

## A Trumpet Research and Optimization Project:

# Stimmung und Intonation bei Blechblasinstrumenten

**Mensuränderungen und deren Auswirkung bei Trompeten.**

## Eine Projektübersicht und kompakte Einführung

Projektstand per 8.12.2024, Revision 20.0

Die aktuellste Version dieses Dokuments finden Sie auf der Projektseite:

<http://www.preisl.at/brassissima/>

Begleitende Dokumentation zum Projekt / Thema.  
Development, Work, Calculation and Copyright:



(="Brass Instrument Scanning System – Impedance Measurements & Analysis")



Hermann Preisl

Altwaidhofen 45  
3830 Waidhofen/Thaya, Austria

[brassissima@preisl.at](mailto:brassissima@preisl.at)

P.S.: Wer systematische Fehler, Schwachsinn oder falsche Behauptungen findet:

Bitte diese **nicht !!** behalten,  
sondern bitte um kurze Info an mich, das hilft mir sehr weiter, danke!

## Inhalt dieser kompakten Projektübersicht und Einführung Seite

<b>Meine Motivation</b>	<b>3</b>
Umfang, Inhalt und neue Struktur der gesamten Projekt Dokumentation	5
 <b>Einige Grundthemen und Aspekte, hier nur jeweils kurz angesprochen:</b>	
Mögliche, stehende Wellen in engen Rohren und Blechblasinstrumenten	8
Manipulation stehender Wellen durch lokale Perturbationen	8
Druckverlauf in Blechblasinstrumenten	9
Frequenz Änderungspotential, akustische Mitte und Peak Symetrie	9
Notation, Instrument, „Naturtöne“, Messkopf, Impedanz und Stimmung	10
Die Eingangsimpedanz – ein „akustischer Fingerabdruck“ des Instruments	11
Gewichtung von Messergebnissen, Regimes of Oszillation	12
Stimmung – Hören – Feedback-Loop - Intonation	13
Einfluß von Bläsern aus Fleisch und Blut	13
Impulseresponse – Informationen aus dem Zeitbereich	14
Akustisch wirksame Länge vs. physische Abmessungen	14
Lokale Änderungen und deren globale Auswirkungen	15
Mundstücke und Mundrohre	16
MPC EL – equivalent Length / äquivalente Längen geschlossener Zylinder	17
Reflektionen, Schallbecher, die Horngleichung und Hornfunktion	17
Die Krümmung der Steigung, ebene und sphärische Wellenfronten	
Luft und Lippenschwingungen	18
Anhang:     Verwendete Bezeichnungen / Abkürzungen / deutsch	19
Glossary:   Used names and shortcuts, english	21
Begriffe, Umrechnungsformeln und Formel-Sammlung Akustik	23

### Hinweis:

Ein Projekt-Inhaltsverzeichnis als Nachschlagewerk des Gesamtprojekts wurde hinzugefügt, daß als Orientierung und zur Themensuche genutzt werden kann.

Ebenso wurden dem Projekt als Nebenarbeiten Sideletters hinzugefügt. Diese befassen sich mit notwendigen mathematischen, physikalischen und akustischen Themen.

## Stimmung und Intonation bei Blechblasinstrumenten

### Meine Motivation:

Die Materie und hier speziell Stimmung, Intonation und Ansprache beschäftigt mich als ambitionierter Musikgenießer, Freizeit-Trompeter und Tüftler mittlerweile schon seit 1999. Vor dieser Zeit habe ich mich mit Kompositions- und Harmonielehre sowie Musikkunde beschäftigt. Über die Zeit war ich in verschiedensten Ensembles sehr aktiv, von Brass Quintett über Tanzmusik, Bigband, Salon-Orchester, Böhmische und Blasmusik, habe auch einen Blasorchester-Dirigentenabschluß gemacht und bei einem Kompositionswettbewerb des NÖ Landesblasmusikverbandes gewonnen. Von den Darbietungen war ich aber oft nicht so entzückt speziell was Stimmung betrifft, ebenso von meiner eigenen!

In diesem Brassissima Projekt versuche ich zu jenen Zeiten, in denen ich gerade keine Computerprobleme löse - mancher nennt so etwas Freizeit - Blechblasinstrumenten mit Hirnschmalz aber auch mit Hilfe von IT die letzten verborgenen Geheimnisse zu entlocken. Warum? Um die Vorgänge selbst vollständig zu begreifen und (meine) Instrumente anhand dieser Basis besser optimieren zu können. Ich habe mir über die Jahre dafür eine kleine Werkstatt eingerichtet, bin aber kein Instrumentenbauer. Geputzt, zerlegt und wieder zusammengebaut hatte ich die Instrumente ja schon seit meinem 10. Geburtstag, also über 30 Jahre lang.

In grauer Vorzeit kam dann Internet auf und es gab nun teilweise Zugang zu Informationen - speziell aus den USA, welche bisher nicht möglich waren. Auf Webseiten konnte man die Entdeckungen z. B. von Backus finden. Man fand dann Referenzen zu Büchern und Anleitungen, wie man Instrumente akustisch vermessen könne und ich habe erste Versuche gestartet, (Coladosen-Verschluß mit Mikrophon an Mundstück gepresst; Lautsprecher nahe dem Schallstück mit Sweep); die natürlich voll in die Hose gingen. Es kam quasi ca. genau das verkehrte Ergebnis heraus = Frequenzen nahe Antiresonanzen. Die verfügbaren Informationen wurden immer mehr, speziell die Capillary Methode von Benade hatte es mir dann aber angetan. Ca. zur gleichen Zeit waren auch erste Webseiten zu BIAS©, einem Projekt des Instituts für Wiener Klangstil der Universität für Musik und darstellende Kunst abrufbar, dieses verwendet eine „Drahtleitung“.

Hartnäckigkeit zahlt sich aus und nach einigen stolprigen Versuchen sah ich eine 1. fast gelungene Input-Impedanz-Kurve am Bildschirm! Viele Jahre später wurde dann auch Ebay sehr modern und so mancher nutzte die Plattform für die Entsorgung unerwünschter Staubfänger. Das war damit auch eine Gelegenheit um grenzüberschreitend an relativ „qualitativ hochwertige“ gebrauchte Instrumente zu gelangen. Bei einer nachträglich vergoldeten Stradivarius LR25 habe ich zugeschlagen und diese nach Ankunft und einer intensiven Grundreinigung gleich einmal „vermessen“.

Dabei hat sich herausgestellt, daß es eine undichte Stelle im 1. Ventilzug geben muß. – Langer Rede kurzer Sinn: Der deutsche Verkäufer machte gerade Urlaub in Salzburg, der Instrumentenbauer meines Vertrauens, der auch die Instrumente der Wr. Philharmoniker baute wurde kontaktiert und ein gemeinsamer „Reklamations“-Termin dort vereinbart. Hr. „L“ hat dann auch festgestellt, daß eine Lötverbindung am 1. Ventil undicht wurde, er vermutete dabei gleich daß dies ein Resultat der nachträglichen Vergoldung ist, wo hohe Mengen an Chemikalien für die notwendige Entfettung des entlackten Instruments sorgen und diese das Lötzinn über die Zeit „schleichend“ angreifen. Wir haben uns damals geeinigt, der 1. Ventilzug wurde durch „L“ neu verlötet und vergoldet, sogar auf Kosten des Verkäufers!

