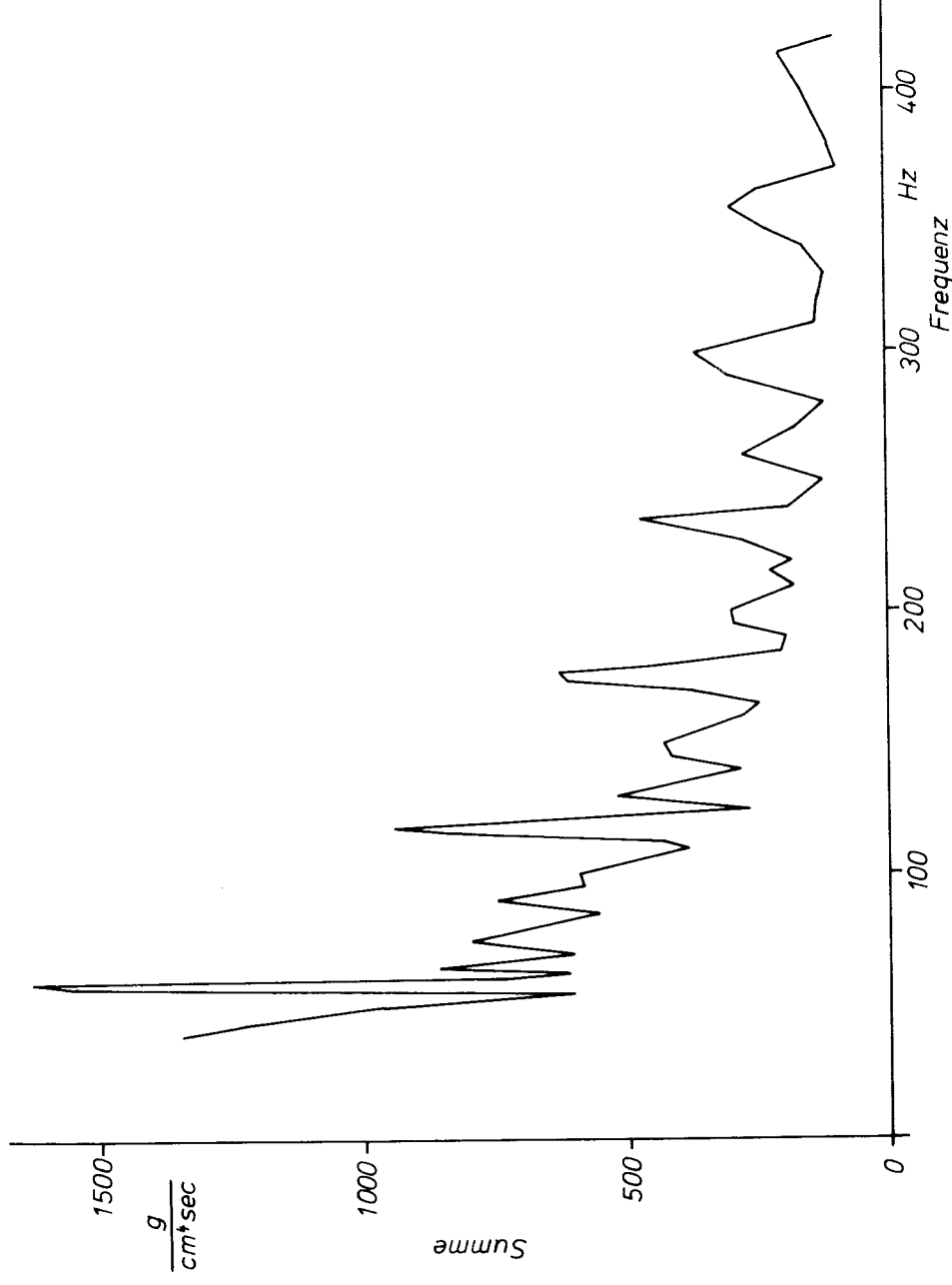


Bild 33 Aus Meßwerten ermittelte Summenfunktion der Versuchsposaune

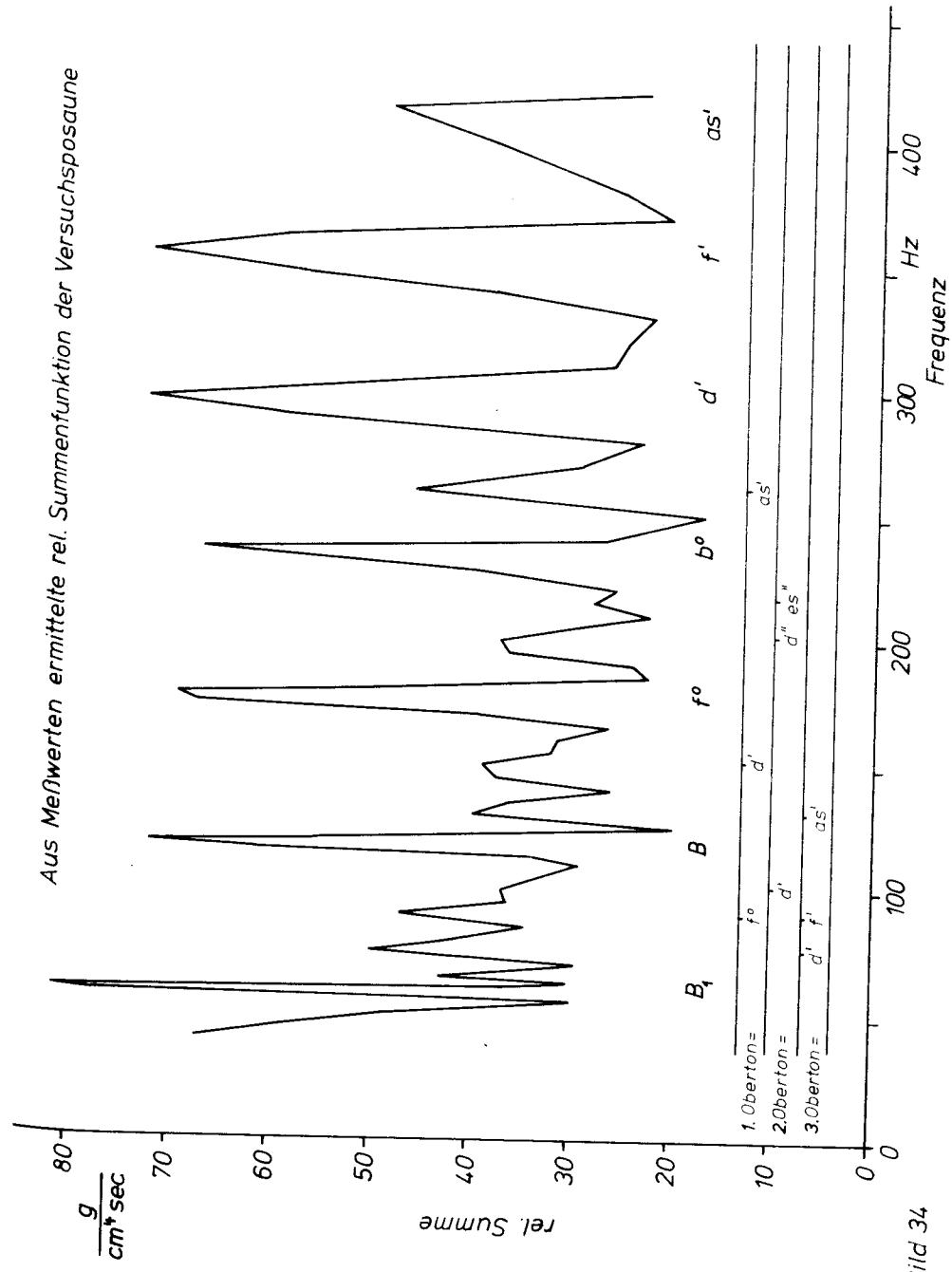


Bild 34

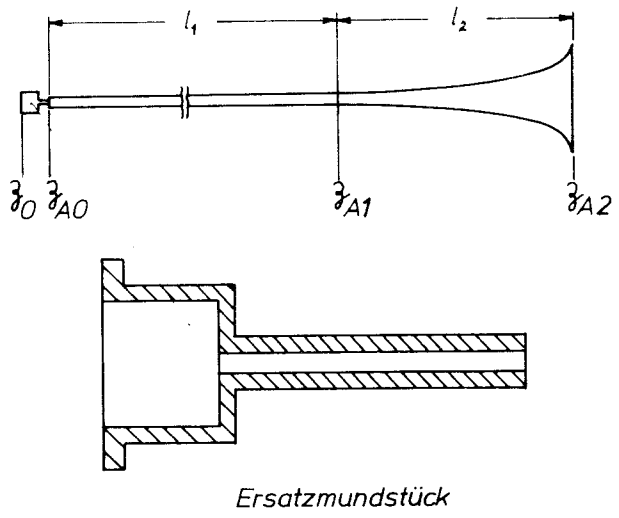


Bild 35 Prinzipskizze des Versuchsinstrumentes  
( $l_1=145\text{ cm}$ ,  $l_2=55\text{ cm}$ )

