

Objektive Prüfung der Stimmung von Blechblasinstrumenten

Von K. Wogram und J. Meyer, Braunschweig

Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

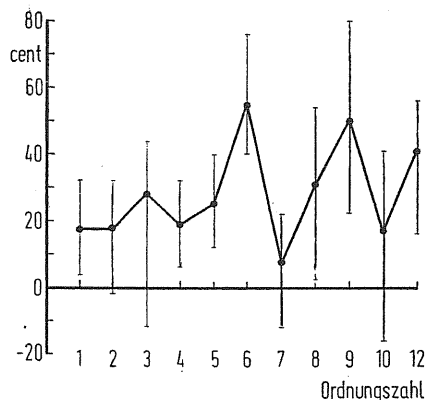
Aufgabenstellung

Bei der Beurteilung der Stimmung von Blechblasinstrumenten ergeben sich sowohl für den Musiker als auch für den Instrumentenbauer dadurch Schwierigkeiten, daß die beim Anblasen entstehende Tonhöhe nicht nur vom Instrument allein abhängt, sondern auch vom Spieler und dessen Blastechnik beeinflusst wird. Der Musiker ist jedoch entsprechend der musikalischen Praxis gewohnt, die Frequenzlage der einzelnen Töne stets so zu korrigieren, daß sich innerhalb einer Tonfolge reine Intervalle ergeben, beziehungsweise im Orchester ein harmonischer Zusammenklang entsteht. Diese gehörmäßige Anpassung an den musikalischen Zusammenhang geschieht aufgrund der jahrelangen Übung weitgehend unbewußt. Außerdem stellt sich ein Spieler im Laufe der Zeit auch derart auf die Eigenheiten seines Instrumentes ein, daß er dessen Fehler unbewußt durch seine Anblastechnik kompensiert. Die Folge davon ist, daß er auch bei fremden Instrumenten dazu neigt, die gleichen „Korrekturen“ anzuwenden, ohne sich dessen bewußt zu sein, und damit zu einer falschen Beurteilung kommt.

Will man die Stimmung eines Blechblasinstrumentes durch einen Musiker überprüfen lassen, so ist es erforderlich, daß er die einzelnen Töne jeweils ohne „Korrekturen“ mit derjenigen Frequenz anbläst, die vom Instrument vorgegeben ist. Diese Anforderung ist jedoch auch von hochqualifizierten Bläsern kaum zu erfüllen, da sie einerseits ihre Klangvorstellung nicht vollständig ausschalten können und andererseits die physiologischen Eigenschaften der Lippen zeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse befriedigt deshalb bei diesem Verfahren nicht. So ergaben sich bei Messungen mit ein und demselben Musiker an verschiedenen Tagen Frequenzunterschiede, die bei den einzelnen Tönen einer Naturtonreihe zwischen 5 und 35 cent lagen [1]. Dabei ist die Reproduzierbarkeit um so besser, je leichter die einzelnen Töne ansprechen.

Die gleiche Tendenz zeigt sich auch bei den Resultaten, die mit einer größeren Anzahl von Musikern gewonnen wurden. Als Beispiel sind in Abb. 1 für eine Tenorposaune die Ergebnisse von Intonationsmessungen mit fünf Musikern dargestellt, die die einzelnen Töne jeweils sechsmal angeblasen haben. In diesem Diagramm ist von links nach rechts die Ordnungszahl der Naturtöne (ohne Verlängerung des Zuges) aufgetragen; der Naturton 11. Ordnung ist dabei ausgelassen, da er normalerweise

nicht verwendet wird. In Ordinate-Richtung ist die Abweichung von der gleichmäßig temperierten Tonskala angegeben, die Null-Linie bezieht sich dabei auf $a' = 440$ Hz. Die Schwankungen, die bei den einzelnen Tönen in dieser Meßreihe auftreten, sind erheblich größer als die Frequenzunterschiede beim Anblasen durch einen einzelnen Musiker. So ergeben sich hier Streubreiten von etwa 25 cent für die Töne mit der leichtesten Ansprache und etwa 60 cent für die ungünstigsten Fälle. Bildet man aus den mit den verschiedenen Musikern gewonnenen Resultaten Mittelwerte für die einzelnen Töne, so erhält man eine Kurve, die sich auch bei Hinzuziehung weiterer Bläser als gut re-



1 Abweichung der Naturtöne einer Posaune mit eingeschobenem Zug von der auf $a' = 440$ Hz aufgebauten gleichmäßig temperierten Skala
Dünne Linien: Streubereich beim Anblasen durch fünf Musiker.
Verbundene Punkte: Mittelwerte der Messung mit fünf Bläsern

produzierbar erweist. Diese Kurve kann daher als optimale Darstellung der Stimmung des betreffenden Instrumentes angesehen werden.

Um die subjektiven Einflüsse der Musiker zu umgehen und den zeitlichen Aufwand zu reduzieren, erscheint es deshalb wünschenswert, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem man die Stimmung von Blechblasinstrumenten objektiv ermitteln kann. Die Anregung des Instrumentes muß dabei derart erfolgen, daß sich dieselben Frequenzwerte einstellen, wie sie sich auch als Mittelwerte aus Messungen mit vielen Musikern ergeben [2].