Im Gegenzug hat Meister „L“ mich gefragt, wie ich denn auf die Idee komme, daß hier der Fehler liegen soll. Ich hab's damals noch recht stümperhaft versucht zu erklären – er hat dann den Kopf geschüttelt und gesagt - also so was ähnliches „wie die Hülsen“? D. h. es war bereits vorher jemand bei ihm, der ihn in ähnlicher Weise genervt haben dürfte. Seit diesem Termin habe ich dann mit der Erkenntnis, daß „alle nur mit Wasser kochen“ versucht, alle künftigen Reparaturen und auch Anpassungen für mich selbst durchzuführen.

Den Umgang mit Werkzeugen und Maschinen habe ich mir selbst und mit Hilfe meines Vaters (Schmied) und meines Onkels (Zerspanungstechniker) angeeignet. Auch bei meiner damaligen Anstellung in einer Büromaschinenfirma mit angeschlossener Werkstatt für Nähmaschinen bin ich des öfteren mit Feinmechanik in Berührung gekommen. Meine Werkstattausrüstung ist bescheiden und recht überschaubar, ebenso auch mein handwerkliches Geschick als Linkshänder – aber ich bemühe mich!

Über die Jahre haben sich aus meinem Experimentierdrang heraus dann so etliche Instrumente angesammelt. Ich habe zahlreiche Instrumente restauriert, wo Optimierungsbedarf war (fast immer) umgebaut oder modifiziert und oft mit gutem Erfolg auch verbessern können – aber nicht immer. Einige Konzepte sind mangels Hintergrundwissen nicht aufgegangen und der Erfolg ausgeblieben, auch Fehler wurden zahlreich gemacht, teils wiederholt und daraus lernt man bekanntlich! Neben den sehr gut spielbaren, restaurierten und optimierten Instrumenten (darunter auch einige fabriskneue) hat sich aber auch ein Arsenal an unbrauchbaren Schallbechern, Ventilstöcken und Mundrohren angesammelt.

Das Herz blutet mir – in der Werkstatt als kaum brauchbare Ersatzteilständer stehen lassen? An die Wand hängen? Alle wurden einmal vermarktet und grausamerweise auch verwendet, wären aber in der Rohstoff-Wiederaufbereitung gleich besser aufgehoben gewesen - gabs damals in dem heutigen Umfang noch nicht. Ich nenne absichtlich wo immer möglich keine Markennamen und Hersteller – alle sind zu einem Teil vertreten. Große amerikanische Marken ebenso wie tschechische und ostdeutsche Industrieware, westdeutsche und österreichische Meisterinstrumente und Billigware aus China.

Da ich im Internet und in Fachbüchern auf zahlreiche für mich persönlich offene Fragen keine vollständig verwertbaren Antworten gefunden habe und ich mich selbst zudem als sehr begriffsstutzig einordne, habe ich seit 2017 wieder massiv verstärkt Forschungen in Eigenregie in diese Richtung angestellt und die Werkstatt dafür ruhen lassen. Neben einem selbst gebauten Meßkopf und Auswertungssoftware die ich bereits über etliche Jahre weiterentwickelt habe um meine Instrumente in der Werkstatt akustisch zu vermessen nun auch anhand einer virtualisierten Bb-Trompete und der frei erhältlichen Simulations-Software ART - Acoustical Research Toolkit, sowie später auch mit der Simulationssoftware OpenWind (OW). Ich habe zeitgleich eine begleitende Dokumentation dazu erstellt, die vorab eigentlich nur für meine eigenen Interessen als Notiz und Gedankenstütze mit Schlagworten gedacht war.

Da die Ergebnisse und Resultate jedoch bereits zu Projektbeginn dermaßen umfassend ausgefallen sind habe ich mich entschlossen, diese mit Vorwissen zu ergänzen, aufzubereiten und hier für Interessierte zu veröffentlichen. Diese kompakte Übersicht soll die Orientierung im Projektjungle etwas erleichtern und in die ganze Materie einführen, zeigen um was es eigentlich geht, was jetzt technisch und akustisch auch schon mit einfachen Mitteln möglich ist, die wichtigsten Themen, Ergebnisse und Thesen kurz anreißen.

### **Umfang, Inhalt und neue Struktur der Dokumentation und des gesamten Projekts:**

Das „Kleingedruckte“ mit Details, Hintergründen und Erklärungen findet sich auf weit über 1000 Seiten, so stark ist die Dokumentation angewachsen. Aktuell gibt es 22 Kapitel und Sideletter, jedes baut jeweils auf den Grundlagen und Fachbegriffen der vorangehenden auf, es sollte daher in der Reihenfolge abgearbeitet werden um den Sinn der verwendeten und – da Pionierarbeit – teils neu von mir erfundenen - Ausdrücke und Abkürzungen folgen zu können. Im Anhang dieser Einleitung gibt es eine Auflistung von Abkürzungen und englischen Begriffen, die oftmals wesentlich kürzer ausfallen und dadurch auch des öfteren verwendet werden.

Zum Projekt hinzugefügt habe ich Sideletters, die sich mathematischen, physikalischen und akustischen Themen tiefer auseinandersetzen und auch als Nachschlagwerk dienen sollen. Will man als nicht Physiker tiefer in dieses Projekt eintauchen, dann empfehle ich Sideletter #1 vorab durchzugehen.

Die einzelnen Abschnitte des Projekts sind nicht in der nun nummerierten Reihenfolge entstanden. Ebenso hat es sich im Laufe des Projektfortschrittes ergeben, daß einige der fundamentalen Teile nicht nur für Blechblasinstrumente interessant sind, sondern generell für alle Blasinstrumente. Deshalb habe ich das Projekt im Jahr 2024 nochmals grundlegend neu strukturiert.

Da diese Arbeit über weite Teile Pionierarbeit darstellt, können falsche Interpretationen und Fehler absolut nicht ausgeschlossen werden. Über Hinweise zu solchen Irrtümern und Fehlern bin ich sehr dankbar. Ich übernehme daher ausdrücklich auch keinerlei Haftung für Schäden, die durch das Nachahmen der von mir beschriebenen Vorgänge und Methoden auftreten könnten! Ich möchte auch niemanden anstiften, selbst an seinen Instrumenten herumzubasteln! Der Instrumentenbauer Ihres Vertrauens steht gerne zu Ihrer Seite!

Aktuell biete ich Messungen, Analysen und Optimierungen für Instrumente von Kunden und Klienten aus Zeitgründen nicht an. Ich freue mich aber sehr über jede konstruktive Kritik. Mail: [brassissima@preisl.at](mailto:brassissima@preisl.at)

Der jeweilig aktuellste Stand des Projekts ist über den link <https://www.preisl.at/brassissima/> zu erreichen.