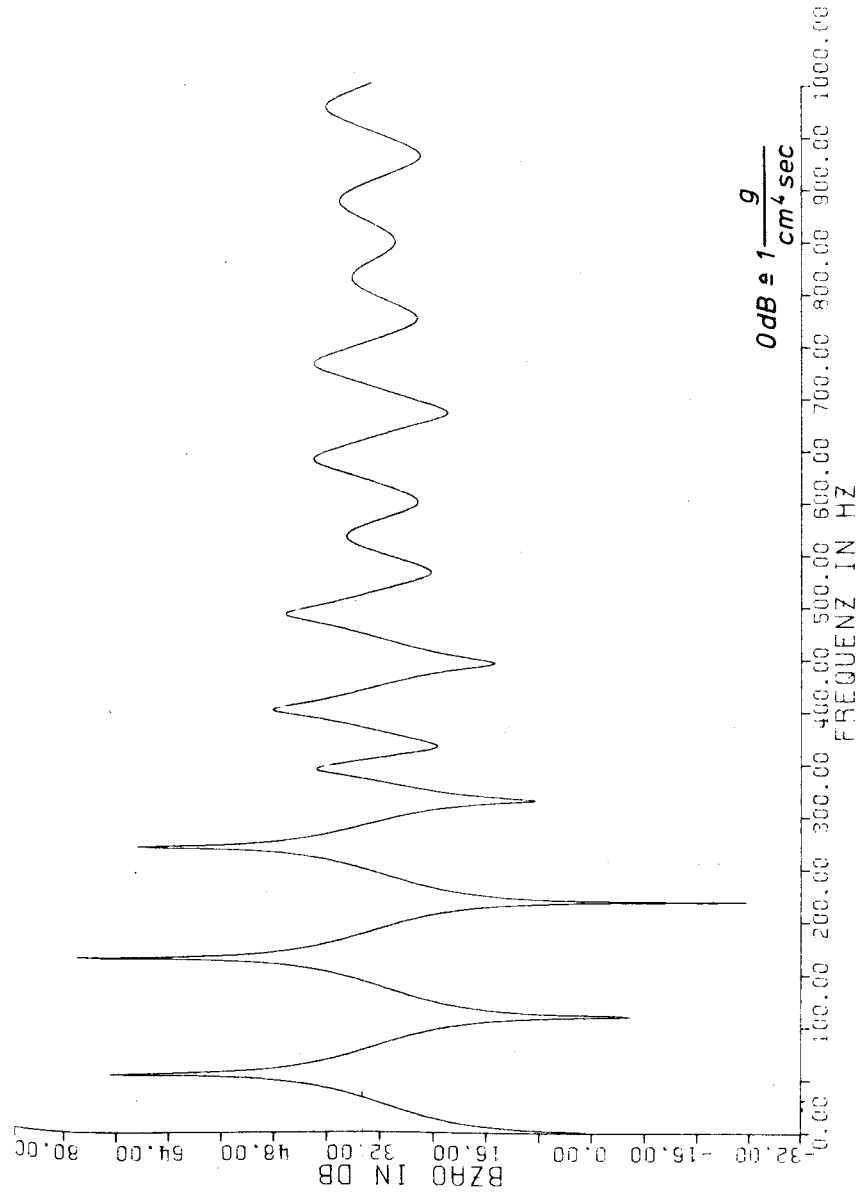


Bild 36 Berechneter Verlauf der Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes ohne Mundstück

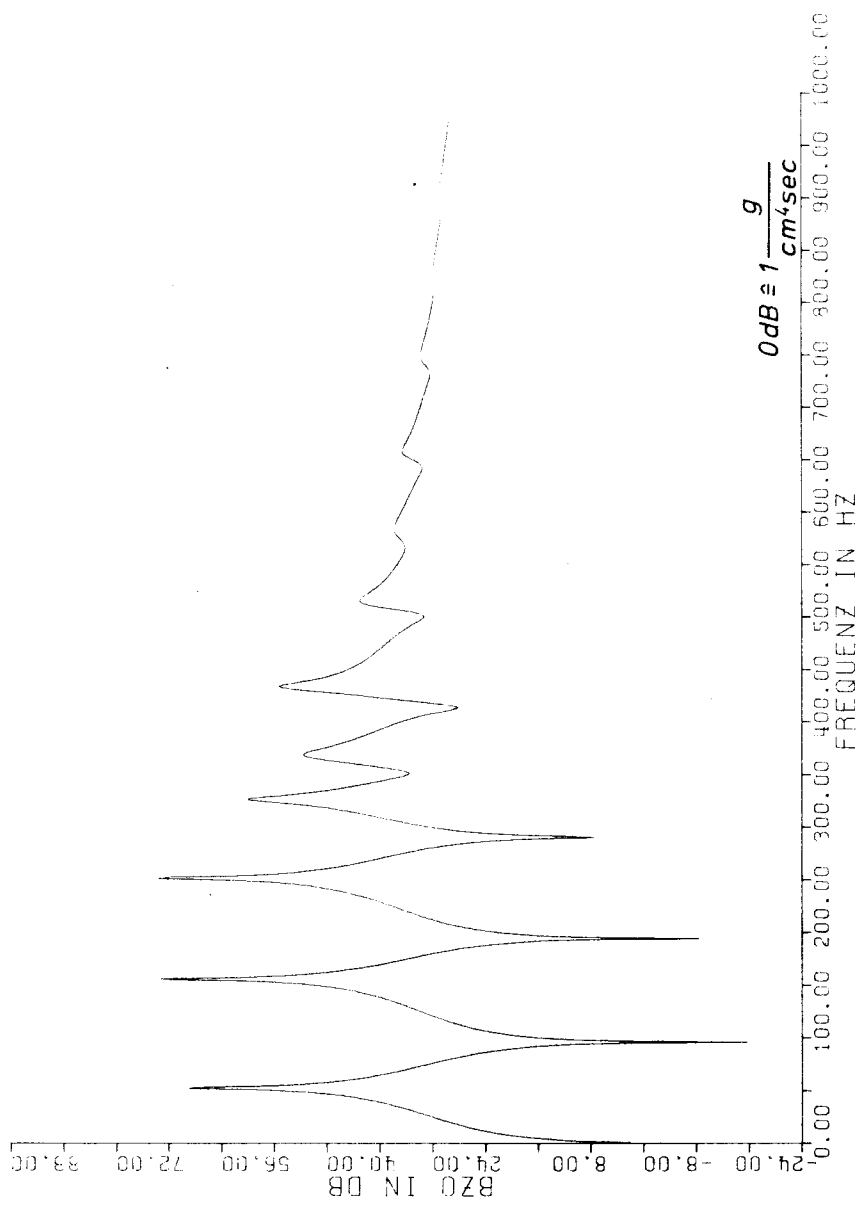


Bild 37 Berechneter Verlauf der Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes mit Mundstück