Funktionsweise der Blechblasinstrumente

Resonanzsystem

Die Klangabstrahlung beruht bei den Blechblasinstrumenten auf den Schwingungen der vom Instrument begrenzten Luftsäule. Diese Luftsäule besitzt eine

Reihe diskreter Resonanzen, deren Frequenzen von den Längs- und Querabmessungen sowie von den Abschlußimpedanzen an den beiden Enden abhängen. Die akustischen Verhältnisse im Austrittsquerschnitt des Schalltrichters sind mit denen einer Kolbenmembran vergleichbar, dementsprechend ist ihre Impedanz in starkem Maße frequenzabhängig. Der Abschluß des Instrumentes durch die Lippen des Musikers ist hochohmig, d. h. in erster Näherung als schallhart zu betrachten. Berücksichtigt man nun, daß ein einseitig geschlossenes zylindrisches Rohr eine Reihe von Resonanzen aufweist, deren Frequenzen sich wie $1 : 3 : 5 : 7$ usw. verhalten, und daß ein stark konisches Rohr eine Resonanzfolge mit allen ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz ($1 : 2 : 3 : 4$ usw.) besitzt, so kann man annehmen, daß bei dem komplexen Aufbau eines Blechblasinstrumentes Zwischenwerte dieser beiden Resonanzreihen auftreten müssen.

Bei tiefen Frequenzen sind die Querabmessungen des Instrumentes klein im Verhältnis zur Schallwellenlänge, und die Impedanz der Kolbenmembran bewirkt eine fast vollständige Reflexion mit einer Phasendrehung. Daraus ergibt sich eine tiefste Resonanzfrequenz des Instrumentes, die derjenigen eines zylindrischen Rohres mit gleicher Länge annähernd entspricht; die nächste Resonanz liegt dann bei etwa der dreifachen Frequenz. Bei hohen Frequenzen vergrößert sich die Abschlußimpedanz der Kolbenmembran, so daß der Reflexionsfaktor kleiner wird; außerdem sind die Querabmessungen nicht mehr in allen Teilen des Instrumentes klein zur Wellenlänge. Diese beiden Erscheinungen bewirken, daß die Resonanzfolge derjenigen eines konischen Rohres ähnlich wird.

Die genaue Frequenzlage der einzelnen Resonanzen kann man messen, indem man das Mundstück mit einem Kondensatormikrophon abschließt, dessen Membran schallhart ist, und das Instrument durch den Schalltrichter mit einem Lautsprecher oberwellenfrei anregt. Das Ergebnis läßt den kontinuierlichen Übergang von der Charakteristik eines zylindrischen Rohres (bei tiefen Frequenzen) zu den Eigenarten eines konischen Rohres (bei hohen Frequenzen) erkennen. Beispielsweise erhält man für ein bestimmtes Posaunen-Modell Resonanzfrequenzen bei 41, 115, 175, 236, 299, 361 Hz usw. Dem entsprechen Intervallverhältnisse von $1 : 2,80$; $2 : 3,04$; $3 : 4,05$; $4 : 5,06$; $5 : 6,03$ usw. Wegen der unterschiedlichen Men-

suren ist das tiefste Intervall bei den Tuben meist enger, bei den Trompeten dagegen weiter.

Anregungssystem

Ähnlich den Stimmbändern des Kehlkopfes stellen die Lippen des Musikers ein schwingungsfähiges System dar, das eine Modulation des zwischen den Lippen austretenden Luftstromes bewirkt. Die Abstimmung erfolgt dabei fast allein durch Veränderung der Lippenspannung, da sich die schwingende Lippenmasse über den erforderlichen Frequenzumfang von etwa vier Oktaven kaum beeinflussen läßt. Beim Anblasvorgang

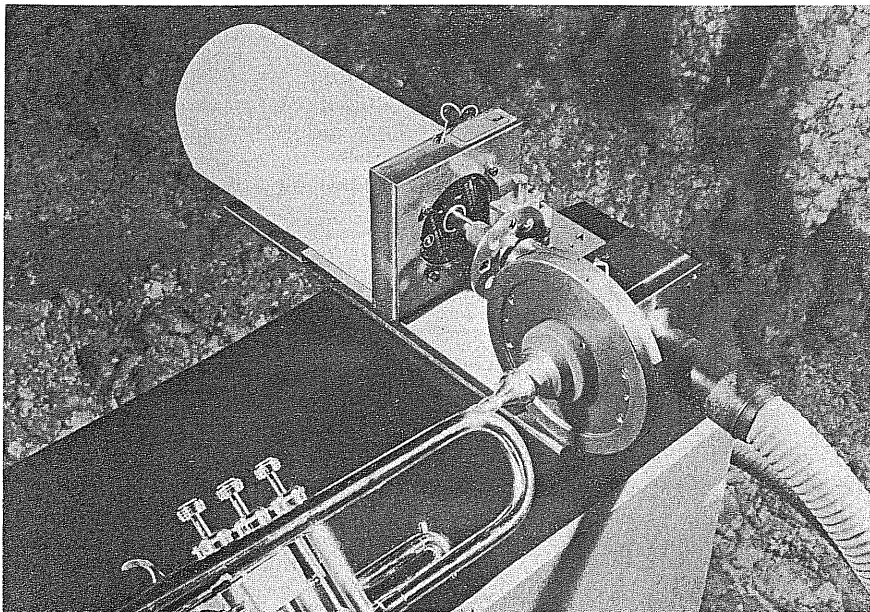
erhebliche Abweichungen. Deshalb sollen im folgenden die vom Bläser erzeugten Frequenzen — im Gegensatz zu den Resonanzfrequenzen — als Naturtonfrequenzen bezeichnet werden. Dabei wird der Ausdruck „Naturton“ auch dann beibehalten, wenn die entsprechenden Töne unter Verwendung von Ventilen geblasen werden, da es sich auch in diesen Fällen um Naturtöne (im Sinne der musikalischen Terminologie) für stufenweise tiefergestimmte „Naturinstrumente“ handelt.

