

Klaus Wogram, Braunschweig

## **Eine einfache akustische Meßmethode zur Beurteilung und Verbesserung von Intonation und Spielqualität bei Blechblasinstrumenten**

### **1. Einleitung**

Bei den Blechblasinstrumenten erfolgt die Tonerzeugung im Gegensatz zu allen anderen konventionellen Musikinstrumenten nicht durch ein dem Instrument zuzuordnenden Bestandteil, sondern durch die Vibration der Lippen des Bläusers /1/. Damit wird das musikalisch akustische Resultat des Spieles aber in sehr hohem Maße durch die Eigenschaften des Bläusers hinsichtlich seiner Physiognomie als auch seiner musikalischen Vorstellungen geprägt. Dennoch gibt es physikalische Eigenschaften des Instrumentes, die für nahezu alle Bläser die gleiche Bedeutung haben und ihr Spiel auf dem Instrument maßgeblich beeinflussen. Diese Eigenschaften zu erkennen und zu beurteilen ist eine wesentliche Aufgabe des Blechblasinstrumentenherstellers, der dem Bläser als Kunden ein ihm entsprechendes Instrument zur Verfügung stellen möchte.

Als wichtigste Qualitätsmerkmale eines Blechblasinstrumentes gelten neben den mechanischen Eigenschaften und dem Erscheinungsbild der Klang, die Ansprache, die Intonation und die Modulationsfähigkeit /2/. Aufgrund der Tonerzeugung durch die schwingenden Bläserlippen wird der Klang überwiegend durch den Spieler selbst bestimmt; der Einfluß des Instrumentes ist hier relativ gering. Natürlich liefern unterschiedliche Mensuren auch unterschiedliche Klangfarben. Doch ein Vergleich ist nur bei einem einzigen Spieler zulässig, zumal der Klang bei Spieler A auf einem Instrument weiter Bauart sehr viel schärfer klingen kann als der Klang bei Spieler B auf einem Instrument viel engerer Bauart. Es erscheint deshalb nicht sinnvoll, die klanglichen Resultate eines Spiels auf Blechblasinstrumenten objektiv und damit spielerunabhängig beurteilen zu wollen.

Im nachfolgenden wird ein einfache Meßsystem beschrieben, das den Instrumentenmacher sowie jeden anderen an dieser Materie Interessierten in die Lage versetzt, diejenigen wichtigsten musikalisch akustischen Parameter von Blechblasinstrumenten zu messen, die für alle Bläser Gültigkeit besitzen. Die Kenntnis der damit gewonnenen Resultate kann darüberhinaus auch dazu verwendet werden, die Gründe für ein fehlerhaftes Spiel oder eine unbefriedigende Klangentwicklung zu finden. Schließlich wird ein in das System integriertes Korrekturprogramm vorgestellt, das konkrete Vorschläge einer Mensurkorrektur liefert, um die Intonation und die Ansprache von Blechblasinstrumenten zu verbessern.

### **2. Anforderungen an das Meßsystem**

Die im Instrumentenrohr eingeschlossene Luftsäule unterstützt die Lippenschwingungen durch ihre eigenen Resonanzen und strahlt den durch diese Resonanzen gefilterten Klang in den Außenraum ab. Die Lage der einzelnen Resonanzfrequenzen zueinander bestimmt schließlich die Filterwirkung und damit die Ansprache des Instrumentes. Zur Beurteilung der musikalisch akustischen Qualitätsmerkmale ist es deshalb notwendig, diese Resonanzeigenschaften meßtechnisch zu bestimmen.

Die Reaktion des Instrumentes auf ein von außen in das Mundstück eingeleitetes Schallsignal gleitender Frequenz stellt die Resonanzkurve des Instrumentes dar, die als erstes gemessen werden sollte. Aus dieser Resonanzkurve lassen sich dann weitere Sekundärmerkmale ableiten, die in unmittelbarer Form die Intonation und die Ansprache bestimmen. Es sind dies die Amplitude (Stärke)  $|Z|$  der einzelnen Resonanzen, ihre Resonanzgüte "Q" und ihre Frequenzlage bezogen auf die einzelnen Frequenzen der verwendeten musikalischen Stimmungsskala, die als Stimmungsfehler oder einfach Intonation "i" bezeichnet wird. Im allgemeinen wird die gleichmäßig temperierte Stimmungsskala mit  $a^1 = 440$  Hz verwendet.

Wir wissen, daß der Mensch niemals in der Lage ist, eine Leistung beliebiger Art in genau gleicher Weise zu reproduzieren. Das gilt natürlich auch für einen Musiker, dessen Klangresultat bei Wiederholung innerhalb bestimmter Grenzen schwankt. Um aber ein reproduzierbares Ergebnis einer Beurteilung zu erhalten, ist es nun notwendig, eine Vielzahl von Versuchen mit Musikern zu unternehmen, und die Ergebnisse zu einem Mittelwert zusammenzufassen. Der damit verbundene Aufwand ist nicht zu unterschätzen und läßt den Wunsch nach einer objektiven Methode laut werden, die ohne die Unterstützung durch die betroffenen Musiker auskommt. Natürlich muß sich das objektive Ergebnis an dem Mittelwert aus den subjektiven Ergebnissen bei Spielerbeteiligung orientieren, denn sonst hätten die Meßergebnisse keine praktische Bedeutung /3/. So muß auch sichergestellt sein, daß die Methode die Prüfung aller Blechblasinstrumente zuläßt, d.h. daß sowohl der Tonumfang als auch die Ankopplung an die verschiedenen Mundstücke sehr unterschiedlicher Form und Größe berücksichtigt wird.

Schließlich sollte ein derartiges Meßsystem klein und schnell sein, um unnötige Wartezeiten zu vermeiden. Auch sollte es in der Lage sein, die wesentlichen Erkenntnisse der musikalisch akustischen Forschung der Vergangenheit einzubeziehen, auch wenn sie dem Bediener nicht in allen Details präsent sind. Es bietet sich deshalb an, dem System eine eigene "Intelligenz" zu verleihen, die sich durch eine Anbindung an einen Computer erreichen läßt. Darüberhinaus sollte der Meßplatz für Blechblasinstrumenten mit beliebigen Mundstücken verwendet werden können, um insbesondere den Einfluß dieses Bestandteiles zu berücksichtigen, der häufig in sehr unterschiedlicher Form und Größe von den Blechbläsern verwendet wird.

### **3. Allgemeine Systembeschreibung**

Das Meßsystem besteht aus einem Meßkopf, der an das Mundstück des zu untersuchenden Blechblasinstrumentes angekoppelt wird sowie einem Meß- und Analyseprogramm, das in einem Personal Computer (PC) den Meßkopf über eine eingebaute Meßkarte mit digitalem Signalprozessor (DSP) ansteuert. Das Blockschaltbild ist in Abb. 1 dargestellt.