*Perturbations on a Bb Trumpet – Notices & Results, ©Hermann Preisl, [www.preisl.at/brassissima/](http://www.preisl.at/brassissima/)*

**Der Projektinhalt ist nun in folgende 6 generelle Sektionen aufgegliedert:**

1. Info-Point, Einleitung, Projektübersicht und Informationen zur geänderten Struktur der Dokumentation
2. Generelle fundamentale akustische Grundlagen und Eigenschaften für jedes Blasinstrument (Rohr)
3. Brass Instrument Acoustics – Simulationen & Theorien - und hierzu spezieller Inhalt
4. Brass Instrument Acoustics – Messungen & Analysen - und hierzu spezieller Inhalt
5. Dokumentation von veröffentlichten, realisierten Messungen und Optimierungen an Instrumenten
6. Sektion reserviert für künftige Verwendung, Zusammenarbeit, Diskussionen, neue Ideen, und so weiter

Damit Sie einen Weg durch den „Projektjungle“ finden, habe ich die Teile und Inhalte in 4 Level unterteilt. Ihr Weg sollte dem Inhaltsverzeichnis und dem Level in aufsteigender Reihe folgen!

Level L1 = Einleitungen, fundamentaler Hintergrund, Basis Theorie und dazugehöriges Wissen (notwendig)

Level L2 = Erweiterter oder sehr spezieller Inhalt, erfordert Grundwissen der Level L1 Dokumente

Level L3 = Experimenteller Inhalt, erfordert Wissen und Verständnis der Level L1+L2 Dokumente

Level L4 = Kommentare, Gastbeiträge, etc. – für künftige Projekt Erweiterung vorgesehen.

*However as I started “patriotic” in german (G) language, I decided to write newer content only in english language (E) – simply because there are so much more interested english speaking people around the world. Already available content would be eventually converted to english, as time is given. But since AI and online pdf translators are available, it should be a simple task to get the essential stuff into your language!*

Die neue Struktur und Benennung der Projekt Dokumente ist daher ab nun:

Section#-Level#-Language-Part# - Content

**Section #1 – Infopoint: Introduction, Project Overview and info on changes and new added stuff**

Einleitung, Projektübersicht und Informationen zur geänderten Struktur der Dokumentation

1-L1-G-Teil-0: Eine kompakte Projekt Übersicht und Einführung (dieser Teil.)

1-L1-G-Teil-1: Musikkunde, Stimmung und Intonation, im Speziellen bei Blechblasinstrumenten

1-L1-G-Teil-2A: Akustik von Hörnern und die Mensur von Blechblasinstrumenten (eine Einleitung)

Teil 1 und 2A sind als Einführungslektüre in die Thematik Musikkunde und Akustik für Blechbläser gedacht.

**Section #2: Fundamental math, physics and acoustic properties of simple geometric waveguides**

Fundamentale mathematische und akustische Eigenschaften von einfachen Resonatoren

2-L1-G-Sideletter-1: Projektbezogene, gesammelte Grundlagen aus Physik and Mathematik

*(Former) Experiments, data based mainly on A.R.T. Simulations et. al. (German):*

2-L1-G-Teil-2B: Akustik simpler Geometrien im Vergleich: Zylinder, Konus, Frustum

2-L2-G-Sideletter-2: Akustische Eigenschaften von zylindrischen Rohren, Transfer Matrix Methode

2-L2-G-Sideletter-3: Akustische Änderungen durch Perturbationen an zyl. Rohren, basierend auf A.R.T.

2-L2-G-Teil-2C: Perturbationen an closed-open Geometrien, Zylinder und Frustum

*(Newer) Experiments, data based on Openwind Simulations (English):*

2-L2-E-Sideletter-4: Acoustics of perturbed cylindrical tubes (advanced), based on Openwind

2-L3-E-Sideletter-6: Where are the limits? Extreme perturbations of closed-open cylindrical tubes

2-L3-E-Sideletter-5: Discrepancies of perturbed tubes, Openwind vs. experimental measurements

*2-L2-E-Not published: Inria / Openwind – Summary of experiments with a closed open cyl. tube*

*2-L3-E-Not published: Inria / Openwind - Perturbation of cylindrical tubes – simulation vs. measurements*

Die Teile 2 B-F sind erst später aus „Forschungsgründen“ entstanden und aufgrund des Umfangs in mehrere Teile aufgesplittet. Themen über die man im Internet bereits sehr gute Informationen erhält habe ich ausgespart oder diese werden nur gestreift. Diese Dokumentation erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Teil 2B und Teil 2C setzen sich intensiv mit den akustischen Eigenschaften der scheinbar simplen Geometrien Zylinder, Konus und Frustum auseinander. Das hat zwar mit Trompeten nicht sehr viel zu tun, liefert aber sehr viel Hintergrundwissen über diese beiden „Extrem“- Formen.

Sideletter #2 und #3 sind 2022 als Ergebnisse meiner Forschungen hinzugekommen und betrachten speziell die Vorgänge im Zylinder.

### **Section #3: Brass Instrument related Acoustics – Simulation & Theory**

#### Akustik von Blechblasinstrumenten – Simulationen und Theorien dazu

3-L1-G-Teil-2D: Akustische Eigenschaften der Komponenten Mundstück, Schallbecher, Horn Funktion

3-L2-G-Teil-2E: Mode matching Probleme, Patente, frische Ideen, Bell Skirts

3-L2-G-Teil-2F: Leadpipes als verbindendes, korrigierendes und gestaltendes Element

3-L2-G-Teil-3: Grundlagenforschung mit Hilfe von Virtualisierung und Simulationen (ART-Trompete)

3-L3-G-Teil-4: Optimierungsstrategien kompletter Ventilblasinstrumente mittels Perturbationen (ART)

Teil 2D befasst sich intensiv mit den akustischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten Kessel-Mundstück, Hörner und Schallbecher und der sogenannten „Webster Horngleichung“ als auch der Horn-Funktion „U“. Gerade bei den Hörnern ist sehr viel Mathematik involviert aber ich denke ich habe das so aufarbeiten können, daß man das Funktionsprinzip und Unterschiede daraus verstehen kann.

Teil 2E und beschreibt die Mode-matching Problematik bei Hörnern in Verbindung mit zylindrischen Rohren, vergleicht Unterschiede durch Mensur z.B. zwischen Trompeten und Flügelhörnern und Änderungen durch zugeschaltete Ventillängen. Ein zweiter Abschnitt durchleuchtet einige Patente zum Thema und wie die einzelnen Komponenten zu einem Instrument zusammengesetzt und aufeinander abgestimmt werden können. Im Speziellen werden auch die Erfindungen von W. Cardwell nachgestellt und berechnet, hier das Konzept und Design einer hoch F-Trompete zur Bewältigung des Brandenburgischen Konzerts #2.

Teil 2F widmet sich Mundrohren als verbindendes, korrigierendes und gestaltendes Element.

Teil 3 dokumentiert die Ergebnisse der A.R.T. Simulationen der virtuellen Bb-Trompete, zusätzlich sind Anmerkungen zu gefundenen Abweichungen gegenüber physischen FFT-Messungen aus Teil 7 mit eingearbeitet.