Beim Anblasen eines Blechblasinstrumentes tendiert der Spieler dazu, diejenigen Frequenzen zu erzeugen, bei de-

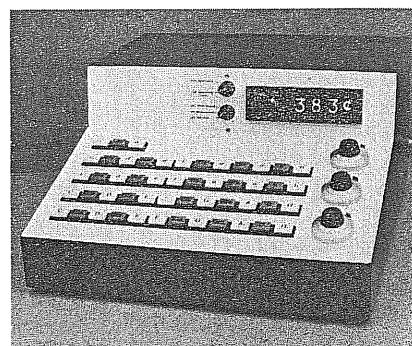
rehtckig sind und sich nicht verändern lassen, kann der Statorschlitz derart in seiner Form variiert werden, daß mit der Amplitudenänderung keine Veränderung des Spektrums verbunden ist. Diese Einstellmöglichkeit ist wichtig, um bei verschiedener Mundstücksgröße eine möglichst gute Annäherung der Schlitzfläche an die Verhältnisse beim Anblasen durch einen Spieler zu erreichen.

In Abb. 2 ist die Sirene mit der scheibenförmigen Blendenanordnung des Statorschlitzes zu erkennen, vor der über einen Adapter ein Versuchsinstrument angekoppelt ist. Die Sirene ist mit einem besonders geräuscharmen Gebläse verbunden, mit dem sich ein einstellbarer Luftdruck bis zu $15 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}$ (ca. 1500 mmWS) erzeugen läßt.

Als Antrieb der Sirene dient ein Scheibenläufermotor, dessen Drehzahl derart



2 Anblasvorrichtung mit Versuchsinstrument



3 Bedienungspult für die Anblasvorrichtung

ist die Bewegung der Lippen zeitlich nahezu sinusförmig und auch die Öffnungsfläche zwischen den Lippen folgt in ihrer zeitlichen Veränderung einer Sinusfunktion [3]. Dementsprechend verläuft die Modulation der durch den Spalt austretenden Luftströmung ebenfalls sinusförmig.

Die zeitliche Veränderung der Lippen-spaltfläche bewirkt aber außerdem auch eine zeitliche Änderung der Impedanz des Bläfers, die somit etwa sinusförmig zwischen zwei Extremwerten schwankt [4]. Dadurch wird das ursprünglich sinusförmige Anregungssignal nochmals annähernd sinusförmig moduliert und erfährt dadurch starke Verzerrungen. Der Modulationsgrad und damit der Obertongehalt werden durch den Schwingweg der Lippen bestimmt, infolgedessen nimmt die Verzerrung mit fallender Grundtonfrequenz zu. Das bedeutet, daß vor allem bei den tiefen Tönen sowie bei starkem Anblasen ein sehr obertonreiches Anregungsspektrum entsteht.

Entstehung der Naturtöne

Wenn ein Spieler ein Blechblasinstrument anbläst, so erzeugt er eine Tonfolge, deren Frequenzen nicht unbedingt mit der Lage der einzelnen Resonanzen übereinstimmen. Insbesondere im Bereich der tiefen Töne ergeben sich oft

nen das Instrument am leichtesten anspricht. Da das Anregungsspektrum im Mundstück, wie bereits erläutert, mehr oder weniger obertonhaltig ist, verteilt sich auch die vom Bläser abgegebene Schalleistung auf Grund- und Obertöne. Eine Resonanz im Sinne maximalen Energietransportes liegt daher dann vor, wenn der Musiker bei möglichst vielen Teiltönen möglichst gut an das Instrument angepaßt ist. Bei den Naturtonfrequenzen fallen demnach möglichst viele Teiltöne in die einzelnen Resonanzbereiche [1]. Dabei kann es durchaus vorkommen, daß der Grundton nicht mit einer Resonanz des Instrumentes zusammenfällt.

Meßverfahren

Meßaufbau

Um die Naturtonfrequenzen zu messen, ist es erforderlich, das Instrument mit einem Spektrum anzuregen, das dem Anregungsspektrum eines Musikers entspricht. Es wurde daher eine Anblasvorrichtung entwickelt, mit der sich mittels einer Lochsirene und eines an die Instrumentenart angepaßten Adapters im Mundstück des zu prüfenden Instrumentes ein Schallsignal erzeugen läßt, das den gewünschten Obertongehalt aufweist. Maßgeblich ist dafür die Form der Schlitzes in Stator und Rotor der Sirene. Während die Schlitzes im Rotor

geregelt werden kann, daß sich ein Meßbereich von etwa 30 bis 1200 Hz ergibt. Der Motor hat eine mechanische Zeitkonstante von ca. 20 ms und bildet mit einem auf der gleichen Welle befindlichen Tachogenerator und einem Vierquadranten-Verstärker einen Regelkreis; daraus resultiert bei Ansteuerung mit einer konstanten Gleichspannung eine Frequenzkonstanz von etwa $\pm 1\%$, was Schwankungen von etwa ± 2 cent entspricht.

Die Höhe der Gleichspannung läßt sich über ein Potentiometer kontinuierlich verändern; für den praktischen Einsatz der Anblasvorrichtung hat es sich jedoch bewährt, eine Reihe fester Gleichspannungswerte vorzugeben, bei denen die Sirene die Frequenzen der gleichmäßig temperierten Tonskala erzeugt. Abb. 3 zeigt das Schalt-pult zur Ansteuerung der Anblasvorrichtung mit einer Tastatur von etwas mehr als vier Oktaven Umfang. Für tiefe Instrumente wird eine Sirene verwendet, die einen Tonbereich von C₁ bis d'' umfaßt, für hohe Instrumente wird eine Ausführung mit doppelter Schlitzanzahl eingesetzt, die einen Bereich von C bis d''' ergibt. Die durch eine Taste vorgewählte Tonhöhe kann mit Hilfe eines zusätzlichen Potentiometers bis zu ± 200 cent feinverstimmt werden.