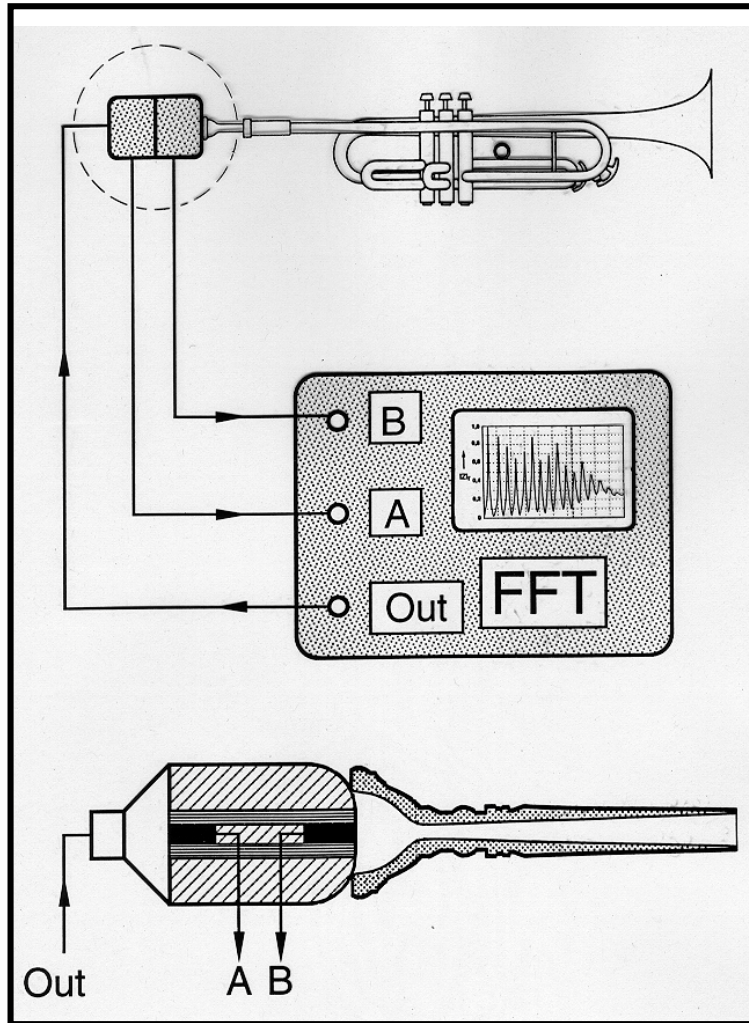


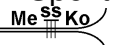




Abb. 1: Blockschaltbild des Meßaufbaus 

Das im PC geladene Programm  generiert ein elektrisches Meßsignal, das alle interessanten Frequenzkomponenten beinhaltet, die für die Aufnahme der Resonanzkurve benötigt werden. Dabei stehen zwei verschiedene Signale zur Verfügung, ein bandbegrenztes Rauschen und ein schneller Sweep, der alle Frequenzen in dem gewählten Meßbereich nacheinander durchläuft. Dieses am häufigsten verwendete sog. Chirpsignal ist sehr kurz und ermöglicht damit eine Messung in nur wenigen Sekunden. Es wird einem kleinen Lautsprecher in dem Meßkopf zugeleitet, der über einen speziellen Adapter mit vielen kleinsten Kapillarröhrchen, dem sog. Drahtleitungsadapter, das Schallsignal in dem Mundstückskessel erzeugt /1/. Vor und hinter der "Drahtleitung" befinden sich Kontrollmikrofone, die die Schalldrucksignale aufnehmen. Ihre Zeitsignale werden dem Rechner über das DSP-board zugeleitet, der sie in den Frequenzraum mittels FFT (Fast Fourier Transformation) umrechnet. Der Quotient dieser beiden Spektren stellt die Eingangsimpedanz- oder Resonanzkurve dar, die mittels der  -Software weiter analysiert wird, so daß schließlich die Resonanzamplitude  $|Z|$ , die Resonanzgüte  $Q$  und die Intonation  $i$  zahlenmäßig für jede Instrumentenresonanz vorliegen.

Der "Drahtleitungsadapter" weist an der Kontaktstelle zum Mundstück eine halbkugelige Form auf, die selbst bei leichtem Schiefsitz des Mundstückes für die notwendige Dichtigkeit sorgt. Es kommen bis zu 4 verschiedene Adapter für die breite Palette der Blechblasinstrumente zur Anwendung, bei denen die Durchmesser der halbkugeligen Stirnfläche derart gewählt sind, daß die Adapter eine bestimmte Eindringtiefe in den Kessel der verwendeten Mundstücke bewirken. Durch die Auswahl bestimmter Adapter können auch die verschiedenen Ansatztechniken der Bläser von druckstark bis drucklos simuliert werden, da hier das effektive Kesselvolumen durch das unterschiedlich tiefe Eindringen der Lippen verändert wird. Mit der Eindringtiefe verändern sich aber auch die akustischen Eigenschaften der Mundstücke und damit die Resonanzeigenschaften des kompletten Blechblasinstrumentes /4/.

Transformiert man die Resonanzkurve über die inverse FFT zurück in den Zeitbereich, dann erhält man die Impulsübertragungskurve oder kurz die Impulsantwort "I". Sie zeigt im Zeitbereich auf, wie sich ein akustischer Impuls (Knall) in der Luftsäule innerhalb des Instrumentenrohres ausbreitet und wie sehr er durch Querschnittssprünge oder Verarbeitungsmängel in seiner Form verändert wird. Diese Darstellung eignet sich insbesondere zur Lokalisation von Störungen wie Undichtigkeiten, Unstetigkeiten oder Fremdkörpern im Instrumentenrohr.

Die gesamte Ablaufsteuerung des Meßprozesses sowie die weitere Auswertung und Speicherverwaltung wird im PC von dem Steuerprogramm  übernommen, das über Maus und Tastatur bedient wird. Darüberhinaus können die gemessenen Intonationsdaten in einem weiteren Programmmodul dazu verwendet werden, die Mensur des untersuchten Blechblasinstrumentes zu überarbeiten, um eine für den Spieler günstigere Stimmung zu erlangen.  besteht also aus einem Meß- und einem Korrekturteil.

#### **4. Anwendung des Meßsystems anhand eines Beispiels**

Es soll die Anwendung der Meß- und Korrekturmethode an einem Beispielinstrument, einer Perinet-B-Trompete mit vollständig eingeschobenen Stimmzügen, demonstriert werden.

Zunächst wird der für die Diskantinstrumente erforderliche Drahtleitungsadapter "S" (Sopranoinstrumente) in den Meßkopf eingesetzt und das Instrument "Trompete" aus dem Auswahlmenü ausgewählt. Damit ist bereits die Grundeinstellung des Systems in den Parametern Frequenzbereich, Anzahl der Mittelungen, Art des Anregungssignales, Untere Frequenzgrenze für die Maximumsuche, die Art der Bezugstonskala sowie die Referenzfrequenz für  $a^1$  festgelegt. Diese einzelnen Parameter lassen sich auch manuell verändern, doch scheint eine Vorgabe durch Anwahl des Instrumententyps der schnellste und einfachste Weg zu sein (Abb. 2). Der Frequenzbereich läßt sich ansonsten von 500 Hz bis 10 000 Hz einstellen, die Anzahl der Mittelungen von 1 bis 256, die Bezugstonskala von  $a^1 = 415$  Hz bis 450 Hz, die Stimmungscharakteristik zwischen temperiert und rein (schwebungsfrei), das Anregungssignal zwischen Rauschen und Chirp und die untere Grenzfrequenz auf einen beliebigen Wert.

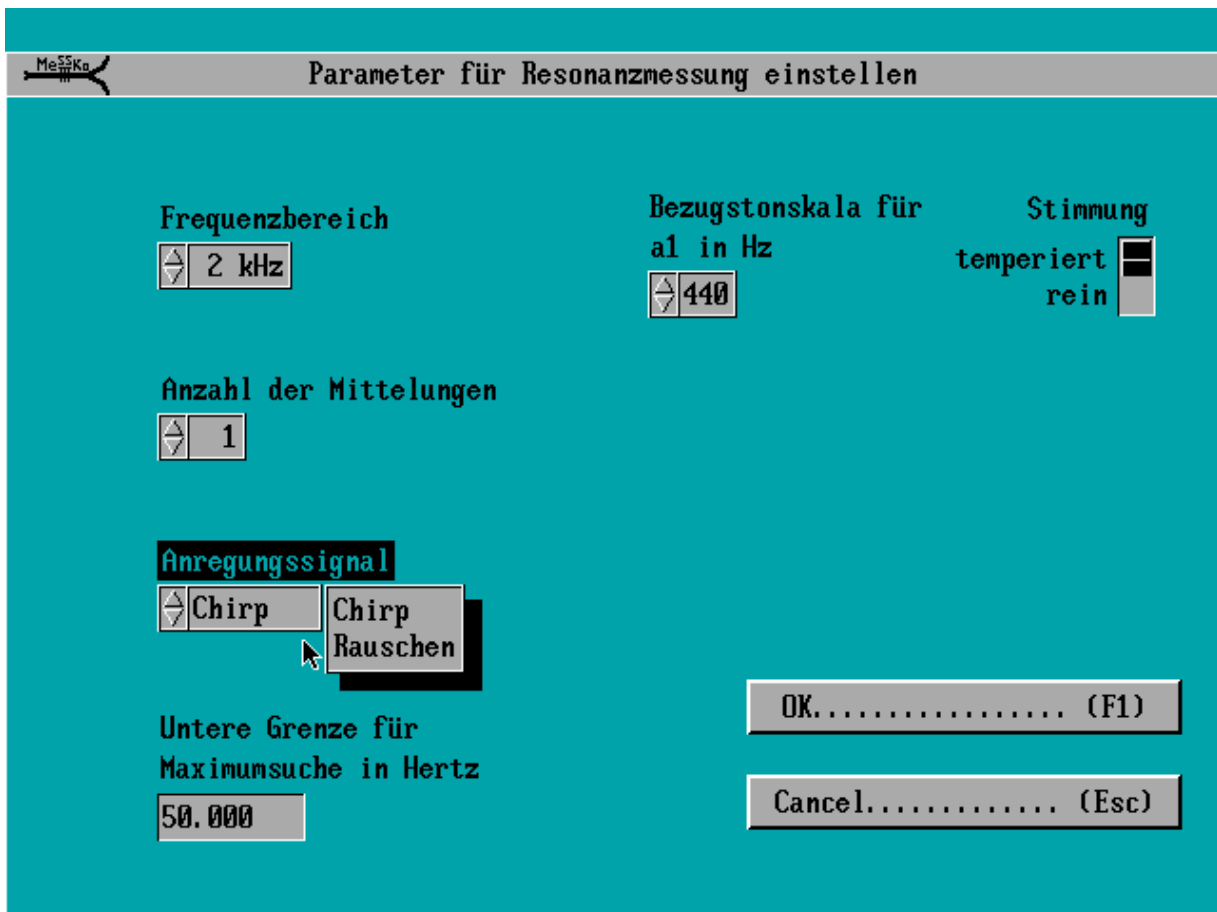


Abb.2:  Parameterliste für die Messung

Nach diesem ersten Schritt springt das Programm in die Darstellung der **Resonanzkurve** und beginnt mit der schnellen Messung. Nach ca. 1 Sekunde liegt das Ergebnis entspr. Abb. 3 vor. Die Bezeichnung hinter "Trompete:" war vorher per Tastatur eingegeben, um eine genauere Kennzeichnung des Instrumentes zu erhalten. Man erkennt, daß das Instrument eine starke Resonanzwirkung bei den tiefsten 11 Resonanzen bis zu einer Frequenz von ca. 1300 Hz zeigt, und daß das Maximum der Resonanzamplitude bei ca. 900 Hz liegt. Dies ist der Bereich, in dem das Mundstück seine tiefste Resonanz aufweist.