Teil 4 beschreibt meine Thesen und Methoden zur Optimierung durch Perturbationen an kompletten Ventilblasinstrumenten und die Unterschiede von Ventilstockpositionen und Ventiltypen. Dieser Teil ist einigermaßen komplex und viele Passagen waren mit englischen Abkürzungen einfacher zu beschreiben.

### **Section #4: Brass Instrument related Acoustics – Measurements and Analysis**

#### Akustik von Blechblasinstrumenten – Messungen, Auswertungen, Optimierungen

4-L2-G-Teil-5: Impedanzmesskopf und Messungen realer Instrumente - Frequenzbereich

4-L3-G-Teil-6: Informationen realer Instrumente aus dem Zeitbereich

4-L3-G-Teil-7: Simulationen und Differenzen zu realen Impedanzmessungen

4-L3-G-Teil-8: Der Informationsgehalt von Impedanzkurven – Visionen, Thesen & praktischer Nutzen

Im Teil 5 habe ich meinen Meßkopf- und die Software für die objektive Mesung reeller Instrumente neu organisiert und beschrieben.

Teil 6 beschäftigt sich mit Informationen aus dem Zeitbereich - Impulseresponse der gemessenen Instrumente.

In Teil 7 Abschnitt A geht es um die Probleme und Lösungen bei realen Impedanzmessungen eines vorhandenen Instruments und in welchem Umfang die Ergebnisse bei Virtualisierung davon abweichen. Auch Ergebnisse mit anderen Simulationsmodellen werden behandelt und verglichen. Der Abschnitt B beleuchtet die Auswirkungen von Perturbationen auf die verschiedensten Parameter der Impedanzkurve im Frequenzbereich.

Teil 8 beschäftigt sich mit Fakten, meinen Visionen und wie Input Impedanzkurven und die Funktionsweise von Blechblasinstrumenten besser verstanden werden können. Sollte es möglich sein auch die Positionen von Druckknoten und Druckbäuchen anhand der Eingangsimpedanzkurve zu bestimmen? Ich habe hierzu eine These aufgestellt. Im Abschluß als Zusammenfassung ein "quick&dirty - but straight forward" Ansatz für die praktische akustische Arbeit an Trompeten mit kleinstmöglichen Positionsfehlern.

**Section #5: Documentation of realized sample projects**  
Dokumentation von durchgeführten Beispiel Projekten

5-L1-E-Part reserved for future use

**Section #6: reserved for future use, collaboration, discussion, new ideas, and so on.**  
Reservierter Abschnitt für zukünftige Verwendung, Zusammenarbeit, Diskussionen, neue Ideen, und so weiter ...

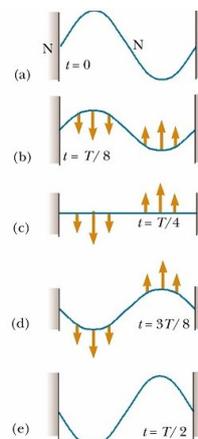
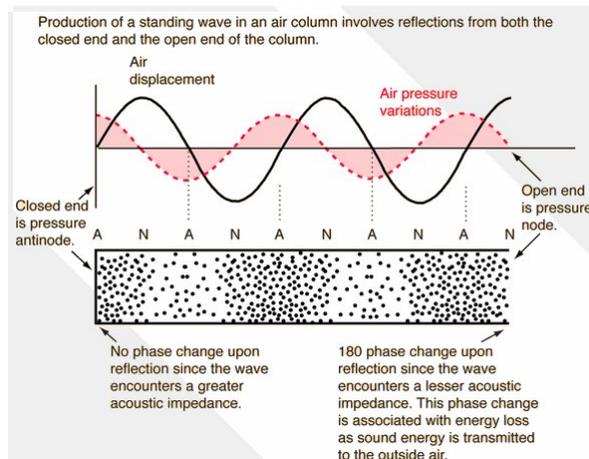
6-L1-E-Links to related sites (future)

Die folgende kompakte Übersicht soll wirklich kompakt bleiben und spricht einige Themen daher jeweils nur kurz an. Sie soll zeigen wie manche Themen miteinander verwoben sind, wie Messungen, Auswertungen und daraus Aussagen über akustische Effekte und Thesen entstanden sind, und soll zeigen was aus meiner momentanen Sicht möglich ist. Es sollen vor allem aber in einer möglichst einfachen Sprache und Wortwahl die kompliziertesten physischen Vorgänge dargestellt und Grundbegriffe dazu vermittelt werden!

Sie soll speziell für Bläser, die vielleicht vor einer neuerlichen Mundstück-Rallye stehen abseits von der Werbemaschinerie der Hersteller mit Wissen versorgen und eventuell den einen oder anderen Mythos abschätzbar machen. Für eine Vertiefung stehen dann die Details in den jeweiligen Teilen meiner Arbeit.

*Neuerdings moderne Genderform Regeln wurden in meiner Arbeit nur aus Übersichtlichkeitsgründen total missachtet - aber nicht übersehen – ich entschuldige mich dafür hiermit bei allen Leserinnen vielmals dafür!*

Mögliche, stehende Wellen in engen Rohren und Blechblasinstrumenten:



**Figure 18.6** A standing-wave pattern in a taut string. The five "snapshots" were taken at half-cycle intervals. (a) At  $t = 0$ , the string is momentarily at rest; thus,  $K = 0$ , and all the energy is potential energy  $U$  associated with the vertical displacements of the string particles. (b) At  $t = T/8$ , the string is in motion, as indicated by the brown arrows, and the energy is half kinetic and half potential. (c) At  $t = T/4$ , the string is moving but horizontal (undeformed); thus,  $U = 0$ , and all the energy is kinetic. (d) The motion continues as indicated. (e) At  $t = T/2$ , the string is again momentarily at rest, but the crests and troughs of (a) are reversed. The cycle continues until ultimately, when a time interval equal to  $T$  has passed, the configuration shown in (a) is repeated.

In Rohren breiten sich Schallwellen longitudinal aus und verursachen kleine, lokale Luftdruckunterschiede (schwarze Punkte). Transversalwellen, wie sie bei Saiteninstrumenten auftreten werden hier nur verwendet um die Funktionsweise grafisch einfacher darzustellen! Ein Node = Knoten bleibt an seiner Stelle immer ein Knoten, ein Antinode ist das Gegenteil von einem Knoten = maximale Auslenkung +/- und diese alteriert hier (schwingt max. +/-), Beispiel links: 5 Pressure Antinodes = 5 Druckbäuche = der 3. mögliche höhere Mode.

Anstelle von Druck und Druckschwankungen könnte man auch den Partikelfluß (Flow) betrachten (schwarz). Beide Größen liefern jeweils Nodes und Antinodes, die im Fall des Zylinders um 90 Grad Phasenlage = 1/4 Wellenlänge versetzt liegen. Knoten bilden sich jeweils im Abstand von 1/2 Wellenlänge. Daraus ergeben sich Positionen im zylindrischen Rohr. Druckschwankungen sind messtechnisch aber leichter zu erfassen!