Die direkte Proportionalität zwischen der Steuerspannung und der Sirenenfrequenz bietet die Möglichkeit, den Grad der Feinverstimmung als Spannungsdifferenz zu messen. Durch entsprechende

Verstärkung dieses Meßwertes wird die Feinverstimmung auf einem Digitalvoltmeter direkt in cent zur Anzeige gebracht. Zur Bestimmung der Naturtonfrequenzen ist es deshalb lediglich notwendig, die jeweilige Sollfrequenz über die entsprechende Taste vorzuwählen und durch Feinverstimmung diejenige Frequenz einzustellen, bei der die Schallabstrahlung einen Maximalwert erreicht. Die Stimmungsabweichung dieses Naturtones von der temperierten Tonskala ist dann sofort abzulesen.

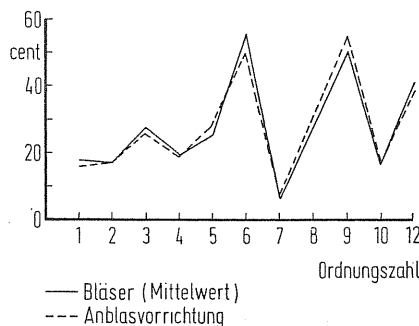
Meßgenauigkeit

Der wichtigste Punkt zur Erreichung einer befriedigenden Genauigkeit bei der objektiven Bestimmung der Naturtonfrequenzen ist die möglichst korrekte Nachbildung der akustischen Vorgänge beim Anblasen durch einen Spieler. Es wurden eine Reihe von Vergleichsmessungen durchgeführt, bei denen auf die zur Erleichterung des Meßvorganges dienenden Peripheriegeräte verzichtet wurde, um etwaige zusätzliche Fehlerquellen auszuschalten. Die Sirene mit der Schlitzblende und dem Adapter in seiner endgültigen Form wurde dazu mit hochkonstanter Gleichspannung angesteuert und die Frequenz der einzelnen Naturtöne mit einem Zähler gemessen. Die auf diese Weise gewonnene objektive Stimmungskurve einer Posaune ist in Abb. 4 wiedergegeben. Zum Vergleich ist in diesem Diagramm außerdem die Mittelwertkurve der Messung mit fünf Musikern eingetragen.

Wie man sieht, ist die Übereinstimmung der beiden Kurven sehr gut; bei den meisten Naturtönen sind die Unterschiede kleiner als 2 cent, lediglich in zwei Fällen treten Abweichungen bis zu 6 cent auf. Zur Beurteilung dieser Werte muß man berücksichtigen, daß sich die Mittelwertkurve bei Hinzuziehung anderer Bläser in einzelnen Punkten geringfügig ändern könnte. Betrachtet man jedoch die Abweichung der einzelnen Naturtöne von der mittleren Stimmung des Instrumentes, die als eine Parallele zur Null-Linie (im vorliegenden Fall bei etwa 25 cent) vorzustellen ist, so erkennt man, daß die von der eigentlichen Anblasvorrichtung ermöglichte Genauigkeit ausreicht, um die Stimmung des Instrumentes einwandfrei zu beurteilen.

Wenn die Anblasvorrichtung mit dem Steuerpult betrieben wird, werden die den Tasten zugeordneten Frequenzen durch eine Widerstandsprogrammierung eingestellt und nicht mehr direkt gemessen. Trotz der Verwendung von Metallschichtwiderständen tritt bei Temperaturschwankungen jedoch eine Spannungsdrift auf, die im Laufe eines Arbeitstages zu einem Frequenzfehler bis zu 12 cent führen könnte. Bei dem Zeitaufwand für die Prüfung eines Instrumentes bedeutet das, daß die Apparatur dafür nur einmal vorher abgeglichen werden muß, damit die gewünschte Unsicherheit von ± 2 cent nicht überschritten wird.

Schließlich sind der Genauigkeit des Verfahrens auch dadurch Grenzen ge-



4 Vergleich der Meßwerte für die Abweichung der Naturtöne einer Posaune von der gleichmäßig temperierten Skala beim Anblasen durch Musiker und Anblasvorrichtung

setzt, daß die Schallabstrahlung des Instrumentes im unmittelbaren Bereich der Naturtonfrequenzen nur verhältnismäßig flache Maxima durchläuft. Dadurch wird die Einstellung des Höchstwertes erschwert, was zu einer Reproduzierbarkeit des Meßergebnisses von ± 2 cent führt. Dieser Toleranzbereich läßt sich naturgemäß noch verringern, wenn man Mittelwerte aus mehreren Meßreihen bestimmt.

Darstellung und Deutung der Meßergebnisse

Anforderungen an die Stimmung

In ihrer historischen Entwicklung waren die Blechblasinstrumente zunächst sog. Naturinstrumente, deren Tonumfang auf eine harmonische Reihe beschränkt war. Für verschiedene Tonarten hatte der Spieler Instrumente verschiedener Länge und damit unterschiedlicher Grundtonlage zur Verfügung; bei den Inventionshörnern konnte eine entsprechende Umstimmung durch das Auswechseln verschieden langer Einsatzstücke vorgenommen werden. Wegen dieser auf wenige Töne beschränkten Spielmöglichkeit wurden die Blechblasinstrumente in der klassischen Musik vorwiegend für Dreiklänge und ähnliche Akkorde sowie auch in der Melodieführung für entsprechende Tonfolgen eingesetzt.