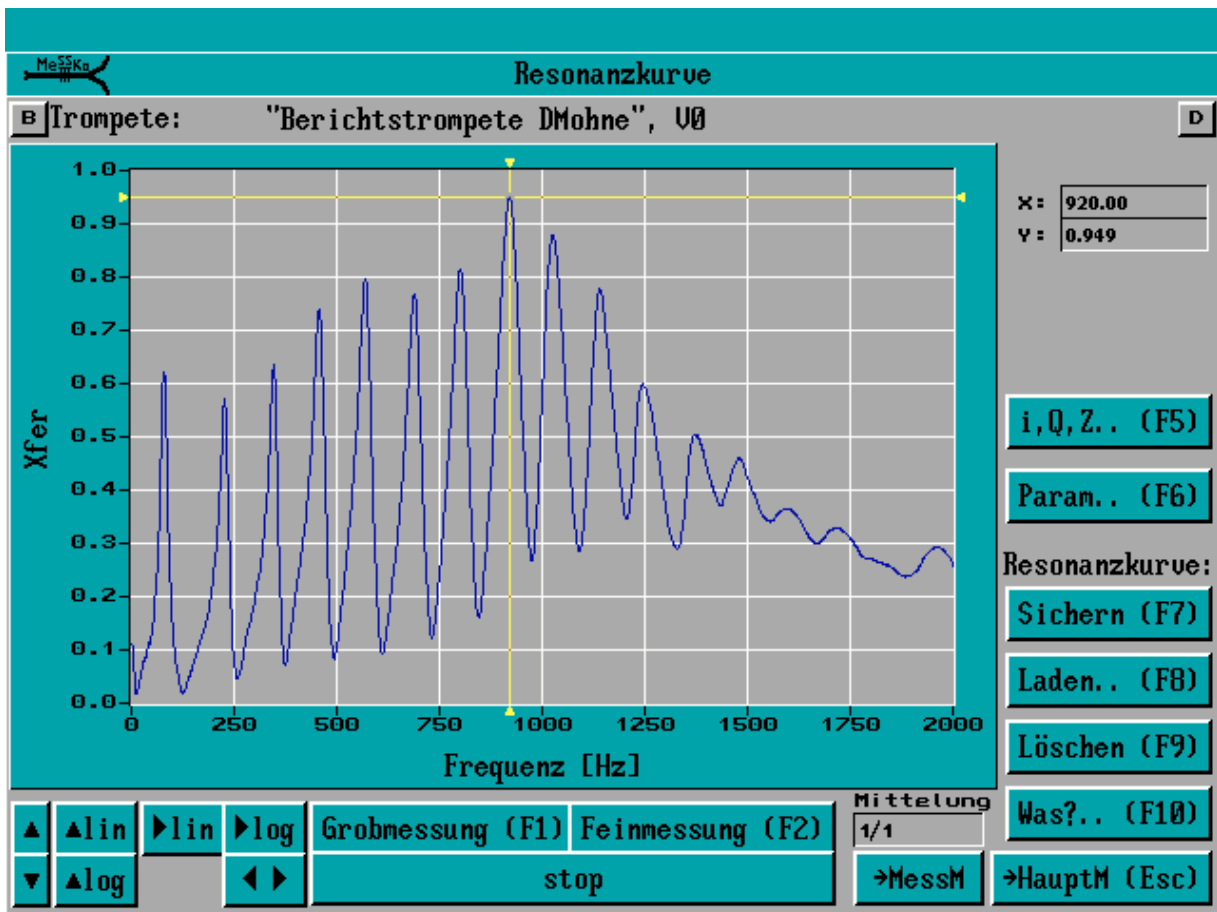


Abb.3: Resonanzkurve der Perinet-B-Trompete

Die Resonanzkurvendaten können nun gesichert (abgespeichert) oder gelöscht werden, oder es können weitere Kurven dazugeladen werden, um einen grafischen Vergleich zu anderen Meßwerten zu bekommen. Man kann auch eine Dauermessung (F1) einschalten, um z.B. die Veränderungen der Resonanzkurve durch Manipulationen an dem Instrument quasi in Echtzeit zu betrachten.

Die Darstellung der Resonanzkurve kann in weiten Bereichen geändert werden, wobei lineare und logarithmische X- und Y-Skalen zur Verfügung stehen. Auch eine Umstellung von 3 auf 2 Dekaden bei logarithmischer Frequenzdarstellung ist möglich.

Durch Anwahl des Feldes "i, Q, Z.. (F5)" per Maus oder Tastatur springt das Programm zur Grafik entspr. Abb. 4, in der alle Meßergebnisse in grafischer Form als Diagramme dargestellt werden. Will man die Ergebnisse der Auswertungen lieber als Zahlenwerte in einer Tabelle betrachten, so kann man sie mit "Tab.(F6)" anwählen.

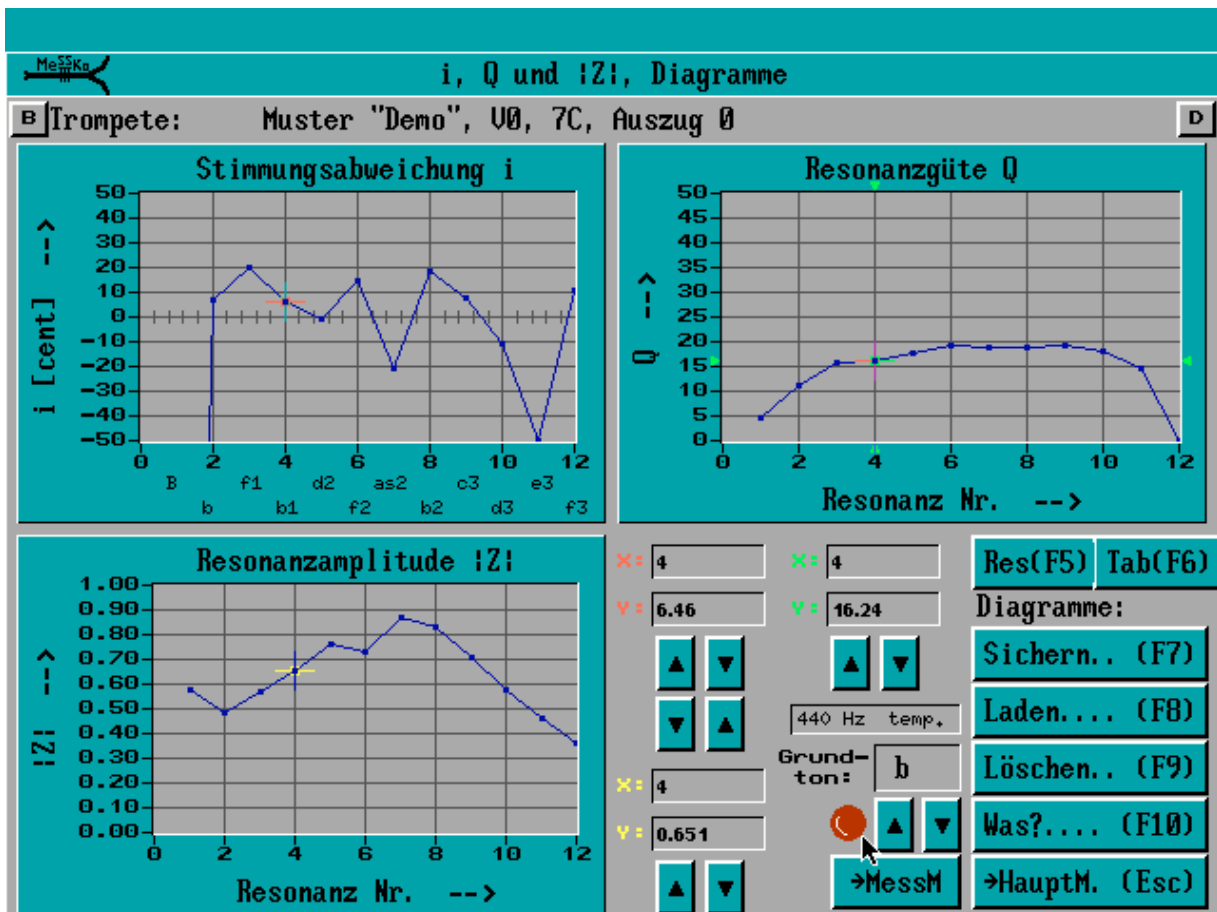



Abb.4:  Auswertung für Stimmung  $i$ , Resonanzgüte  $Q$  und Resonanzamplitude  $|Z|$  der Perinet-B-Trompete