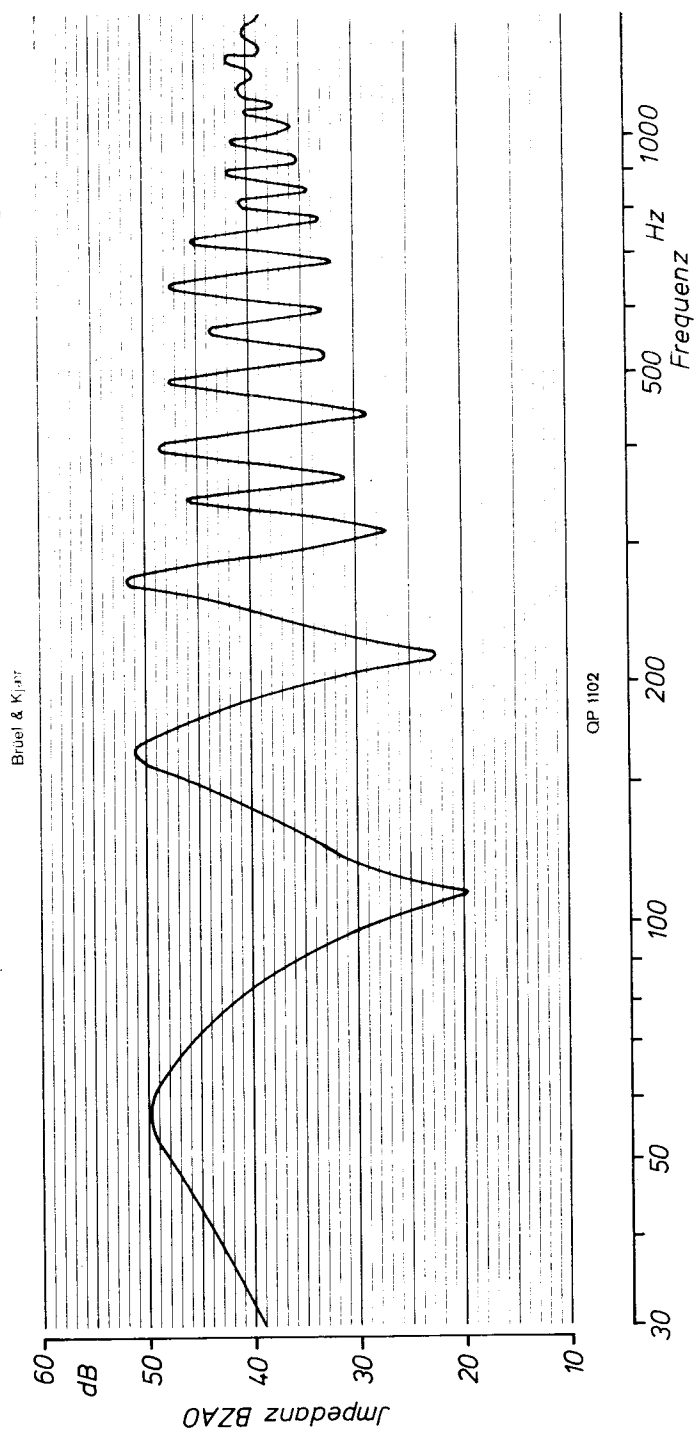


Bild 38 Gemessener Verlauf der Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes ohne Mundstück

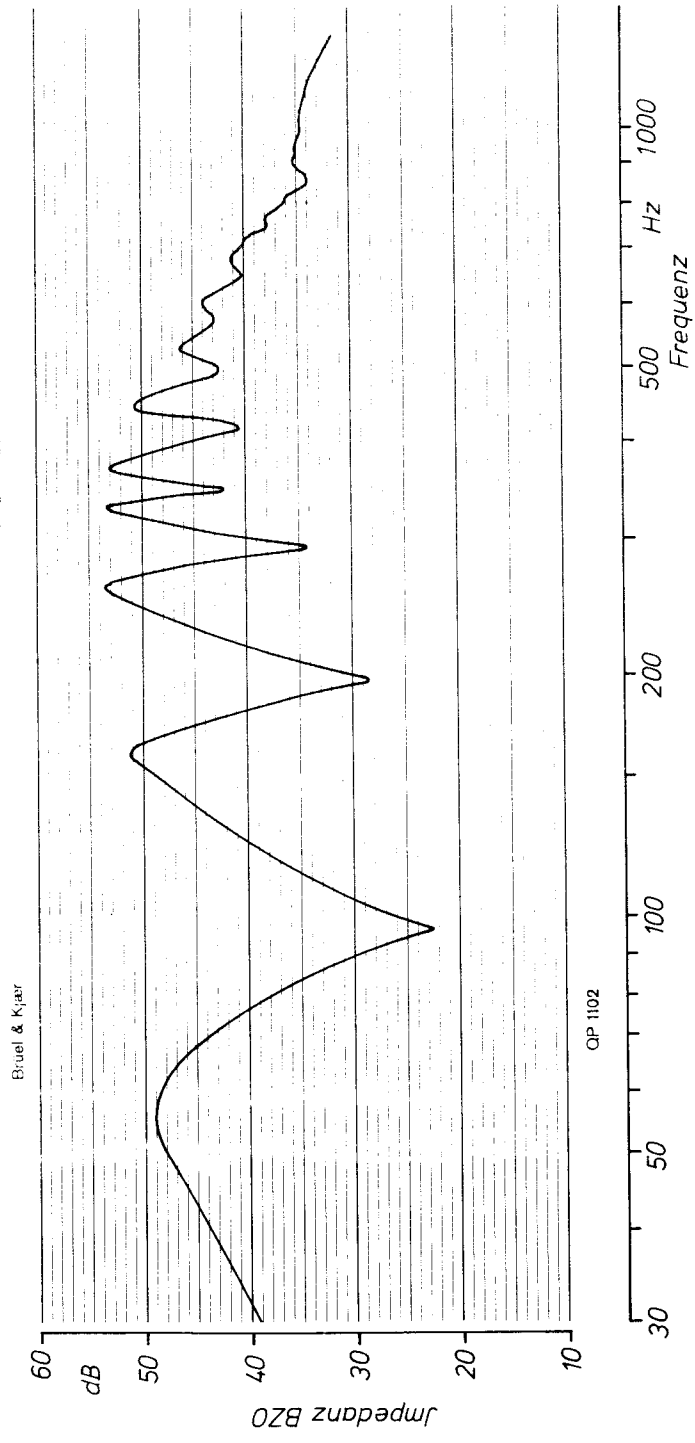


Bild 39 Gemessener Verlauf der Eingangsimpedanz des Versuchsinstrumentes mit Mundstück  
 $0 \text{ dB} \hat{=} 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{sec}}$