Bei Resonanzen = stehenden Wellen bilden sich an einem geschlossenen Rohrende immer Druckbäuche = Pressure Antinodes, an offenen Rohrenden bilden sich immer Druckknoten = Pressure Nodes. In einem einseitig geschlossenen Rohr können sich stehende Wellen also nur so ausbilden, solange diese Randbedingungen erfüllt sind. Diese sind max. nur dann erfüllt, wenn die Rohrlänge **RL** der 1/4 Wellenlänge einer tiefsten Grundfrequenz = **GT** entspricht, sowie ungeraden = odd Vielfachen dieser Grundfrequenz **GT**. Gerade = even vielfache Schwingungen der Grundfrequenz würden am offenen Ende einen Druckbauch erfordern, und das ist physikalisch an einer „undichten Stelle“ – hier ein offenes Ende - nicht möglich! Es sind 2 „Bierdeckel-Formeln“ üblich, diese werden später noch um notwendige Endkorrekturen bereichert:

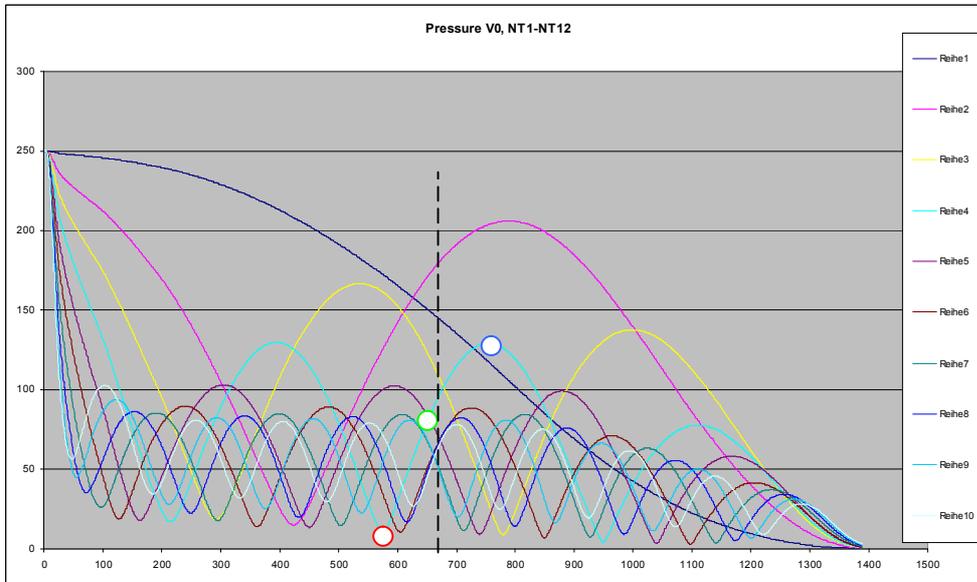
Wellenlänge **WL** in m = Schallgeschwindigkeit **c** / Frequenz **f**, **RL GT** = ~ 1/4 WL = c/(4\*f)  
 mögliche Resonanzmodes eines closed-open Zylinders  $f(n) \sim \{ [(n*2)-1] * c \} / (4*RL)$  (mit  $n=1,2,3,4..$ )  
 Rohre mit 2 offenen Enden bilden an beiden Enden physikalisch bedingt zwangsweise Druckknoten,  
 mit 2 offenen Enden ergeben sich mögliche Resonanzen  $f(n) \sim (n * c) / (2*RL)$ ; **RL GT** = 1/2 WL = c/(2f)

Manipulation stehender Wellen durch lokale Perturbationen:

Selbstverständlich haben wir es bei einem kompletten Blechblasinstrument nicht mehr mit einem einfachen Zylinder zu tun; die schwingenden Bläserlippen werden dabei als „hoch-ohmiges“, = defakto geschlossenes Ende angesehen, aber dennoch gelten die grundlegenden Randbedingungen weiter. Durch Mundstück und Schallbecher wurden Resonanzfrequenzen und somit Wellenlängen gegenüber einem simplen Zylinder stark abgeändert. Aber auch die jeweiligen Positionen im Rohr, wo sich Druckknoten und Druckbäuche nun bilden liegen ebenfalls stark versetzt. Ein Abstand der Druckknoten einer 1/2 WL zueinander bleibt jedoch bestehen.

Jedes Blechblasinstrument kann als vorab extrem manipulierter closed-open Zylinder angesehen werden. Ein solcher bereits modifizierter „Waveguide“ kann daher durch kleine lokale Änderungen weiter modifiziert werden - unter anderem auch, um die global resultierenden Resonanzfrequenzen weiter zu verändern.

Länger schon wurden folgende, fundamentale globale Effekte in Rohren (und Instrumenten) beobachtet: Eine lokale Querschnitt-Einengung an einem der Druckbäuche erhöht die globale Resonanzfrequenz, eine lokale Querschnitt-Einengung an einem der Druckknoten vertieft die globale Resonanzfrequenz. Lokale Querschnitt-Erweiterungen wirken singgemäß in die andere Richtung. Um Resonanzfrequenzen bei Blechblasinstrumenten gezielt steuern zu können, ist daher die möglichst exakte Lage der Druckknoten und Druckbäuche **aller** (bei einem 3 ventiligen Instrument ~ 8\*10) **~80 Resonanzen** im Instrument hilfreich!



Achse in mm,

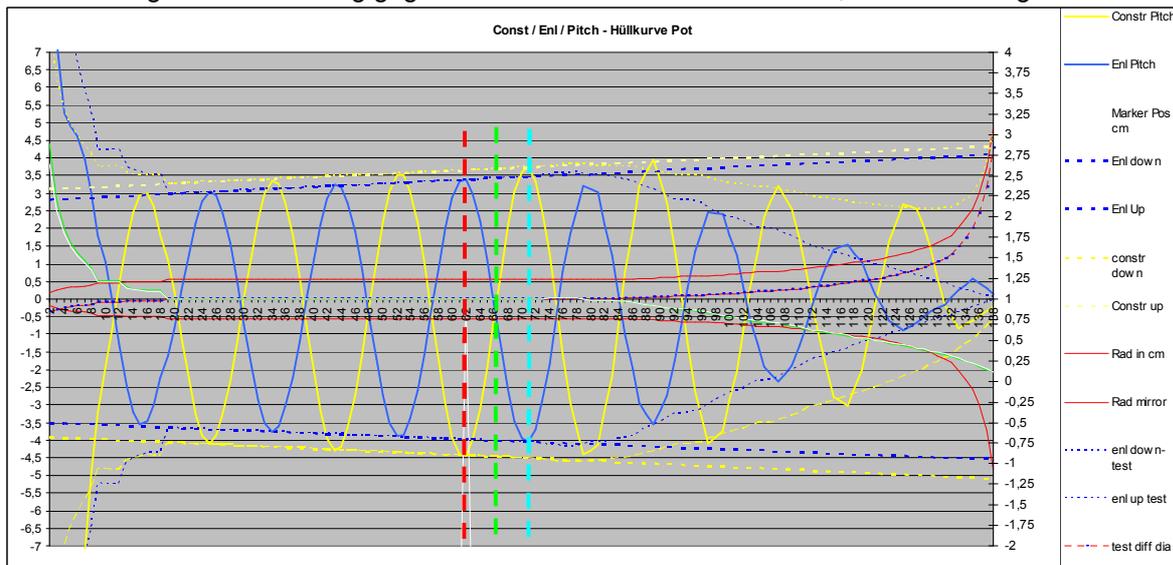
Mögliche stehende Wellen in einer Bb-Trompete V0, NT1 bis NT 12, Simulationsmodell Plane Wave, Mundstück links.