Das linke obere Diagramm zeigt die **Stimmungskurve** des Instrumentes, d.h. die Abweichungen der Frequenzen der tiefsten 12 Resonanzen von denen der Bezugstonskala in cent, wobei 100 cent dem Intervall eines temperierten Halbtones entsprechen. Auf der X-Achse sind neben den Ordnungszahlen auch die Tonbezeichnungen in deutscher Schreibweise wiedergegeben, wobei die Tonbezeichnung klingend, nicht transponiert angegeben ist. Die Abweichung der 1. Resonanz von der Referenztonskala ist wie bei allen Trompeten derart groß (-600 cent), daß sie nicht in sinnvoller Weise dargestellt werden kann, sie spielt aber auch keine Rolle beim praktischen Musizieren.

Man erkennt, daß das Instrument durch vier deutliche Stimmungsfehler gekennzeichnet ist:

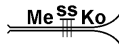
1. Die mittlere Stimmung liegt bei ca. 3 cent, was eindeutig zu tief ist (üblich ist ein Wert von 20 cent!). Man kann mit dieser Trompete zwar in 440 Hz-Stimmung spielen, nicht jedoch bei 443 Hz. Dazu müßte man den Stimmzug weiter einschieben, was aber nicht möglich ist.
2. Die 3. Resonanz (Ton  $f^1$ ) ist gegenüber der mittleren Intonation zu hoch.
3. Die 5. Resonanz (Ton  $d^2$ ) ist gegenüber der mittleren Intonation zu tief.
4. Die 6. Resonanz (Ton  $f^2$ ) ist gegenüber der mittleren Intonation zu hoch.

Das Diagramm für die **Resonanzgüte**  $Q$  ist rechts oben in Abb. 4 zu sehen. Die Werte ergeben sich aus dem Quotienten aus den einzelnen Resonanzfrequenzen und ihren

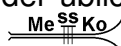
sog. Halbwertsbreiten  $\Delta f$ , das sind die Breiten der Resonanzkurven um die Resonanzen herum, die sich bei Absenkung der Amplituden auf 70% der Spitzenwerte ergeben. Für die 4. Resonanz liegt dieser Wert hier bei  $Q_4 = 18,18$  und ergibt sich aus der Resonanzfrequenz  $f_4$  mit 467,35 Hz und der Halbwertsbreite  $\Delta f_4$  von 25,71 Hz zu  $467,35/25,71 = 18,18$ .

Je höher die Q-Werte ausfallen, desto besser ist die Resonanzwirkung, und umso leichter ist die Ansprache! Noch wichtiger für die Ansprache ist aber ein gleichmäßiger Verlauf der Q-Kurve, denn er zeigt dann eine gleichbleibende Ansprache über dem gesamten Spielbereich, so daß sich der Bläser nicht mit seinem Ansatz umstellen muß.

Links unten in Abb. 4 sieht man den Verlauf der **Resonanzamplituden** ( $|Z|$ -Werte) über der Ordnungszahl. Diese Kurve erhält man auch, wenn man die Resonanzspitzen der Resonanzkurve aus Abb. 3 miteinander verbindet; auch sie liefert einen Hinweis auf die Ansprache des Instrumentes. Je höher die Resonanzamplituden, umso besser! Aber auch hier spielt die Ausgeglichenheit der Kurve eine große Rolle, denn nur ein gut verarbeitetes und gut geformtes Instrumentenrohr kann eine glatte Amplitudenkurve ohne Unstetigkeiten aufweisen! Bei dem Beispielinstrument muß der ungünstige Knick bei der 6. Resonanz angemerkt werden, der auf eine Störung im Rohrverlauf hindeutet.

Im rechten unteren Quadranten der Abb. 4 sind die Bedienelemente für die Diagramme zusammengestellt. Hier findet man Möglichkeiten zur Veränderung der Diagrammskalen sowie die Einstellungen für die drei den Diagrammen zugeordneten Zeigern (Cursor). Ebenso wieder die Befehlsknöpfe für Speicherung, Löschung usw. Hat man z.B. ein besonders kurzes B-Instrument untersucht, das eine mittlere Stimmung von +60 cent aufweist, so findet  mit seinem Fangbereich von  $\pm 50$  cent die Resonanzfolge für den Ton h bei -40 cent, was im Diagramm unten rechts unter "Grundton" angezeigt wird. Man kann nun diesen Grundton von h auf b umstellen, wenn man die übliche B-Stimmung zur Anzeige bringen will. Dies erleichtert z.B. den Vergleich der Meßergebnisse für verschiedene Instrumente, die sich aber in der Grundstimmung deutlich unterscheiden.

Nach Rücksprung in das "Meßmenü" kann nun das **Impulsechogramm** gemessen werden. Das Ergebnis für das Beispielinstrument ist in Abb. 5 wiedergegeben. Es zeigt links bei  $t=0$  den Eingangsimpuls am Mundstücksrand sowie rechts bei ca. 8 ms das Hauptecho, das von der Stürze des Instrumentes zurückgeworfen wird.

Auf der Zeitstrecke zwischen Eingangsimpuls und Ausgangsimpuls erkennt man eine wellige Linie, die durch kleine Störungen im Instrumentenrohr verursacht wird. Es sind zwei Zeiger (Cursor) als vertikale Linien sowie ein Kreuzcursor in Abb. 5 vorhanden, die in der Originaldarstellung, wie bei allen anderen Diagramme auch, in verschiedenen Farben dargestellt werden. Ihre Positionen sind am rechten Bildrand wiedergegeben. Ein Linienzeiger ist auf einen Wellenberg bei 5,16 ms, der andere auf den nächsten Wellenberg bei 6,41 ms gestellt. Daraus ergibt sich eine Wellenlänge von  $\Delta x = 1,25$  ms; oder - mit der üblichen Schallgeschwindigkeit umgerechnet - von 212,5 mm. Dieser Wert wird von  bereits errechnet und in dem Impulsdiagramm entspr. Abb. 5 rechts unten aufgelistet. Berücksichtigt man die Gesamtlänge des Instrumentes von ca. 1320 mm, so errechnet sich das Verhältnis zu  $1320/212,5 = 6,21$ . Hieraus resultiert die bereits in der Resonanzkurve diagnostizierte Beeinträchtigung der Resonanzen im Bereich der 6. Ordnung.