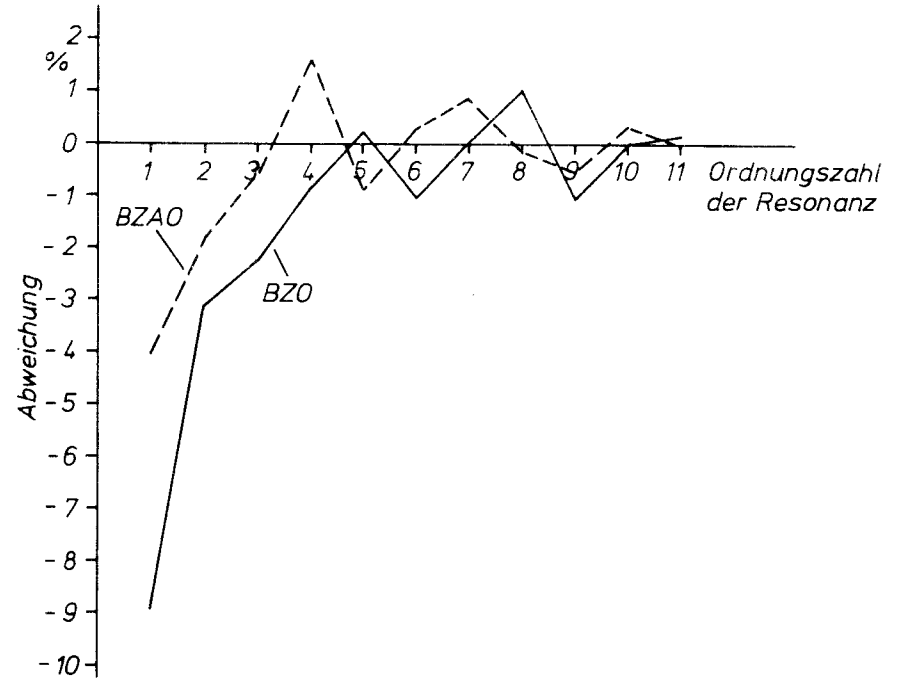


Bild 40 Abweichung der berechneten zu den gemessenen Resonanzfrequenzen des Versuchsinstrumentes  
 BZAO  $\hat{=} \text{ohne Mundstück}$   
 BZO  $\hat{=} \text{mit Mundstück}$