lokale Druckverhältnisse:..... geben globales Potential bei Veränderungen:

NT4: **Rot:** Druckknoten / Pressure Node, **XM-Magnituden-Node 1 = XM-IN1**, ~ maximales Pitch-Pot.  
**Blau:** Druckbauch / Pressure Antinode, **XM-Magnituden-Node 2 = XM-IN2**, ~ maximales Pitch-Pot.  
**Grün =** Position XM-Pitch Node = XM-PN = max. Magnitudenpotential, ~ kein Pitch-Potential.

Strichliert: Die physische Position einer globalen "akustische Mitte" – shared- XM, tiefere und höhere Modes bilden ihre akustische Mitte **später** und **früher**, es bildet sich jeweils ein Versatz zu dieser globalen Mitte.

Schiebt man eine Hülse zentimeterweise durch ein Instrument, misst die Resonanzfrequenz und vergleicht die Änderungen der Stimmung gegenüber dem Instrument ohne Hülse, erhält man folgende Kurve: (Mode 8)



Beispiel NT8, Pitch Potential inkl. Hüllkurven, gut zu sehen größer werdende „Strahl-Linien“ Richtung Bell. Änderung in Cent durch Hülsen in Blechstärke, Länge 20mm, gelb = Constrictions, blau = Enlargements;

rot-strichliert: phys. Position XM-IN1 (hier ein Druckknoten) für Mode 8, max. Pitch-Änderungspotential  
 türkis-strichliert: phys. Position XM-IN2 (hier ein Druckbauch) für Mode 8, max. Pitch-Änderungspotential

grün-strichliert: phys. Position XM-PN = ein Nulldurchgang für Pitch-Pot. = **kein** Pitch-Änderungspotential  
 Diese Position wäre bei einer besonders symetrischen Lage des Peaks (wie bei einem Zylinder) exakt 1/8 Wellenlänge von Druckknoten und Druckbäuchen entfernt, diese sind jeweils 1/4 WL voneinander entfernt.

Findet man die genaue Mitte XM-PN der jeweiligen Resonanzfrequenz heraus, so können alle restlichen Pitch-Nodes vor und nach dieser akustischen Mitte bestimmt werden, der Abstand beträgt 1/4 Wellenlänge!

## Notation, Instrument, „Naturtöne“, Messkopf, Impedanz und Stimmung



Dies sind die notierten „Naturtöne“, die auf jedem Blechblasinstrument theoretisch gespielt werden könnten, und die meisten dieser Töne werden jedem Blechbläser bekannt vorkommen. Der Schlüssel selbst zeigt in diesem Fall als G-Schlüssel die Position eines Tones „G“. In Akustik übersetzt entspricht das Resonanz Mode #3 oder NT3. Die abendländische Notation selbst sagt nichts über Frequenzen, Tonhöhen und das als Vergleichsbasis herangezogene Tuning System aus, auch nicht über die Lage (Bass/Tenor/Alt/Sopran) und ob es sich um eine klingende oder transponierte Notation handelt. Dies wird erst durch Zusatzangaben wie z.B. Stimme für Trompete in Bb oder Horn in F ersichtlich und anhand geschichtlicher und regionaler Gepflogenheiten dann entsprechend gedeutet.

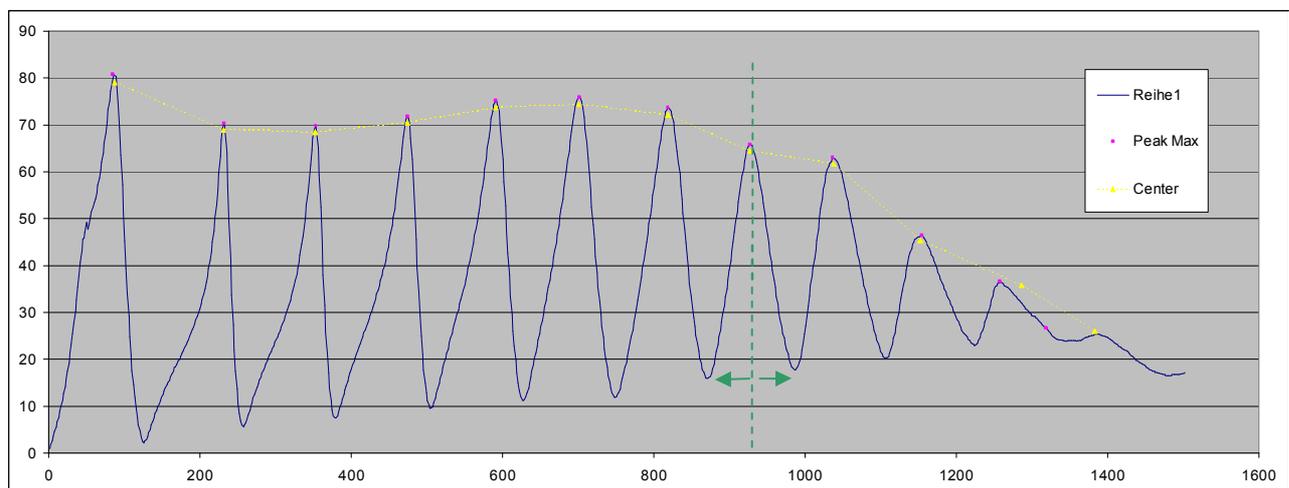
Wären nun resultierende Resonanzfrequenzen exakt mathematisch harmonisch zueinander und somit auch eine gemeinsame Grundtonfrequenz vorhanden, dann wären alle Blechblasinstrumente rein stimmend = Just oder Pure Intonation im englischen Sprachgebrauch, Intervalle mit einfachsten Frequenzverhältnissen. 1:2:3:4 usw. Jeder Intervall der reinen Stimmung ergibt sich aus dieser „Naturtonreihe“. Praktisch ließe sich eine solche Reihe **exakt** allerdings nur mit einem Konus mit geschlossener Spitze und ohne Rohrverluste erreichen. Da die Spitze vorhanden und geschlossen wäre könnte auch nur am großen Ende hineingeblesen werden! Das Vorhandensein des Bläserkopfes am großen Ende würde aber schon wieder für Abweichungen sorgen. Das widerspricht unseren Vorstellungen als Blechbläser – können wir so auch nicht machen!