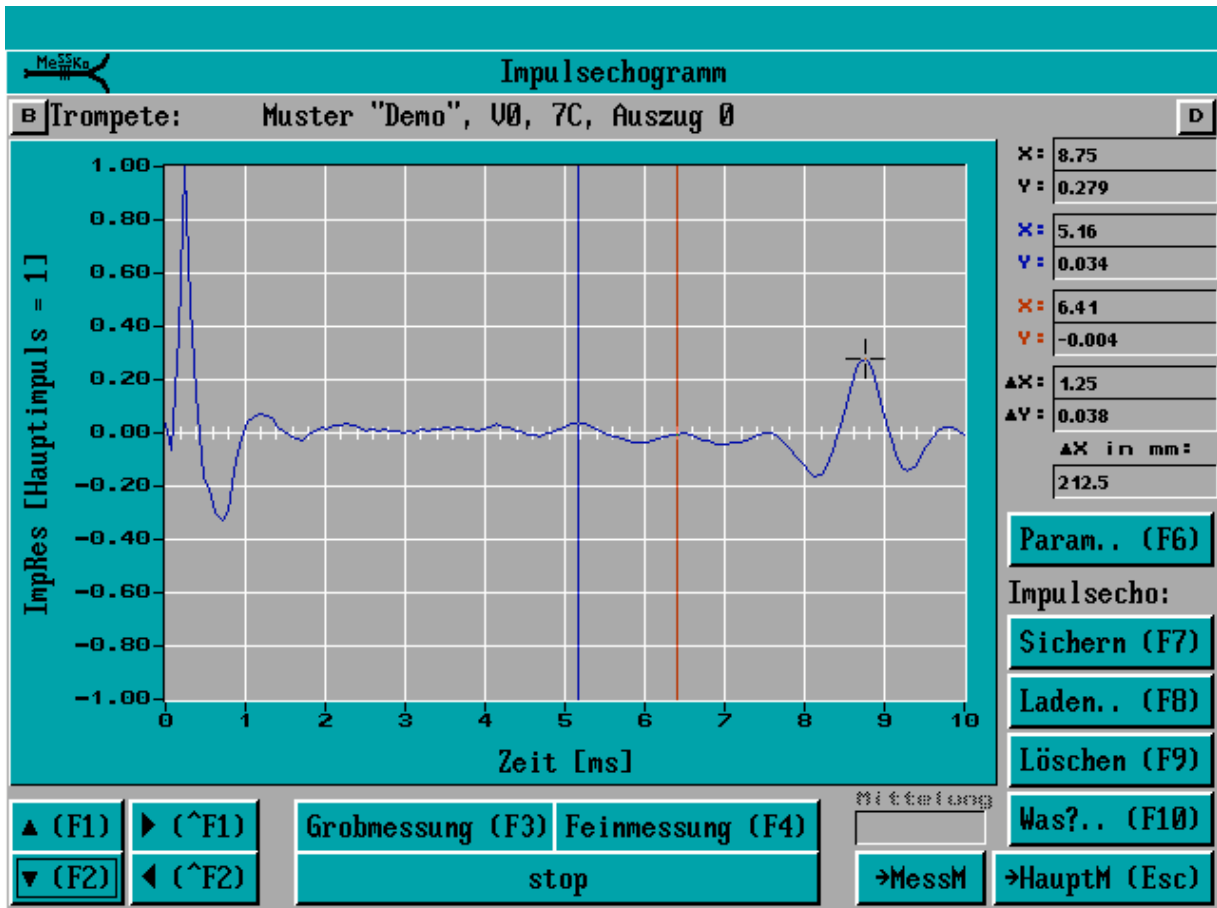


Abb 5: Impulsechogramm der Perinet-B-Trompete

Mit den Linienzeigern lassen sich die Positionen von Störechos recht genau ermitteln. Öffnet man z.B. die Wasserklappe der untersuchten Trompete und zeichnet das Impulsechogramm auf, dann erhält man das Ergebnis in Abb. 6. Man erkennt wieder den Eingangsimpuls auf der linken Seite, jedoch im weiteren Verlauf eine deutliche Störung in Form eines negativen Echos bei ca. 3 ms. Weiter rechts erkennt man zusätzliche Echos, die sich aus Mehrfachreflexionen des Impulses zwischen der offenen Wasserklappe und der Stürze (bei ca. 8 ms, siehe auch Abb. 5) ergeben. Legt man wieder den linken Zeiger auf die Startflanke des Eingangsimpulses und den rechten Linienzeiger auf die Startflanke des negativen Störechos, so ergibt sich daraus ein Abstand von 478,1 mm (rechts unten). Dieser Wert gibt den Abstand der Wasserklappe vom Mundstücksrand wieder.

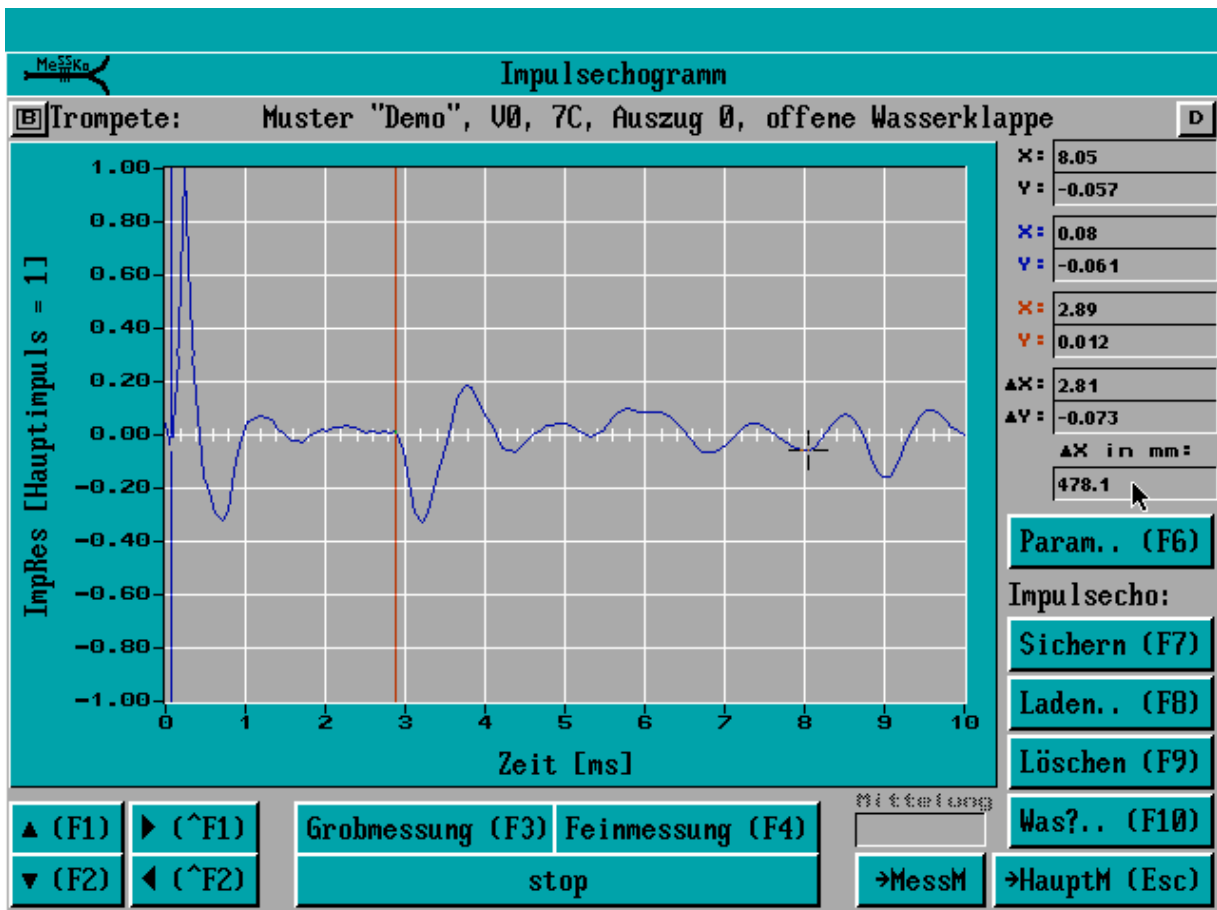


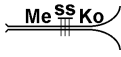
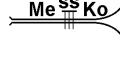
Abb 6: Impulsechogramm der Perinet-B-Trompete bei geöffneter Wasserklappe

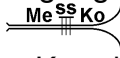
Aus der Form eines Störechos kann man auf die Art der Störung schließen. Besitzt das Störecho z.B. eine negative Startflanke, wie im Beispiel gezeigt, dann resultiert diese aus einer plötzlichen Rohrerweiterung, während eine positive Startflanke eine Rohrverengung anzeigt. Analog stellt sich ein Loch wie eine starke Erweiterung dar, und ein Rohrverschluß wie eine extrem starke Einengung. Auch wenn zwei Rohrteile ohne Stufe aneinanderstoßen, diese Rohrteile jedoch unterschiedliche Konizitäten aufweisen, dann erhält man je nach Konizitätsverhältnis unterschiedliche Störechos. Diese Zusammenhänge sind besonders wichtig für die Konstruktion von überwiegend konischen Instrumenten wie Tuben, Baritone usw. sowie bei der Intonationsverbesserung durch lokale Mensurkorrekturen.

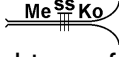
## 5. Intonationskorrektur mit

Hat man die musikalisch akustischen Werte eines Blechblasinstrumentes bestimmt, dann kann man mit dem Korrekturteil des Systems eine Verbesserung der Intonation des Prüflings vornehmen. Das System basiert auf der Tatsache, daß eine Veränderung des Durchmessers eines Rohres immer dann dazu führt, daß sich die Resonanzfrequenzen in ihren Werten verschieben, wenn der Ort der Querschnittsänderung im Bereich eines Schalldruckmaximums bzw. -minimums befindet. Wird das Rohr an der Stelle eines Maximums (Bauch) eingengt, dann erhöht sich die entsprechende Resonanzfrequenz. Beim Zusammentreffen mit einem Minimum (Knoten) wird die Resonanzfrequenz erniedrigt, ebenso bei einer Erweiterung am Knoten. Da jede Resonanz eine ihr eigene andere

Schallverteilung im Rohr aufweist, bewirkt eine Veränderung des Rohrdurchmessers an einer bestimmten Stelle eine u. U. sehr unterschiedliche Veränderung nahezu aller Resonanzfrequenzen.

Ist die Verteilung der stehenden Wellen im Resonanzfall bei dem Prüfling bekannt, dann kann man mit Hilfe des  -Programmes diejenigen Stellen suchen, die geeignet sind, die vorhandenen Intonationsmängel zu beheben. Ist die Verteilung der stehenden Wellen hingegen nicht bekannt, so muß sie durch Anwendung des  -Meßteiles gemessen werden.