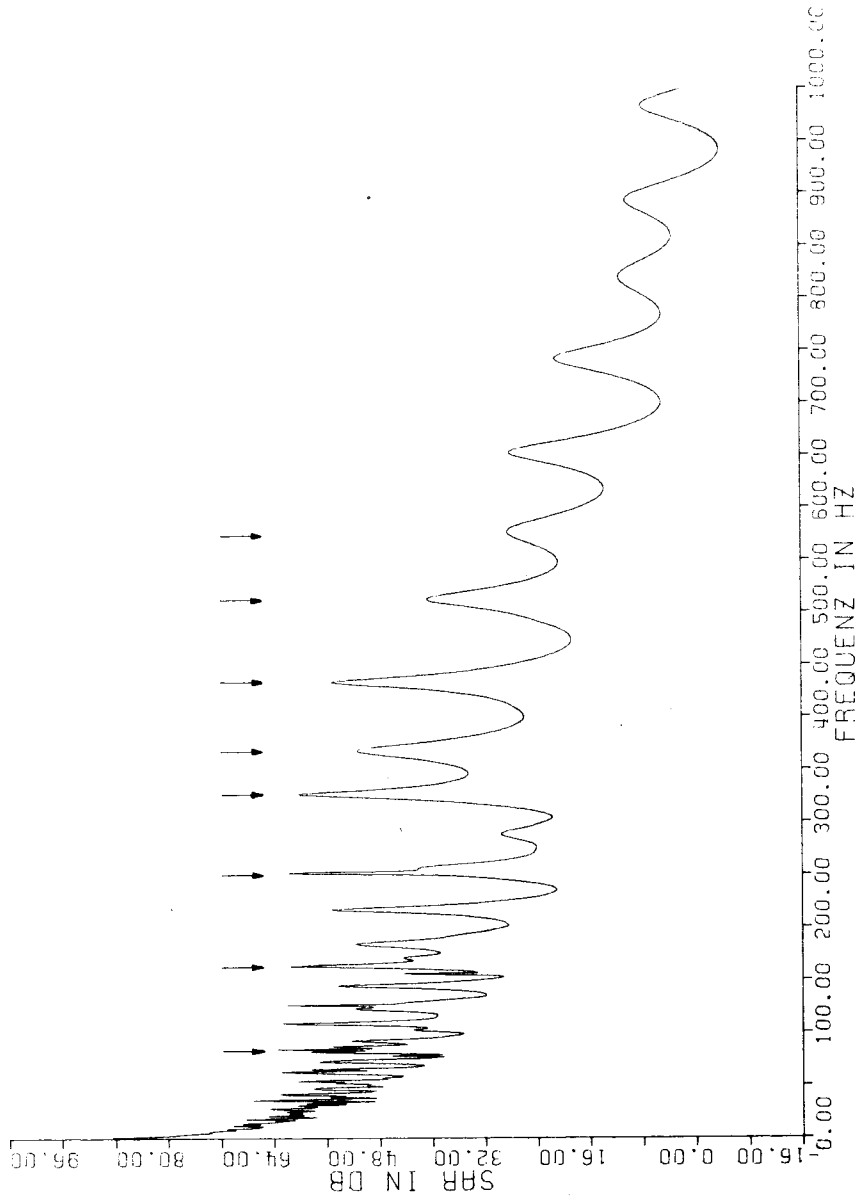


Bild 41 Berechnete Summenfunktion für das Versuchsinstrument

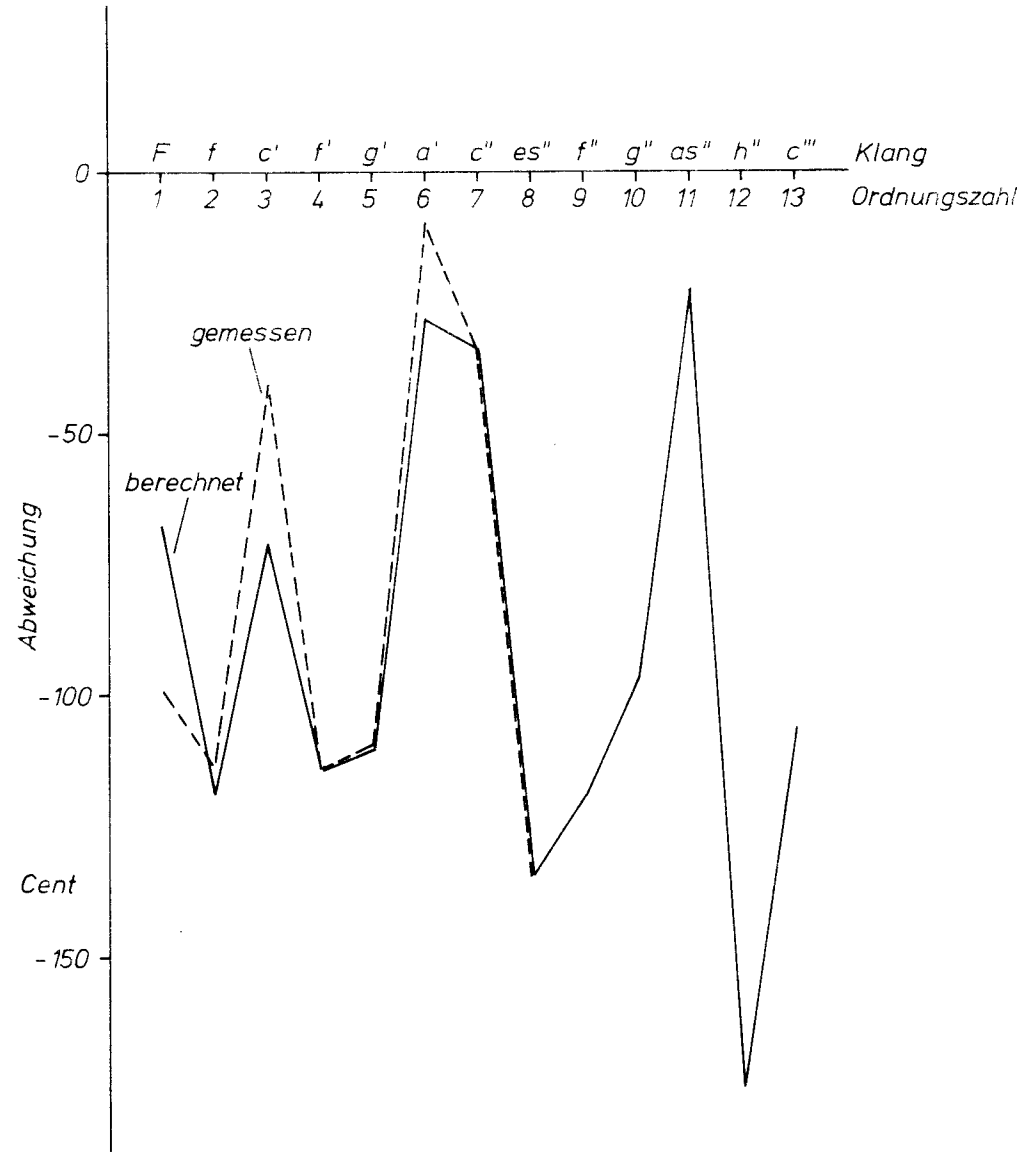


Bild 42 Stimmungsverlauf des Versuchsinstrumentes



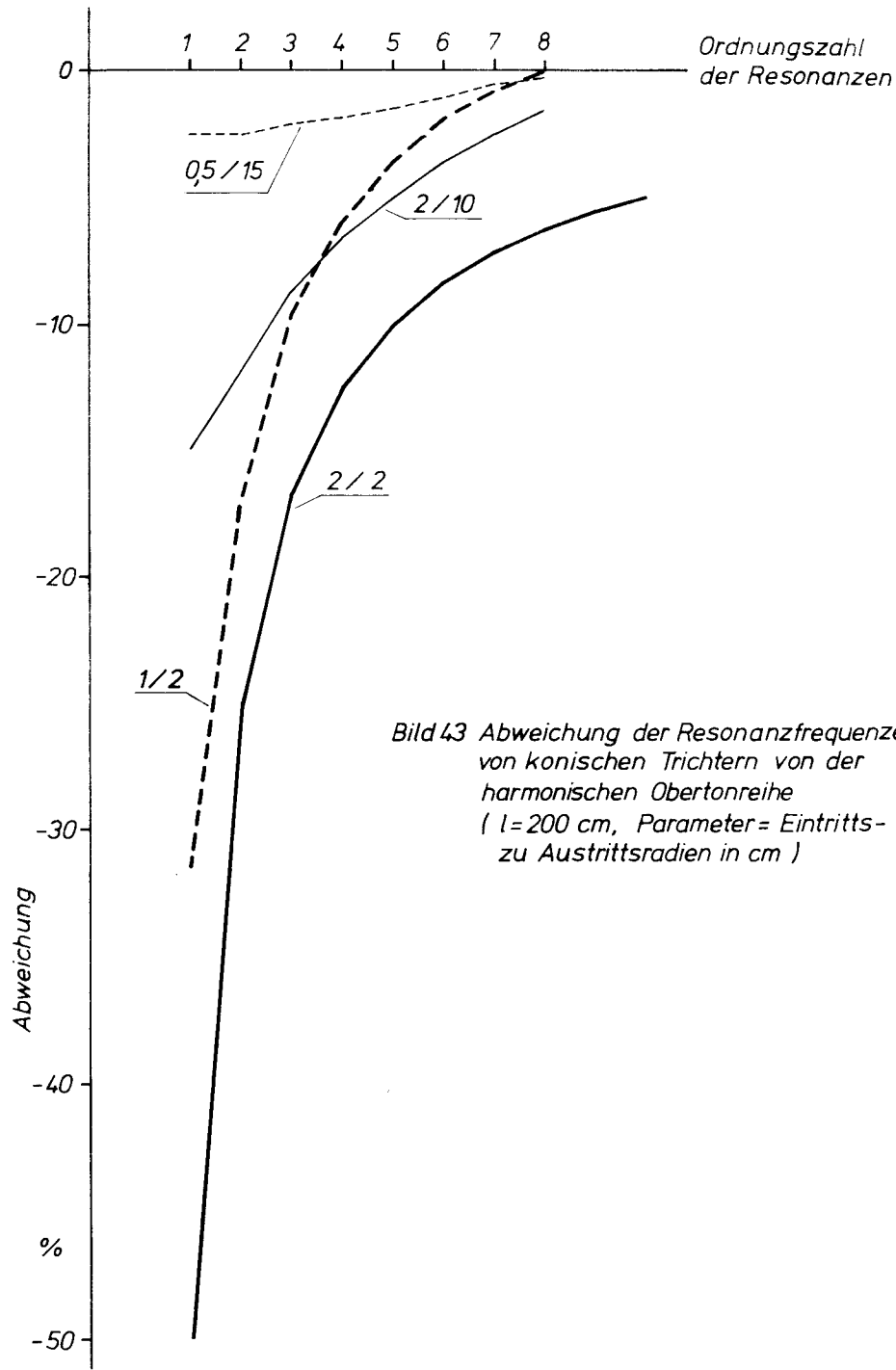


Bild 43 Abweichung der Resonanzfrequenzen von konischen Trichtern von der harmonischen Obertonreihe (  $l=200$  cm, Parameter = Eintritts- zu Austrittsradien in cm )