Durch die Erfindung der Ventile wurden im 19. Jahrhundert die technischen Voraussetzungen geschaffen, auch auf den Blechblasinstrumenten eine vollständige chromatische Tonfolge zu erzeugen, indem die Grundstimmung des Instrumentes um ein oder mehrere Halbtonschritte erniedrigt wird. Trotz dieser erweiterten Spielmöglichkeiten finden sich noch in vielen Kompositionen der romantischen Epoche Passagen, in denen der Dreiklangscharakter des Blechsatzes erhalten geblieben ist.

Da die Blechbläser aus stilistischen Gründen teils mit sehr geringem Vibrato, teils sogar ganz ohne Vibrato spielen, empfindet man Schwebungen in ihren Akkorden in besonderem Maße als störend. Aus diesem Grunde sollten die entsprechenden Intervalle möglichst in reiner Stimmung intoniert werden. Dies gilt nicht nur für Oktaven und Quinten, sondern vor allem für Terzen und Sexten. Demgegenüber findet die Naturseptime (4 : 7) verhältnismäßig

selten Verwendung [5]. Wenn ein Musiker ein Blechblasinstrument auf die Qualität seiner Stimmung untersuchen will, geht er deshalb im allgemeinen in der Weise vor, daß er zunächst die Reinheit der Naturtonreihe, die sich ohne Betätigung der Ventile ergibt, überprüft. Anschließend wendet er dieses Verfahren auch auf die einzelnen Ventilkombinationen an. Darauf gründet der Bläser sein Urteil, wie das Instrument „in sich“ stimmt und welche Beeinträchtigung durch die Ventile entsteht. Weitere Versuche gelten der Frage, inwieweit die Stimmung des Instrumentes den Anforderungen bei mehrfachen Modulationen durch verschiedene Tonarten und bei chromatischen Figuren genügt. Als besonders kritisch erweisen sich dabei Tonleitern und chromatische Läufe, weil Ungleichmäßigkeiten hierbei sehr stark auffallen.

Hinsichtlich dieser musikalischen Anforderungen erscheint es bei der objektiven Prüfung der Stimmung von Blechblasinstrumenten sinnvoll, einerseits die Abweichungen der einzelnen Naturtonreihen von den entsprechenden reinen Tonskalen darzustellen und andererseits die gesamte chromatische Tonfolge des Instrumentes auf die gleichmäßig temperierte Tonskala zu beziehen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Bezugssystemen ist allerdings bei den meisten Intervallen, die innerhalb einer Naturtonreihe verwendet werden, verhältnismäßig gering. So ist die reine Quinte um 2 cent größer als die temperierte, dementsprechend ergibt sich für die None ein Unterschied von 4 cent. Die große Terz ist in reiner Stimmung um 14 cent enger als das entsprechende temperierte Intervall; aus Gründen der musikalischen Gestaltung wird sie in der Praxis jedoch oftmals sogar weiter intoniert.

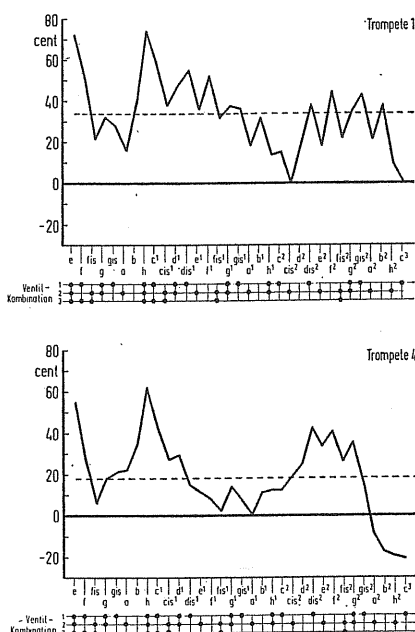
Um in allen Tonarten richtig intonieren zu können, muß der Musiker für ein und dieselbe Note, je nach harmonischem Zusammenhang, Töne von etwas unterschiedlicher Frequenz blasen können. Dieser Variationsbereich ist allerdings so eng, daß er für den Bläser durch Veränderung seines Ansatzes und seiner Lippenkraft spielbar ist. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß die Abweichungen der Naturtonfrequenzen sowohl von der reinen als auch von der temperierten Skala nicht wesentlich größer sind als die Unterschiede dieser beiden Bezugssysteme. Andernfalls besteht die Gefahr, daß der Ziehbereich des Instrumentes nicht mehr ausreicht, um die Tonhöhe zu korrigieren. Besonders unangenehm ist es für den Spieler, wenn benachbarte Töne große Unterschiede in ihrer Stimmung aufweisen. Dagegen kann er Abweichungen, die zwischen der tiefen und der hohen Lage insgesamt auftreten, leichter durch seine Spieltechnik ausgleichen.

Stimmungsdiagramme

Für eine Beurteilung der objektiv ermittelten Meßergebnisse erscheint es zunächst naheliegend, genaue Toleranz-

bereiche festzulegen, die nicht überschritten werden dürfen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Kenntnis nicht nur der musikalischen Erfordernisse sondern auch der instrumentenbautechnisch erreichbaren Grenzen. Letztere lassen sich am besten dadurch abschätzen, daß man eine Vielzahl von Instrumenten einer Gattung auf ihre Stimmung hin überprüft. Dieses Verfahren läßt sich grundsätzlich auch dahingehend erweitern, daß man verschiedenen Toleranzbereichen unterschiedliche Qualitätsklassen zuordnet.