Dazu wird eine sehr dünne Mikrofonsonde (3 mm Ø) von der Stürze her in das Instrument eingeführt und ein akustisches Signal mit der zuvor gemessenen Resonanzfrequenz über den Meßkopf eingespeist. Der Schalldruckpegel an der Stelle des Sondenmikrophones wird auf dem Computerdisplay als Pegelbalken angezeigt, und die Sonde so lange hin- und hergeschoben, bis das erste Maximum bzw. das erste Minimum von der Stürze aus gesehen erreicht ist. Dann wird die Eindringtiefe der Sonde abgelesen und in das Programm eingegeben. Hat man diesen Meßvorgang für 3 Maxima und 3 Minima für je 3 Resonanzen durchgeführt, dann erstellt die  -Software eine spezielle Korrekturtabelle für das untersuchte Instrument. Diese Korrekturtabelle dient als Grundlage für alle weiteren Bemühungen einer Verbesserung der Intonation durch Mensurkorrekturen.

Beim Aufruf des Korrekturteiles von  werden zunächst diejenigen Parameter abgefragt, die für eine Intonationskorrektur erforderlich sind. Wird als erstes der gemessene Intonationsverlauf für die untersuchte Trompete aufgerufen, dann erhält man eine Darstellung auf dem Bildschirm, die der der Abb. 7 entspricht.

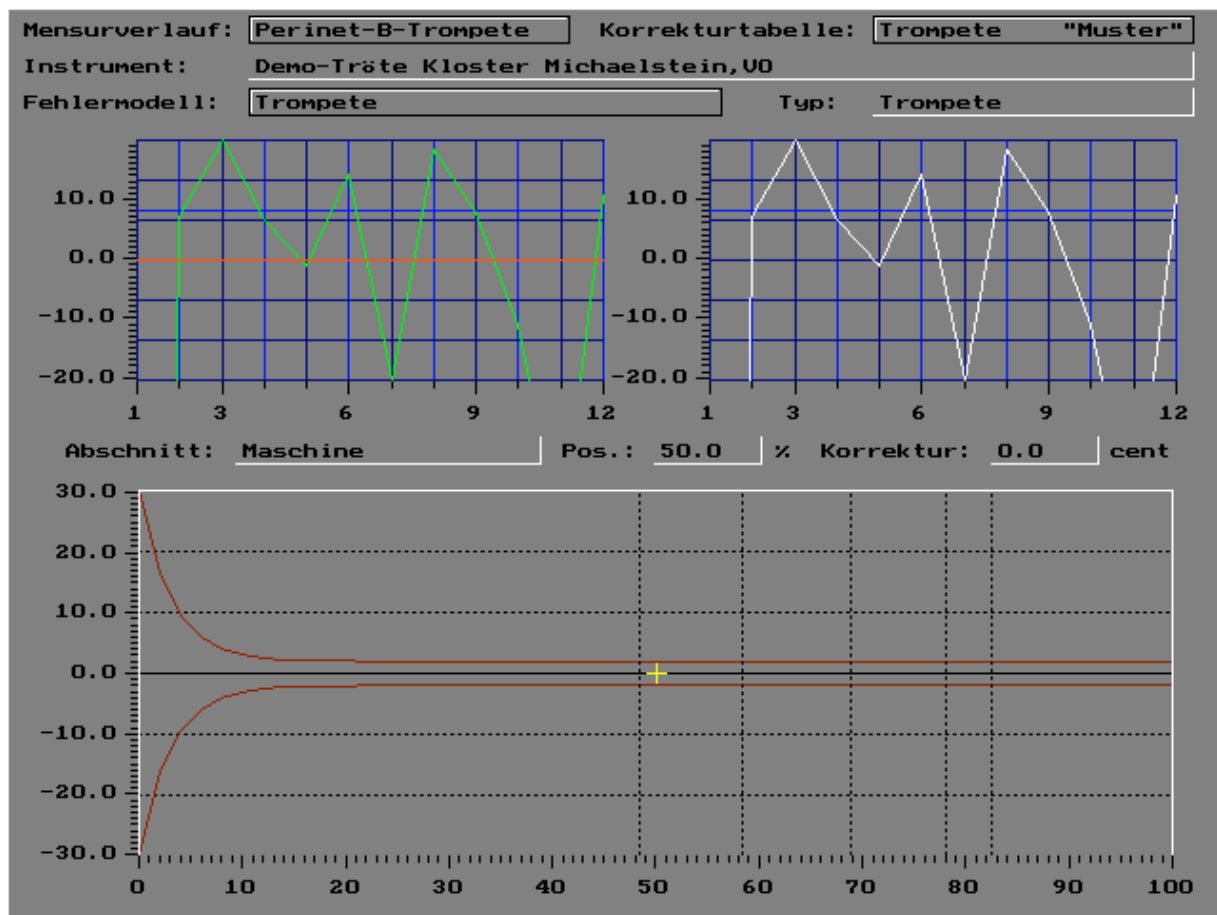


Abb. 7: Bildschirmdarstellung des Korrekturteiles von 

Das Bild besteht aus drei Diagrammen sowie einer Reihe von Informationsfeldern, die gleichzeitig als Aktivtasten für einzelne Menüs dienen. Betrachten wir zunächst die Diagramme. Oben links befindet sich das Intonationsdiagramm, in dem der Istzustand der Intonation des Prüflings über der Ordnungszahl der Resonanzen aufgetragen ist. Die Kurve wird auf dem Bildschirm grün dargestellt, hier in der Druckfassung liegt sie als schwarze durchgezogene Kurve vor. In das Diagramm ist zusätzlich eine Korrekturkurve als rote Linie (hier grau) eingetragen, die die Veränderung der Intonation bei Mensurkorrektur anzeigt. Da jetzt noch keine Mensurkorrektur angewählt worden ist, zeigt sich die Korrekturkurve als graue horizontale Linie in der Mitte des Diagrammes bei 0 cent.

Das rechte obere kleine Intonationsdiagramm zeigt die Stimmungskurve des Prüflings nach der Mensurkorrektur, jetzt also die unveränderte Kurve des linken Istzustandes.

In der unteren Bildhälfte finden wir das Korrekturdiagramm, in dem der Prüfling in gestreckter Form schematisch wiedergegeben ist. Die Stürze befindet sich links, die Mundrohrzwinde rechts. Die Y-Achse gibt das Veränderungsmaß  $\beta$  in cent wieder, und auf der X-Achse ist die Längenkoordinate in mm (wahlweise in %) aufgetragen. Der Ursprung der X-Achse liegt an der Stürze! Positive  $\beta$ -Werte deuten auf eine Erweiterung des Instrumentenrohres hin, negative Werte auf eine Einengung. In dem Korrekturdiagramm ist ein kleiner (normalerweise gelber) Kreuzcursor zu finden, der anfänglich in der Mitte des Instrumentes bei 660 mm und 0 cent angeordnet ist. Zusätzlich sind ein paar vertikale gestrichelte Hilflinien in das Korrekturdiagramm eingetragen, die die Lage der

Stoßstellen zwischen den einzelnen Instrumententeilen wie Schallstück, Maschine, Stimmzug usw. verdeutlichen.

Die Position des Kreuzcursors in dem Korrekturdiagramm ist in drei Fenstern in der Mitte des Bildes aufgelistet, wobei "Abschnitt:" die Zuordnung zu dem Instrumententeil und "Pos.:" sowie "Korrektur:" die X- bzw. Y-Achsenwerte in dem Diagramm darstellen. Ganz oben sind in dem Computerbild die Namen der gewählten Dateien aufgelistet. So ist unter "Mensurverlauf:" derjenige der untersuchten Perinet-B-Trompete ausgewählt, der wiederum zu der Eintragung der Hilfslinien im Korrekturdiagramm führt. Diese Datei ist editierbar und kann für jedes beliebige Instrument eingerichtet werden. Auch die Datei für die "Korrekturtabelle:" ist editierbar; hier ist die gemessene Korrekturtabelle (Verteilung der stehenden Wellen) für den Prüfling ausgewählt.

In der zweiten Zeile finden wir das Fenster für den Namen bzw. die Beschriftung für den Prüfling, wie sie bei der Messung eingegeben worden sind. In der dritten Zeile nun finden wir zwei Fenster für die Auswahl des Fehlermodelles sowie dem Instrumententyp. Werden hier keine speziellen Werte eingegeben, so stellt sich  $\overbrace{\text{Me}^{\text{SS}}\text{Ko}}$  automatisch auf denjenigen Typ ein, der sich aus den Meßwerten ergibt, hier also "Trompete". Die Bedeutung des Fehlermodelles wird später erläutert.