KÖNIGSBERGER TRICHTER OHNE MUNDSTÜCK

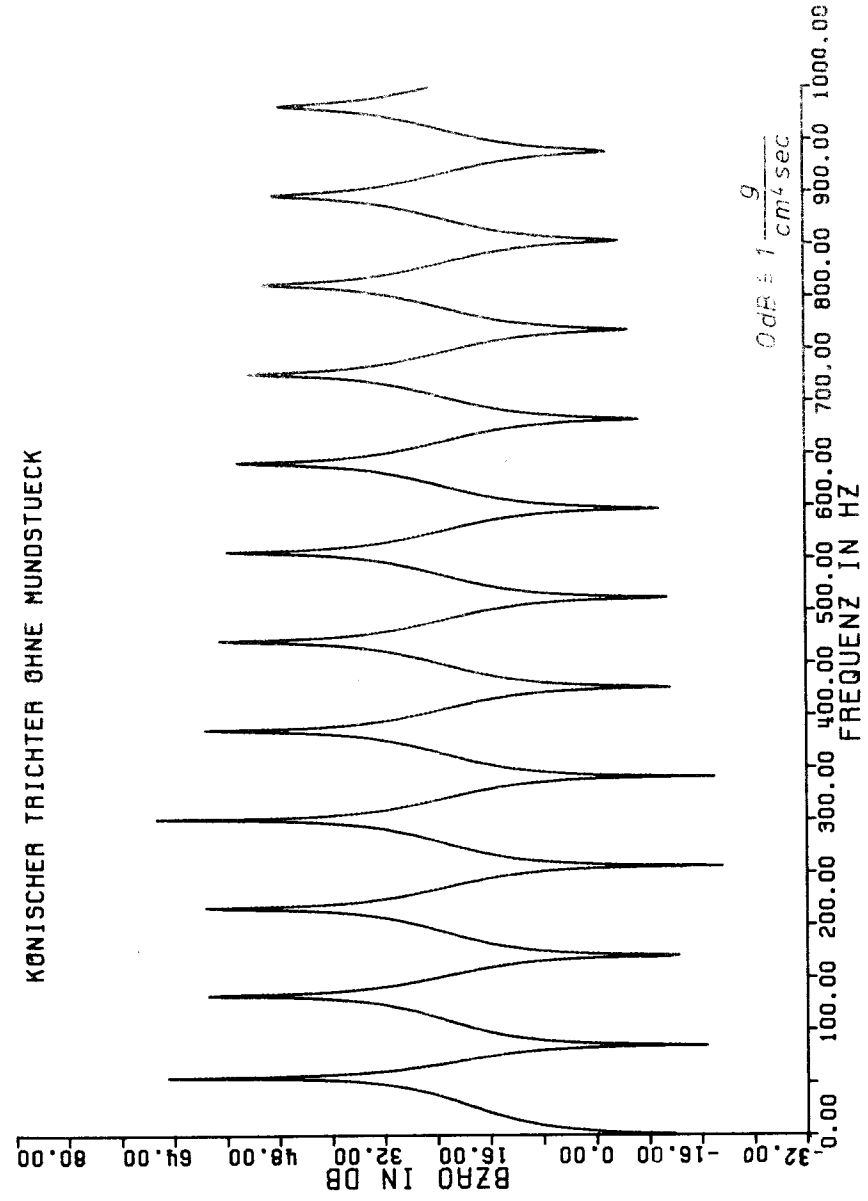


Bild 44 Berechneter Verlauf der Eingangsimpedanz eines konischen Trichters (  $l=200$  cm,  $r=1$  cm,  $R=2$  cm )

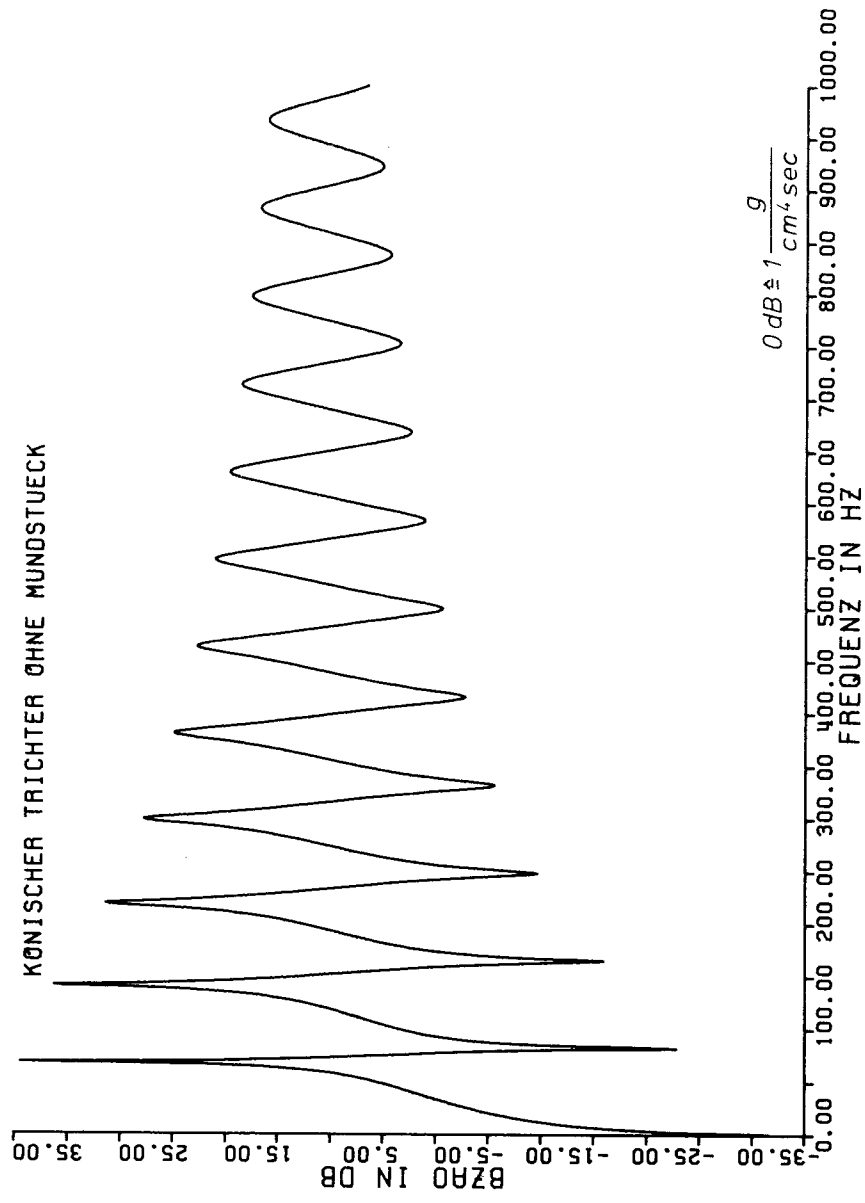


Bild 45 Berechneter Verlauf der Eingangsimpedanz eines konischen Trichters  
( $l=200\text{ cm}$ ,  $r=2\text{ cm}$ ,  $R=10\text{ cm}$ )

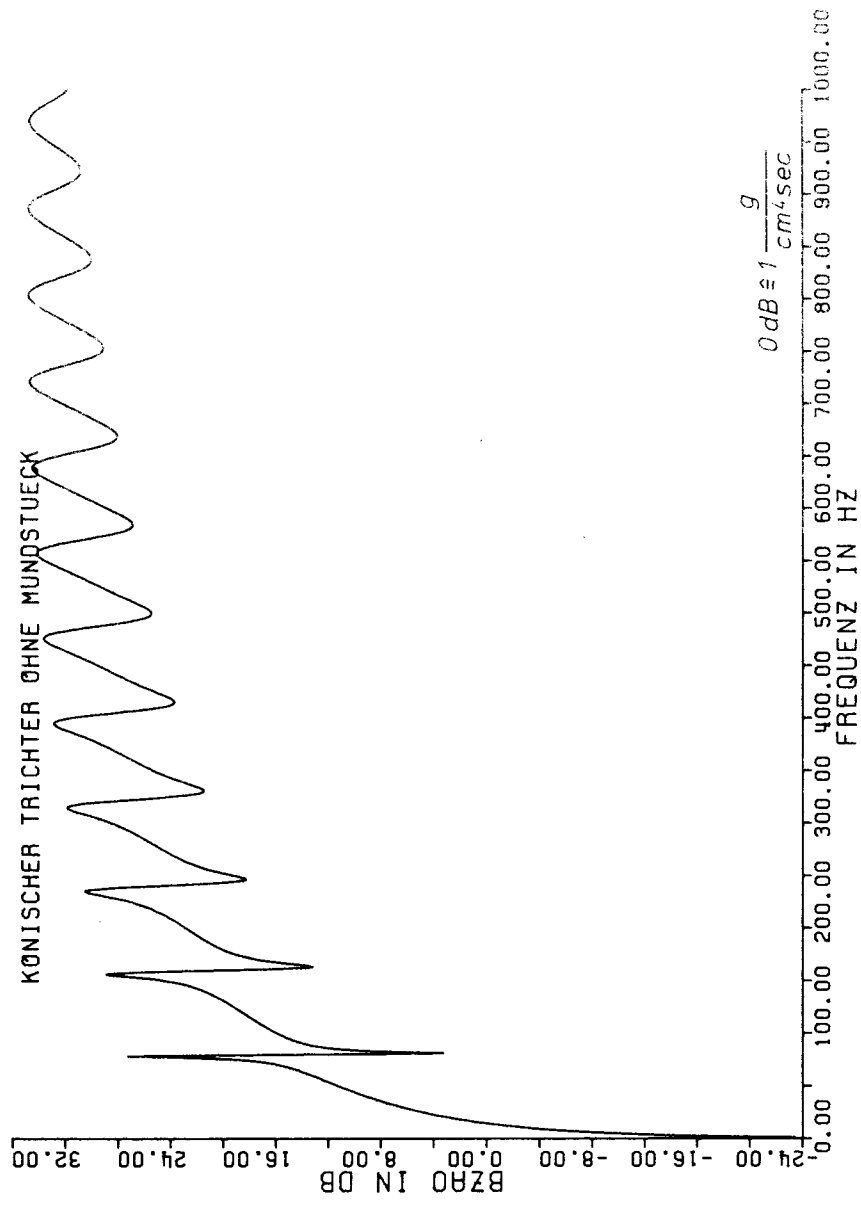
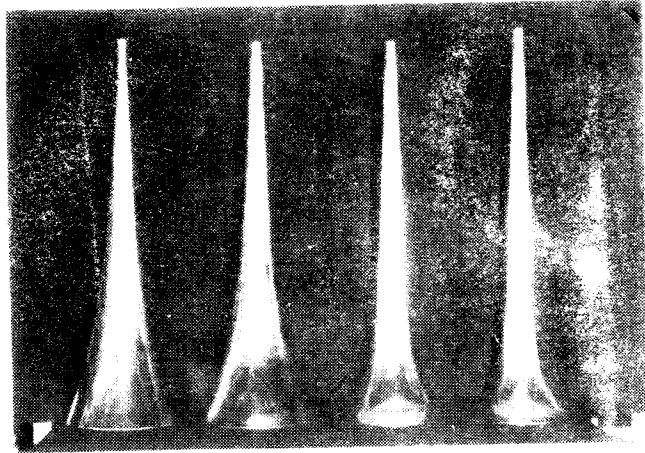