Um zu veranschaulichen, in welchem Maße sich die Stimmung bei handels-



5 Chromatische Stimmungskurven zweier Trompeten, bezogen auf die gleichmäßig temperierte Tonskala. Gestrichelte Linie: Mittelwert der Stimmung („Grundstimmung“)

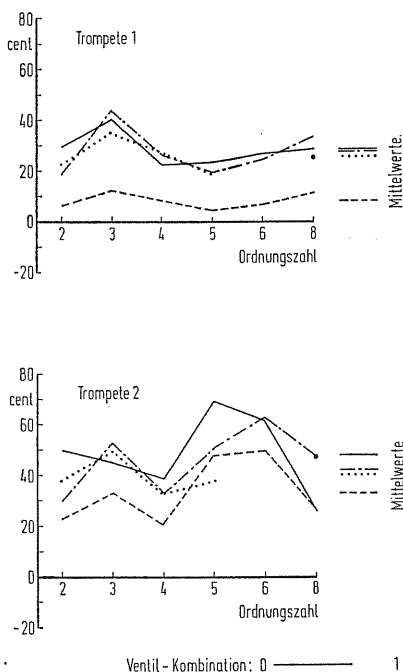
üblichen Instrumenten unterscheiden kann, und wie die zugehörigen Stimmungskurven zu interpretieren sind, wurden dem beschriebenen Meßverfahren vier B-Trompeten mit Perinetventilen unterworfen, die hinsichtlich ihrer Preislage als repräsentativer Querschnitt des derzeitigen Angebotes angesehen werden können. Es handelt sich dabei im einzelnen um:

1. ein deutsches Fabrikat der unteren Preisklasse,
2. ein japanisches Fabrikat der mittleren Preisklasse,
3. ein deutsches Fabrikat der mittleren Preisklasse,
4. ein amerikanisches Fabrikat der gehobenen Preisklasse.

Im folgenden werden diese Instrumente nur durch die angegebenen Nummern bezeichnet. Es sei noch darauf hingewiesen, daß jede Trompete mit dem vom Hersteller für dieses Modell vorgeschriebenen und mitgelieferten Mundstück untersucht wurde.

In Abb. 5 sind zwei Beispiele für die Abweichung der chromatischen Tonfolge von der gleichmäßig temperierten Stimmung wiedergegeben. Wie aus dem unter den Diagrammen dargestellten

Griffschema zu ersehen ist, wurden bei den einzelnen Tönen diejenigen Ventilkombinationen gewählt, die in der Praxis am gebräuchlichsten sind. Sowohl der Hauptstimmzug als auch die drei Ventiltzüge waren bei der Messung bis auf Anschlag eingeschoben, da dieses der am besten definierte Ausgangspunkt ist. Das bedeutet, daß durch eine Nacheinstellung der Stimmzüge die einzelnen Töne gegenüber den im Diagramm angegebenen Meßwerten nur tiefer, aber nicht höher gestimmt werden können. Betrachtet man die beiden Stimmungskurven, so fällt zunächst auf, daß die

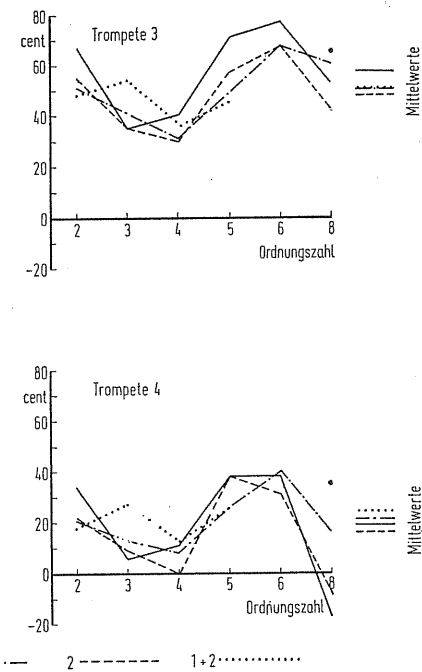


6 Abweichung der Naturtonreihen bei verschiedenen Ventilgriffen für vier Trompeten, bezogen auf die auf den jeweiligen Grundton aufgebaute reine Tonskala. Die Striche neben den einzelnen Diagrammen geben die Mittelwerte für die einzelnen Kurvenzüge an.

mittlere Stimmung bei beiden Instrumenten höher ist, als es einer Grundstimmung von 440 Hz entspricht. Eine derartige Abweichung von ungefähr 20 cent ist jedoch erforderlich, um die Instrumente auch in Orchestern einsetzen zu können, deren Ausgangsstimmung bis zu 445 Hz beträgt. Andererseits können Trompeten zur Anpassung an eine tiefere Orchesterstimmung, wie sie zum Beispiel bei Kirchenkonzerten mit Orgel vorkommen kann, durch Verlängerung der Stimmzüge um fast einen Halbton tiefer gestimmt werden. Daher ist eine Grundstimmung im Bereich von etwa + 15 bis + 50 cent als richtig anzusehen.