Verschiebt man nun den Kreuzcursor mit der Maus, so sucht sich  $\overbrace{\text{Me}^{\text{SS}}\text{Ko}}$  automatisch die Korrekturwerte aus, die sich aus der Stärke der Korrektur (Y-Wert des Kreuzcursors) und der Lage der Korrektur (X-Wert des Kreuzcursors) entsprechend der Korrekturtabelle errechnen lassen. Für jede Resonanz wird dieser Wert in das obere linke Intonationsdiagramm eingetragen, und die veränderte Intonationskurve rechts oben angezeigt. Im günstigsten Fall hätte die Korrekturkurve den an der horizontalen Achse gespiegelten Verlauf der Intonationskurve im Istzustand, doch ist ein derartiger Vergleich nicht so leicht durchführbar. Um eine gute Übereinstimmung der Korrekturkurve mit der Intonationskurve auf visuelle Weise zu ermöglichen, ist eine gespiegelte Darstellung der Korrekturkurve gewählt; positive Werte entsprechen also einer Absenkung!

Ist man mit dem System noch nicht sehr vertraut, so kann man die Suche nach einer optimalen Korrekturstelle auch dem  $\overbrace{\text{Me}^{\text{SS}}\text{Ko}}$ -Programm überlassen. Das Programm wird dann eine Farbgrafik in das Korrekturdiagramm zeichnen, in der die vernünftigen Positionen in unterschiedlichen Rottönen dargestellt sind. In der für diesen Artikel gewählten Schwarz/weiß-Darstellung ergibt sich die Abb. 8, in der die sinnvollen Korrekturbereiche in Grautönen abgesetzt sind, und innerhalb dieser Bereiche die Qualität mit zunehmender Helligkeit steigt. In jedem sinnvollen Korrekturbereich existiert ein Optimum, das als dunkles Quadrat eingetragen ist. Bei 1041,1 mm und einer Absenkung um -17,1 cent befindet sich das absolute lokale Optimum, auf das der Kreuzcursor gestellt worden ist. Die dazugehörige Korrekturkurve ist links oben, und das Ergebnis für die korrigierte Intonation rechts oben eingetragen.

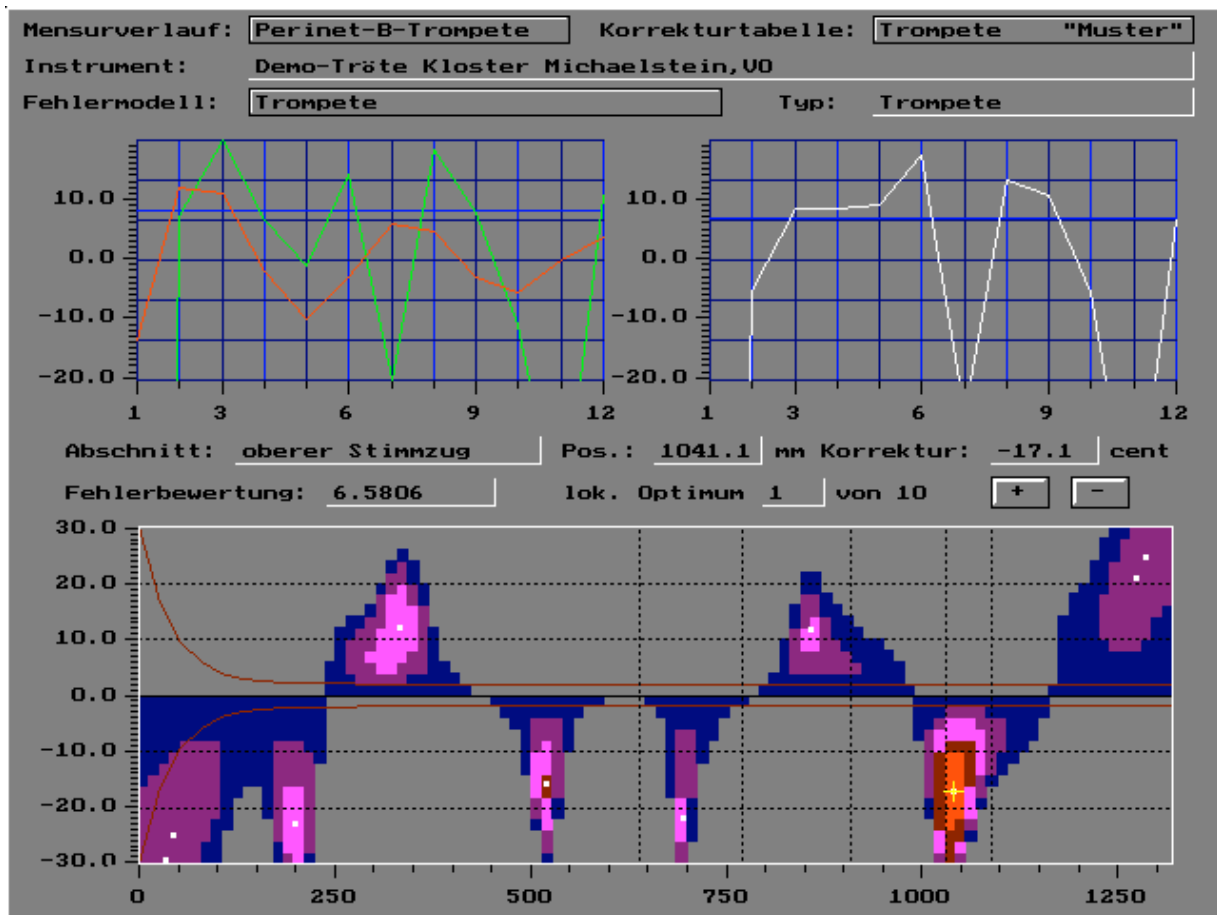





Abb. 8:  Korrekturvorschlag

Bei dem Ausgangszustand der Intonation ergab sich ein gewichteter Fehler von 11,78 cent (siehe Abb. 7), nach der nun angewählten Korrektur würde dieser Fehler nur noch 6,58 cent betragen (Abb. 8). Der gewichtete Fehler wird für jeden Instrumententyp auf eine andere Art und Weise errechnet, wobei das Fehlermodell (3. Zeile) die spezifischen Besonderheiten der Instrumente beinhaltet. Bei der Berechnung der Korrekturmöglichkeiten geht  nun so vor, daß es die Intonationsrestfehler für ca. 3000 Korrekturstellen entlang der Instrumentenachse berechnet und in Klassen sortiert. Diese Klassen werden dann im Korrekturdiagramm als Felder unterschiedlicher Rot- bzw. Grauabstufung angezeigt.

Wir wollen uns nun mit der angebotenen Korrektur des Beispielinstrumentes bei 1041,1 mm befassen und genauere Details der Mensuränderung errechnen. Dazu bestätigen wir die Korrektur an der Stelle des Cursors und erhalten nun im Korrekturdiagramm anstelle der Korrekturfelder eine vertikale Linie, die im negativen Bereich (Einengung) durchgezogen und im positiven Bereich gestrichelt ist. Klickt man diese Linie mit der Maus an, dann erhält man ein zusätzliches Formularfeld entsprechend Abb. 9. Hier haben wir die Korrekturstellenlänge von 131 mm vorgewählt und in das Formblatt eingetragen; außerdem den bisherigen Durchmesser von 12 mm;  errechnet dann sofort den Wert für den neuen Durchmesser an der Korrekturstelle zu 11,4 mm.