Bild 46 Berechneter Verlauf der Eingangsimpedanz eines konischen Trichters



exponential      hyperbolisch  
4      3      2      1

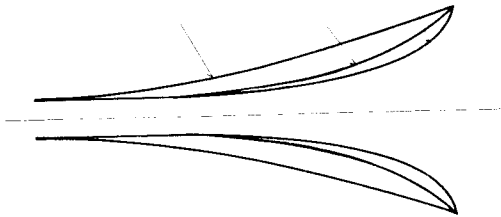


Bild 47 Versuchstrichter für eine Posaune

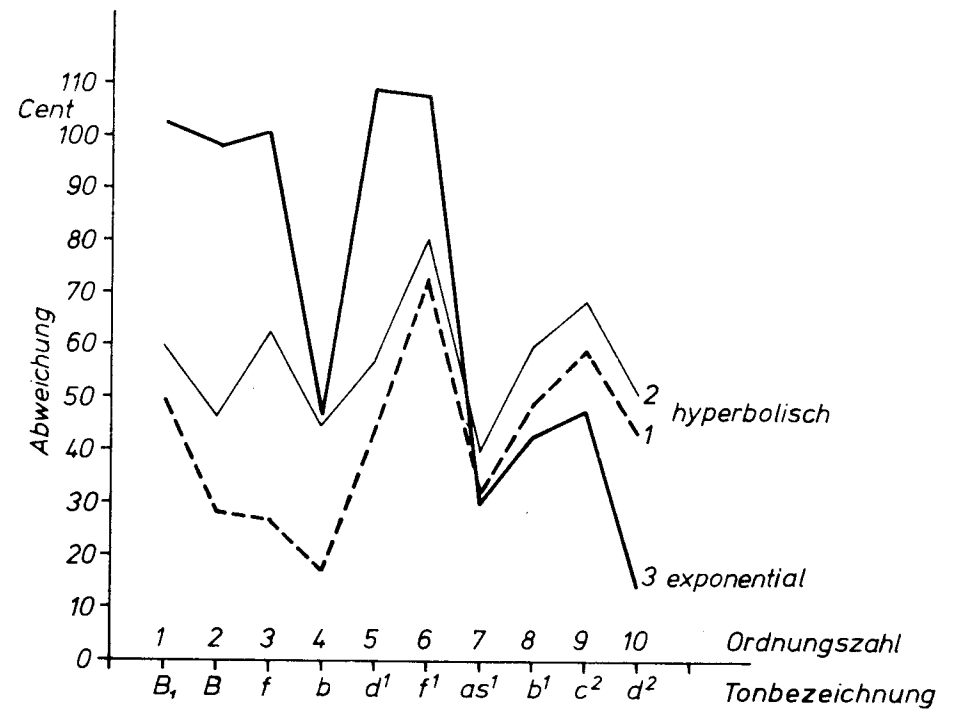


Bild 48 Stimmungskurven einer Posaune mit verschiedenen Trichtern

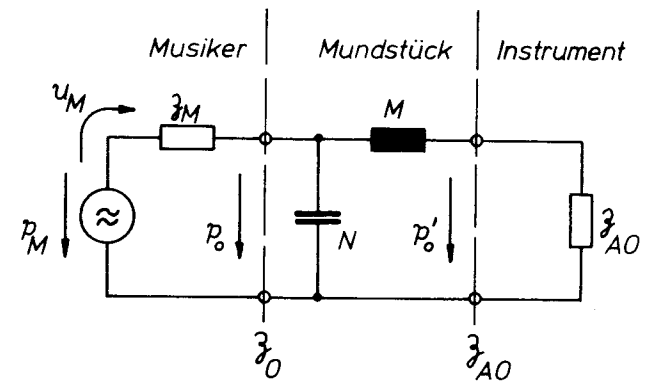


Bild 49 Ersatzschaltbild von Musiker und Instrument mit Mundstück

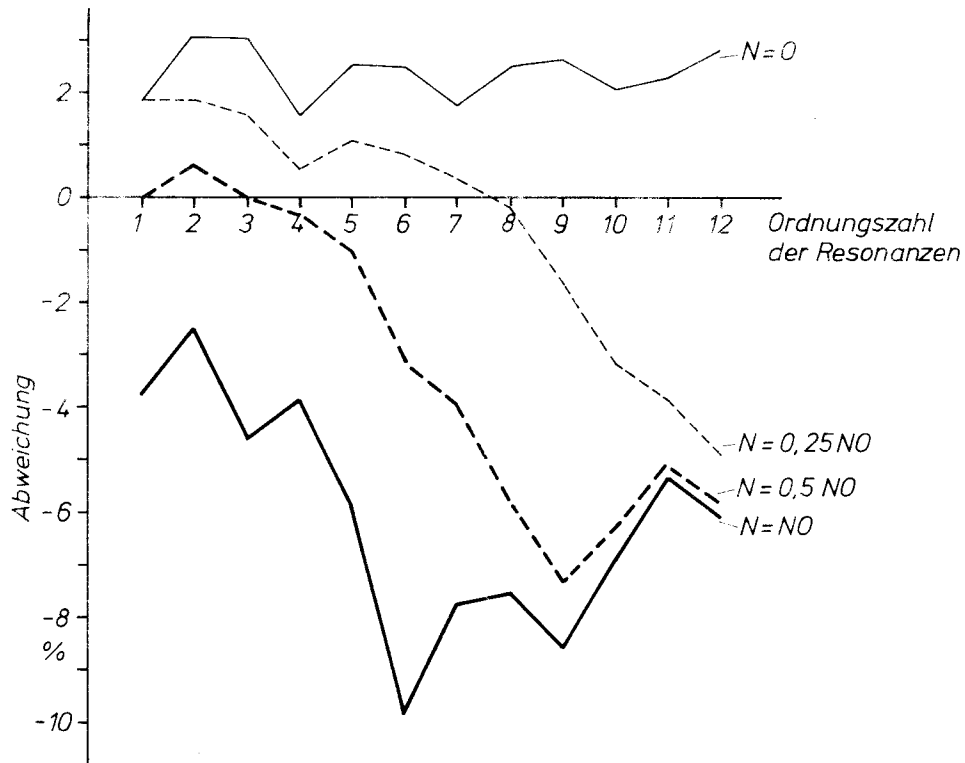


Bild 50 Abweichung der Resonanzfrequenz v. ZO gegenüber ZAO bei verschiedenen Mundstückskesseln  
 ( $NO = 6,12 \cdot 10^{-6} \frac{cm^4 s^2}{g}$   $M = 0,02874338 \frac{g}{cm^4}$ )