Zur Deutung der Einzelheiten im Verlauf der Stimmungskurven muß man berücksichtigen, daß sich bei den Ventil-Kombinationsgriffen stets zu kurze Instrumentenlängen ergeben, da — wie erwähnt — alle Ventiltzüge ganz eingeschoben sind. Die entsprechenden Naturtonfrequenzen fallen deshalb im Vergleich zur Grundstimmung meist zu hoch aus. Typische Beispiele dafür sind die Töne e und h bei beiden Trompeten. Diese Töne lassen sich durch eine geeignete Verlängerung der Züge tieferstimmen,

solange nicht andere Töne, bei denen dieselben Ventile verwendet werden müssen, dadurch zu tief werden. Betrachtet man beispielsweise den Ton h bei Trompete 1, so ist eine Verlängerung der Ventiltzüge 1 und 2 nicht ratsam, weil dadurch jeweils etwa die Hälfte aller Töne der mittleren und hohen Lage ungünstig beeinflusst würde. Einer Verlängerung des Ventiltzuges 3 sind aber auch Grenzen gesetzt, weil einige Töne der tiefen Lage sowie auch das fis'' sonst zu sehr abgesenkt werden.



Der mittlere und hohe Tonbereich ist in der Kurve 1 wesentlich ausgeglichener als in der Kurve für das Instrument 4. Die größten Abweichungen von der mittleren Stimmung treten bei der Trompete 1 im Bereich von gis' bis d'' auf, d. h. in der Lage, die durch die Naturtöne 4. und 5. Ordnung gebildet wird. Im Bereich der Terzen (h' bis d'') ist diese Abweichung von der temperierten Skala nach unten jedoch nicht so störend wie in anderen Tonbereichen, da reine Terzen ohnehin bei - 14 cent (bezogen auf die mittlere Stimmung) liegen würden. Bei dem Instrument 4 verlaufen die Übergänge von der mittleren zur hohen Lage und von der hohen zur höchsten Lage ziemlich sprunghaft, so daß die Intonationsunterschiede für einen Bläser nur schwer durch Ansatz und Lippenkraft auszugleichen sind. Insbesondere ist es kaum möglich, die höchsten Töne bis auf das Niveau der mittleren Stimmung hochzudrücken. Der grundsätzliche Verlauf der Stimmungskurve eines Instrumentes läßt sich geringfügig verändern, wenn man Mundstücke unterschiedlicher Kessel- und Bohrungsdurchmesser verwendet. Um die höchste Lage des Instrumentes 4

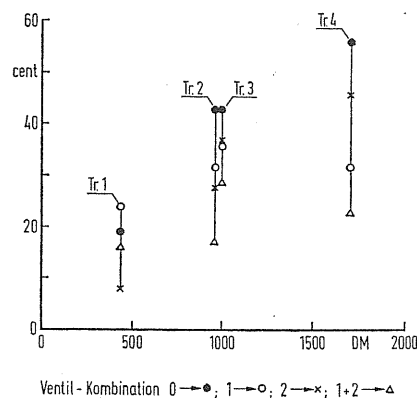
richtig intonieren zu können, müßte man ein Modell mit besonders flachem Kessel oder großer Bohrung einsetzen. Dabei würde jedoch nicht nur der höchste, sondern auch der obere Bereich von f'' an höhergestimmt, so daß die Ausgeglichenheit im Ganzen nicht viel besser würde. Außerdem nimmt bei einem derartigen Mundstück die Klangfarbe an Schärfe zu, was vor allem bei forciertem Blasen mit einer zusätzlichen Rauigkeit verbunden ist.

Die Stimmung der einzelnen Naturtonreihen „in sich“ ist für die vier Trompeten in Abb. 6 dargestellt. Diese „innere Stimmung“ wurde in der Weise ermittelt, daß zunächst die Abweichung des Naturtones 2. Ordnung, also des Grundtones für die jeweilige Ventilkombination, von der auf $a' = 440$ Hz aufgebauten temperierten Skala festgestellt wurde. Dieser Grundton bildet den Bezugspunkt für eine streng harmonische Tonskala mit den Intervallverhältnissen $2:3:4:5:6:8$, mit der die gemessenen Naturtonfrequenzen verglichen werden. Bei genauer Übereinstimmung würden sich parallele Linien ergeben, deren Abstand zur Null-Linie der Abweichung des jeweiligen Grundtones von der temperierten Bezugsskala entspräche. Je stärker die einzelnen Kurven von dem geradlinigen Verlauf abweichen, desto schlechter ist die Stimmung „in sich“, d. h. um so schwieriger ist es für den Musiker, eine reine Naturtonfolge ohne Änderung der Ventilkombination zu blasen. Ein erster Überblick über die vier Diagramme der Abb. 6 läßt erkennen, daß der Verlauf der Kurven für die Trompete 1 ausgeglichener ist für die anderen Instrumente. Dabei weist die Charakteristik der Trompeten 2 bis 4 große Ähnlichkeiten auf: zu hoch sind vor allem die Naturtöne 5. und 6. Ordnung, also Terz und obere Quinte. Bei der Terz kommt diese hohe Stimmung zwar der temperierten Intonation entgegen, die zu hohe Lage der Quinte ist jedoch in jedem Fall als ungünstig anzusehen. Hingewiesen sei auch noch auf den starken Abfall des 8. Naturtones bei der Trompete 4, dessen störende Auswirkung bereits im Zusammenhang mit der entsprechenden Kurve der Abb. 5 erläutert war. Ein weiterer Unterschied zwischen den vier Instrumenten ist darin zu sehen, daß bei den Trompeten 1 und 2 das Oktavverhältnis $2:4$ ziemlich gut stimmt, während bei den beiden anderen Trompeten das entsprechende Intervall wegen der tiefen Lage des 4. Naturtones zu eng ist.

Die Höhe der mittleren Stimmung der einzelnen Naturtonreihen ist in Abb. 6 jeweils neben den Teildiagrammen angegeben. Aus diesen Werten kann man ablesen, wie gut die Ventile einzeln oder als Kombination zueinander passen. So weisen beispielsweise bei der Trompete 1 das Ventil 1 und auch die Kombination $1 + 2$ nur eine sehr geringe Abweichung gegenüber dem Instrument ohne Ventilbetätigung auf.