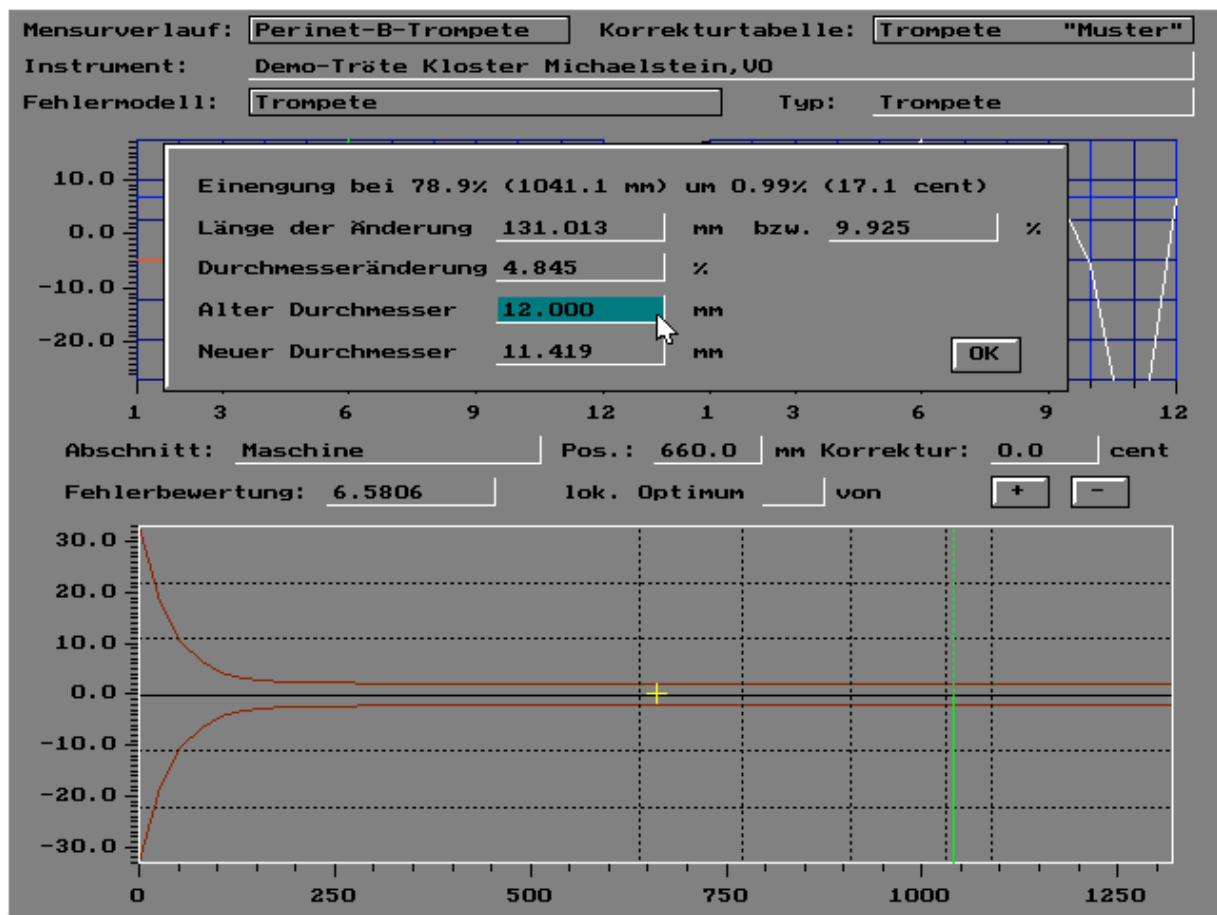


Abb. 9: Einblendung des Formularfeldes zur Festlegung der Mensurkorrektur

Will man eine noch bessere Korrektur der Intonation als mit der beschriebenen einzelnen Mensuränderung erreichen, dann kann man  $\overset{\text{Me}}{\text{SS}}\text{Ko}$  auch eine Vierfachkorrektur überlassen. Das Ergebnis einer derartigen Vorgehensweise ist in der Abb. 10 wiedergegeben. Hier sind in 4 Intonationskurvenpaaren jeweils der Ausgangszustand links und der Zustand nach der n-ten Korrektur rechts gezeigt. Nach der ersten Korrektur erhalten wir das Ergebnis, das schon bekannt war, doch die drei weiteren Korrekturen beseitigen auch noch die Restmängel wie die Überhöhung der 6. Resonanz oder die zu tiefe 10. Resonanz.

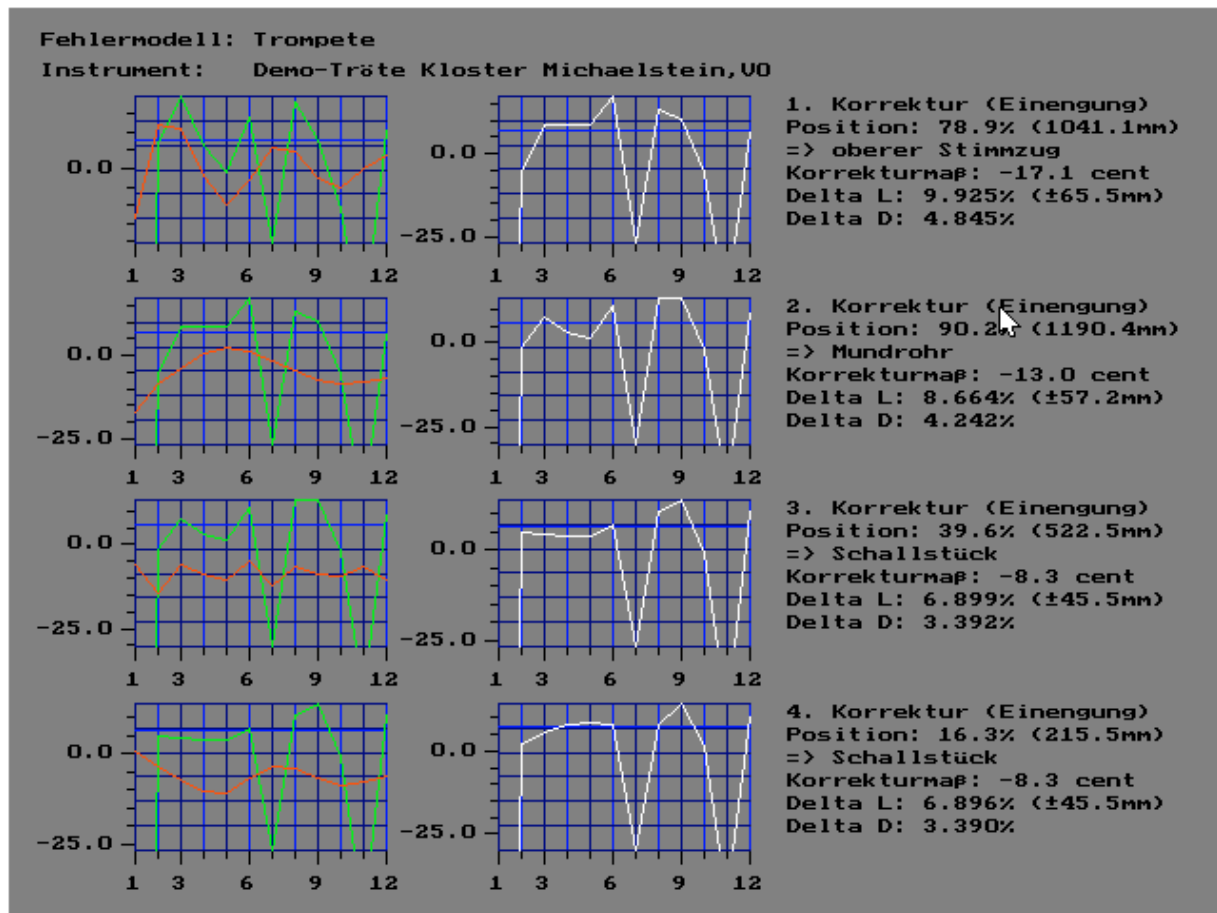


Abb. 10: Stufenweise Verbesserung der Intonation bei 4 Korrekturen

## 6. Zusammenfassung

Das beschriebene Meß- und Korrekturverfahren  $\overbrace{\text{MeSSKo}}$  eignet sich in besonderer Weise für die Analyse der musikalisch akustischen Eigenschaften von beliebigen Blechblasinstrumenten und ermöglicht die Verbesserung der Intonation durch gezielte Mensurkorrekturen. Durch die intensive Beschäftigung mit den akustischen Vorgängen in Blechblasinstrumenten konnte die Präzision dieses Näherungsverfahrens inzwischen derart gesteigert werden, daß der Instrumentenmacher die von  $\overbrace{\text{MeSSKo}}$  angegebenen Werte unmittelbar in seine Konstruktion übernehmen kann.

Das Meßsystem/Programm ist einfach zu bedienen und erfordert keinen besonderen akustisch aufbereiteten Meßraum, da die Resonanzwirkung der Prüflinge im Mundstückskessel gemessen wird. Das hat zudem den Vorteil, daß die Interpretation der Ergebnisse eine hohe Relevanz für den Bläser aufweist, der in seinem Anblasprozess dieser Resonanzwirkung unmittelbar ausgesetzt ist. Das gesamte Meßsystem ist sehr klein, der Meßkopf enthält bei seiner geringen Größe von ca. 7 cm  $\varnothing$  und 15 cm Länge die gesamte Meß- und Einstellelektronik und wird über ein einziges Steuerkabel mit dem PC verbunden. Dadurch ist das Meßsystem auch für den mobilen Einsatz leicht zu verwenden, was die Arbeit sehr erleichtert.

## 7. Literaturverzeichnis



- /1/ Wogram, K.: Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten, Diss. TU - Braunschweig, 1972
- /2/ Wogram, K.: Diskrepanz in der Beurteilung von Blechblasinstrumenten zwischen Spieler und Zuhörer, Das Orchester, Jg. 35, Nr. 6 (1987), S. 639 - 642
- /3/ Wogram, K.: Akustische Auswahlkriterien bei Blechblasinstrumenten, in "Das Instrumentalspiel", Doblinger, Wien 1989, S. 119 - 136
- /4/ Wogram, K.: Die Bedeutung des Mundstückes bei Blechblasinstrumenten, Instrumentenbau-Zeitschrift, Jg. 46, Nr. 6 (1992), S. 53 - 60