Aber wollen wir diese „reine“ Stimmung überhaupt? Es gibt bei der reinen Stimmung z.B. einen großen Ganzton, einen kleinen Ganzton, usw. – Es ergeben sich theor. die geringsten Schwebungen im Zusammenspiel bei Terzen und Sexten; Einzelspiel gibt Melodie, Zusammenspiel gibt Harmonie.

Das ist jetzt der Punkt auf den ich hier hinauswollte. Üblicherweise können Klänge vom einzelnen Blechbläser nur nacheinander und nicht gleichzeitig produziert werden, abgesehen von gewollten (Multiphonics, Flatterzunge, etc.) und auch ungewollten Effekten in Folge von (z.B. Kieksern).

In der obigen Notenzeile sehen wir aufsteigend und nacheinander alle Töne, bei denen sich theoretisch eine stehende Welle bilden sollte.

Betrachtet man eine Eingangsimpedanzkurve (auf der Lippeebene) von Blechblasinstrumenten, so zeigen sich die vom Instrument angebotenen Frequenzen für Resonanzen jeweils an einer „Impedanz-Bergspitze“, diese sind durch Täler getrennt, wobei die Flanken (Steilheit dazwischen) unterschiedlich ausgebildet sind.



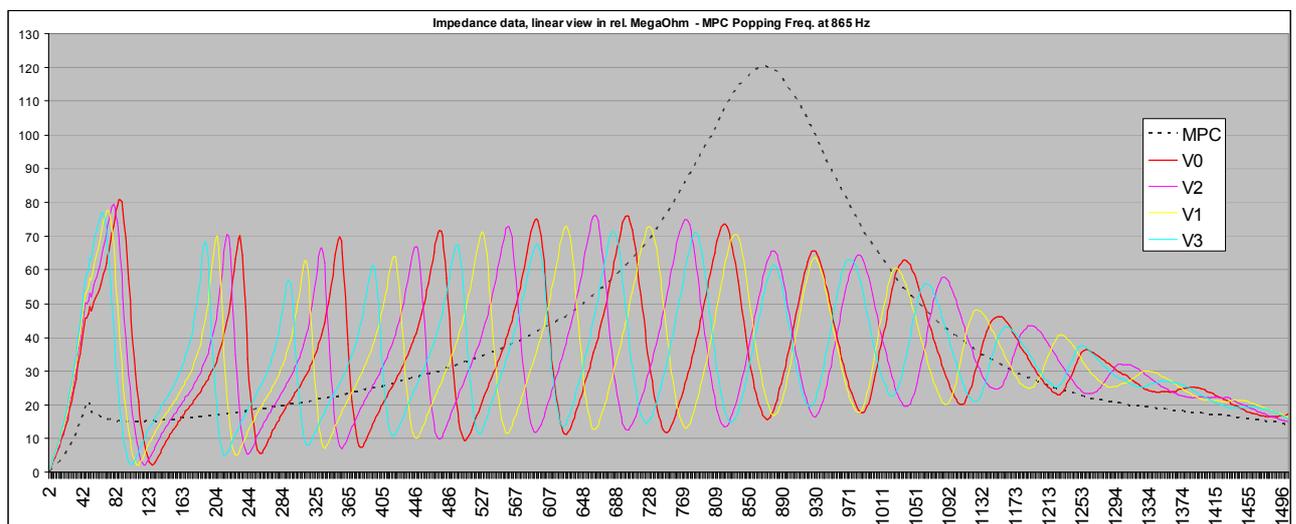
Die Eingangsimpedanzkurve einer Bb-Trompete, ohne gedrückte Ventile =V0, über der Frequenz in Hz Grün mit eingezeichnet: Eine vorübergehende, hier besonders symmetrische Gestalt + Abstände zu Minima.

Wie kommt man aber zu so einer Impedanzkurve? Am einfachsten vorstellbar ist es vorab vielleicht so: Man stelle sich anstelle des Bläusers und seiner Lippen z.B. eine Sirene vor die einmal aufheult, also alle Tonhöhen / Frequenzen durchwandern muß. Gleichzeitig werden an der Lippenebene mit einem Mikrophon alle Druckschwankungen aufgezeichnet (so funktioniert ein Mikrophon). Wo sich durch Reflektionen des Instruments an dieser Stelle am Eingang die stärksten Schwankungen (Druckbäuche) ergeben, ist die Impedanzmagnitude hoch = Peak Frequenzen = angebotene Resonanzfrequenzen des Instruments.

Wo keine nennenswerten Druckschwankungen vorliegen = lokale Druckknoten am Eingang, finden sich die Antiresonanzen. Impedanzwerte sehr vieler einzelnen Frequenzen, zu einer Kurve verbunden stellen dann das Ergebnis einer Fourier Transformation (Spektralanalyse) als Eingangs-Impedanzkurve dar.

*(Die Sirene wird üblicherweise durch einen Lautsprecher und einem angepassten „Sweep“ Signal ersetzt.)*

Nutzt man Ventile oder Züge für eine zylindrische Rohrverlängerung und legt die Messungen übereinander, sieht man wie sich die Lücken durch andere, tiefere Stimmungen füllen. V0 = ohne Ventil klingend Bb, V2 = „Halbtonventil“ = klingend A; V1 = „Ganztonventil“ = Ab, V3 = 1 ½ Töne tiefer = Naturtöne auf klingend G. Die zusätzlich möglichen Ventilkombinationen sind hier nur aus Übersichtsgründen nicht gezeigt.



Schwarz strichliert: Das Mundstück alleine, mit seiner 1. Resonanz, der „Mouthpiece Popping“ Frequenz. Umso höher die Frequenzen sind, desto mehr mögliche sogenannte „Hilfsgriffe“ stehen dann zur Verfügung. Als Beispiele: Notiertes C3 = NT8 V0 oder NT9 V1 bei ~ 930Hz, D3 = NT9 V0 oder NT8 V1 bei ~ 1050 Hz.

Was eventuell auch sofort auffällt: Umso länger die Rohrlänge, desto schwächer (niedriger) sind die Peaks oder Impedanzmaxima ausgebildet. Oberhalb der MPC Popp. Frequenz, hier um rund 1300 Hz wird eine Frequenzschwelle erreicht und überschritten, ab der vom Schallbecher keine nennenswerten Reflektionen mehr zu den Lippen zurückkehren. Höhere Frequenzanteile werden nur noch abgestrahlt. (Megaphone)