Demgegenüber liegt die mittlere Stimmung bei Ventil 2 um etwa 20 cent tiefer. Ein derartiger Fehler kann nur vom Instrumentenbauer behoben werden, indem er den Stimmzug des 2. Ventiles durch einen kürzeren ersetzt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß sich durch diese Maßnahme auch die Stimmungskurven der Ventilkombinationen mit Ventil 2 nach oben verschieben. Bei den anderen Trompeten liegen die Mittelwerte dichter beieinander, bei den Instrumenten 3 und 4 beträgt die größte Differenz jeweils nur 10 cent.

Wesentlich wichtiger als der beschriebene Unterschied der Mittelwerte ist



7 Streubreiten der Kurven von Abb. 6, aufgetragen über dem Verkaufspreis der Instrumente

jedoch die Ausgeglichenheit der Stimmungskurven für die einzelnen Ventilkombinationen. Um dieses Qualitätskriterium zu veranschaulichen, ist in Abb. 7 für die einzelnen Ventilkombinationen der jeweilige Streubereich eingetragen, der sich aus der Differenz des höchsten und des tiefsten Wertes einer jeden Kurve ergibt. Der Übersichtlichkeit halber sind die den Ventilkombinationen zugeordneten Punkte durch eine Linie verbunden. Wie man sieht, entspricht bei der Trompete 1 der besonders ausgeglichenen Kurve für das 2. Ventil eine Streubreite von nur 7 cent, während die Schwankungen bei Verwendung des 1. Ventiles etwa 25 cent betragen. Die anderen Instrumente weisen insgesamt weit ungünstigere Werte auf; dabei ist bemerkenswert, daß jeweils der Streubereich für die Naturtonreihe ohne Ventilbetätigung am größten, für die Ventilkombination $1 + 2$ dagegen am kleinsten ist.

Schlußbetrachtungen

Das beschriebene Verfahren zur objektiven Messung der Naturtonfrequenzen bietet nicht nur die Möglichkeit, die Qualität der Stimmung zu beurteilen, sondern gestattet darüber hinaus auch, Angaben über die Leichtigkeit der Ansprache zu machen. Denn beim Spielen eines Blechblasinstrumentes geht der Bläser von seiner Tonhöhenvorstellung aus, die sich aus dem musikalischen Zusammenhang ergibt. Er versucht, diese Frequenz zu erreichen, indem er Ansatz und Lippenspannung zuvor entspre-

chend einstellt. Setzt der Ton mit der erwarteten Frequenz ein, empfindet der Musiker die Ansprache als gut. Muß er dagegen die Tonhöhe nachträglich durch Verändern der Lippenspannung korrigieren, bezeichnet er die Ansprache als schlecht. Das bedeutet, daß die Ansprache eines Instrumentes um so besser ist, je ausgeglichener die objektive Stimmungskurve verläuft. Außerdem beurteilt ein Musiker die Ansprache als um so besser, je mehr er sich an eine unbewußte Stimmungskorrektur bei bestimmten Tönen gewöhnt hat, d. h. je mehr er sich auf dem betreffenden Instrument „eingespielt“ hat.

Da sich die Lippenspannung im Gegensatz zum forte in den unteren Dynamikstufen kaum verändern läßt, ohne daß die Zuhörer die Tonhöhenschwankung bemerken, ist die Ansprache im piano besonders kritisch. Bei schlecht gestimmten Instrumenten neigen die meisten Bläser deshalb dazu, den Ton zur Erhöhung der Treffsicherheit der gewünschten Frequenz zu laut anzusetzen und dann die Lautstärke ohne Tonhöhenänderung auf das geforderte Maß zu senken [6]. Dadurch entsteht eine Akzentuierung, die dem Klangcharakter vieler piano-Stellen zuwiderläuft. Bei Instrumenten mit ausgeglichener Stimmung sprechen dagegen auch leise Töne sicher an; unter diesen Gesichtspunkten kann man aus den Abb. 6 und 7 ablesen, daß die Ansprache bei den Trompeten 1 und 2 besser ist als bei den Instrumenten 3 und 4.

Abschließend möchten die Verfasser der Forschungsgemeinschaft Musikinstrumente e. V. in der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen für die finanzielle Unterstützung während der Entwicklung des Meßverfahrens ihren aufrichtigen Dank aussprechen. Darüber hinaus sei dem Geschäftsführer der Forschungsgemeinschaft, Herrn Dr.-Ing. G. Zimmermann, für die Vermittlung der Versuchsinstrumente herzlich gedankt.

Schrifttum

- [1] K. Wogram: Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten, Diss. TU Braunschweig 1972, Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main.
- [2] W. Krüger: Objektive Untersuchungsmethoden bei Metallblasinstrumenten, Das Musikinstrument 17 (1968) S. 459.
- [3] D. W. Martin: A Physical Investigation of the Performance of Brass Musical Wind Instruments, Diss. Univ. Illinois 1941.
- [4] J. Backus u. T. C. Hundley: Harmonic Generation in the trumpet, Journ.Ac.Soc.Am. 49,2 (1971) S. 509.
- [5] M. Vogel: Die Intonation der Blechbläser, Düsseldorf 1961.
- [6] K. Dekan: Auswertung von musikalischen Dynamikbereichen bei verschiedenen Blechblasinstrumentenspielern und die Klangfarbenänderungen bei piano, mezzoforte und forte. XI. Kongreß der IMS, Kopenhagen 1972.