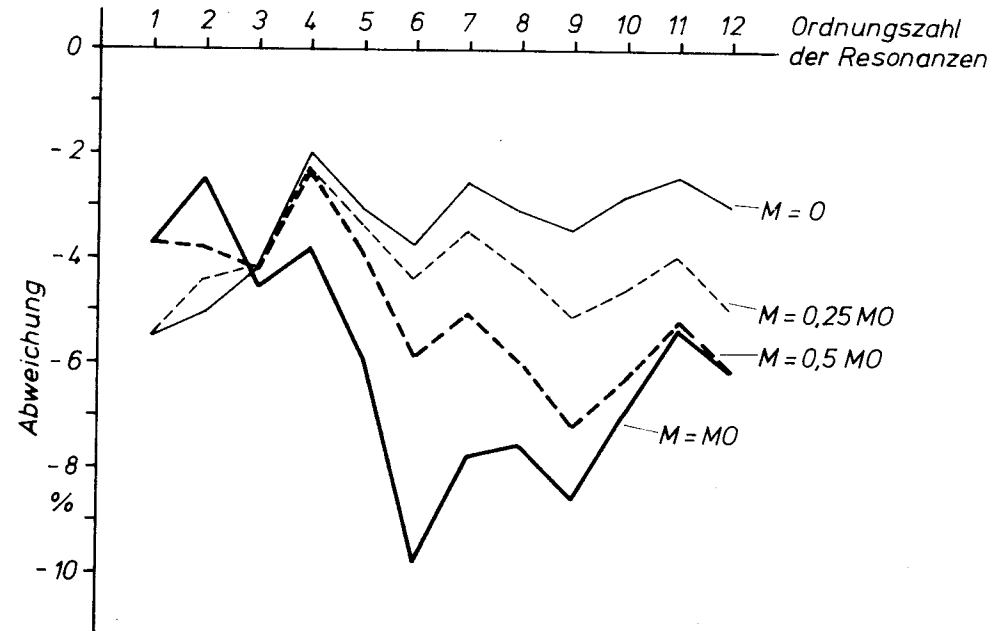


Bild 51 Abweichung der Resonanzfrequenzen von ZO gegenüber ZAO bei verschiedenen Mundstückshälsen  
 ( $MO = 0,02874338 \frac{g}{cm^4}$   $N = 6,12 \cdot 10^{-6} \frac{cm^4 s^2}{g}$ )

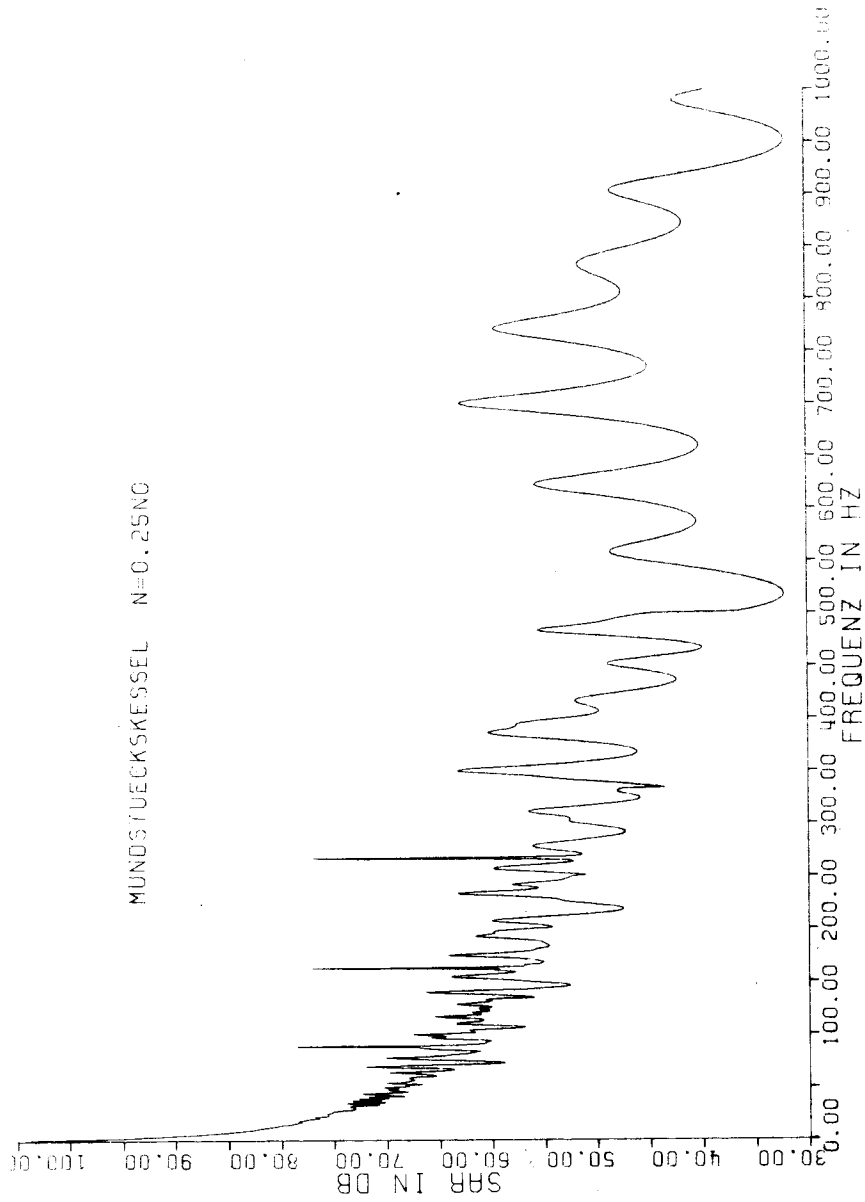


Bild 52 Berechnete Summenfunktion des Versuchsinstrumentes mit Mundstück  
( Kesselvolumen um 75% verkleinert )

#### Lebens- und Bildungsgang

12.12.1940	Geburt in Kopenhagen, Dänemark
Eltern	Konsulatatssekretär Eberhard Wogram Edith Wogram, geb. Schuchmann
1944	Übersiedlung von Kopenhagen nach Wilhelmshaven
1947 bis 1952	Besuch der Volksschule Wilhelmshaven
1952 bis 1960	Besuch des Humboldt-Gymnasiums in Wilhelmshaven
1960	Reifeprüfung, anschließend 6 Monate Vorpraktikum in Wilhelmshaven
WS 1960/61	Beginn des Studiums der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule in Braunschweig
1967	Abschluß des Studiums
1966	Heirat mit Hedwig Wogram, geb. Wilhelm
seit 1967	Wissenschaftlicher Angestellter in der Abteilung Akustik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig
1969	Geburt eines Sohnes