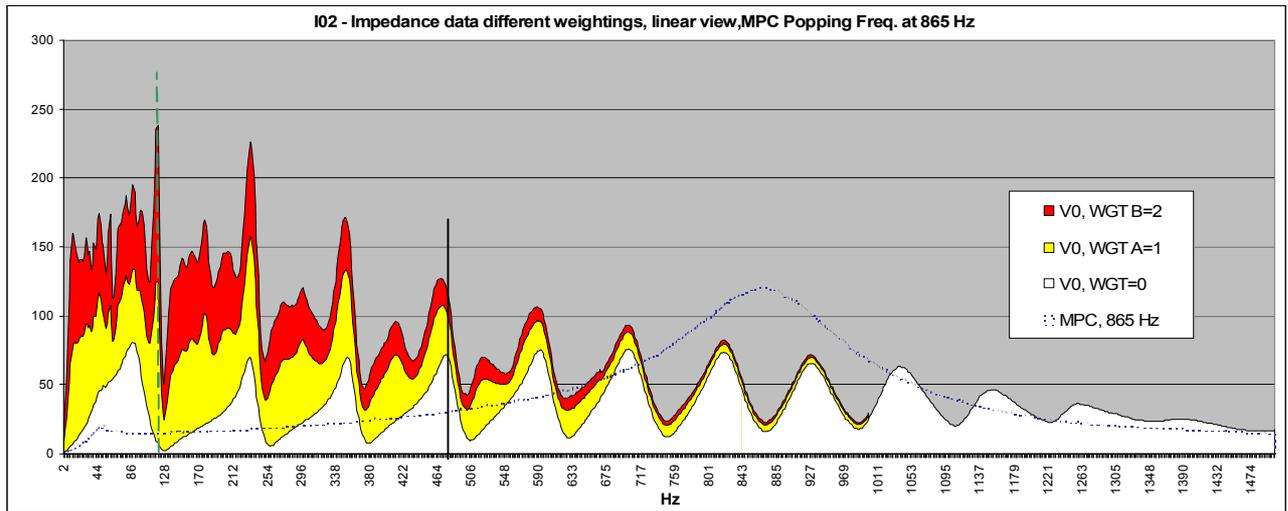
Was vielleicht nicht gleich auffällt: „Peaks“ neigen sich sichtlich zur MPC Popping Frequenz, werden förmlich von dieser wie es scheint „angezogen“; Input-Impedanz Minima=Antiresonanzen sind durch die Anwesenheit des Mundstückes und Schallbeckers aber wesentlich weniger verschoben.

Das Mundstück hat bei Blechblasinstrumenten also einen ganz bedeutenden Einfluß auf Ansprache und Stimmung, der Schallbecher sorgt dafür, daß Frequenzen im Spielbereich kaum abgestrahlt und zu den Lippen zurückreflektiert werden, sehr starke stehende Wellen können so entstehen. Höhere Frequenzanteile werden hingegen stark abgestrahlt was einerseits den besonderen Klang von Blechblasinstrumenten auch mitbestimmt, andererseits aber erklärt warum hohe Töne aufsteigend auch schwieriger zu spielen werden.

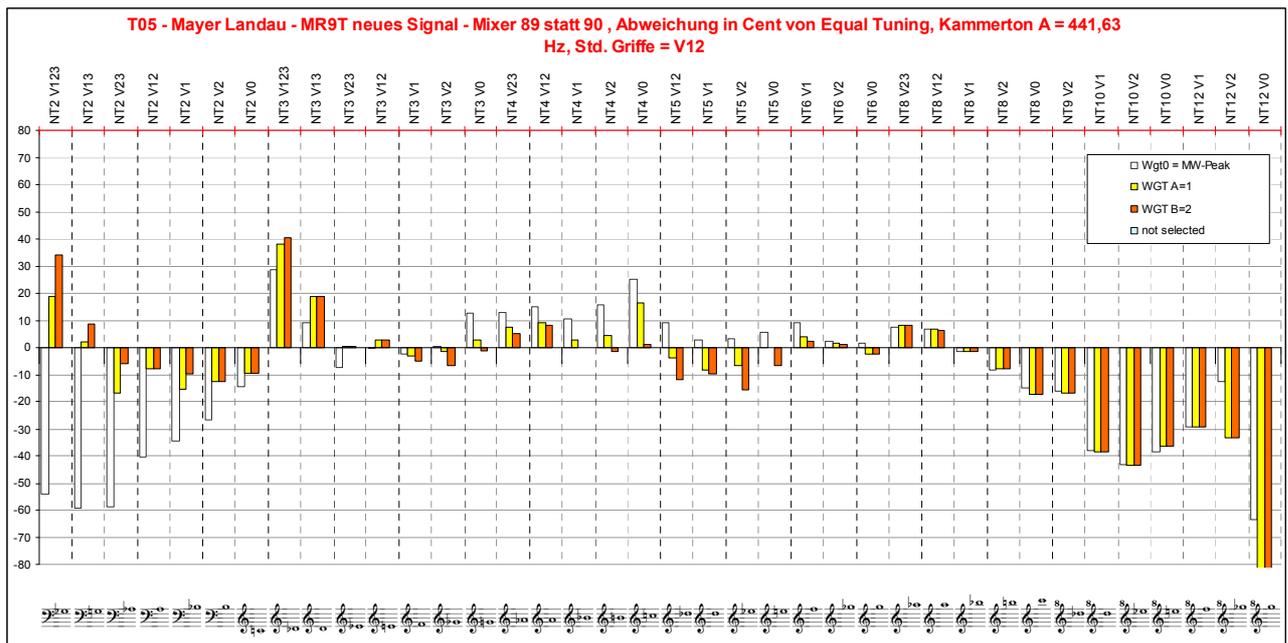
Man muß jetzt folgenden Umstand beachten: Die gezeigte Notenzeile zeigt alle Töne nacheinander an, diese können nur einzeln produziert werden. Die Input-Impedanzkurve zeigt ebenfalls alle möglichen Zustände, aber auch hier kann immer nur eine Frequenz (ein relativ schmales Frequenzband durch Schwankungen, Vibrato, etc.) resoniert werden. Liegt ein Resonanzmaximum (Peak) des Instruments nicht an der gewünschten Tonhöhe, kann bzw. muß der Ton getrieben oder fallengelassen werden, dies ist aber nur mit Einbußen in Treffsicherheit, Klang und einem notwendigen Mehraufwand an Energie durch den Bläser möglich! Die gewünschte stehende Welle würde also an einem Flankenwert und so bei geringerer Impedanzmagnitude mit wesentlich höherer Dämpfung stattfinden, weniger effizient.

Würde man es bei dieser Aussage belassen, wäre das (leider) zu einfach. Umso mehr höhere harmonische Teiltonfrequenzen auftreten = in der Praxis durch höhere Lautstärke und nichtlineare Schwingungen der Lippen, desto stärker ändert sich die Resonanzfrequenz. Die resultierende, maximal resonierende Tonhöhe wird dort erreicht, wo Teiltonschwingungen inklusive der Grundtonschwingung in Summe eine höchste gemeinsame Inputmagnitude ergeben. Die Resonanzfrequenz/Tonhöhe ändert sich also mit der Lautstärke.

Um diesem wichtigen Umstand gerecht zu werden, werden Magnituden von Messergebnissen zusätzlich gewichtet, d.h. wie hoch der Anteil höheren Moden ausfallen könnte. Gewichtung=Weighting=WGT =0 =ppp und bedeutet keine Berücksichtigung höherer Moden. Gewichtung 1 sollte in etwa einem mezzoforte-Level nahekommen, Gewichtung 2 einem Fortissimo. Diese Gewichte stimmen gut mit der Praxis überein und sollen den Einfluß des Bläasers mit berücksichtigen/simulieren, der bei den Messungen nicht vorhanden ist.



Ein Pedalton = notiertes kleines c hier grün strichliert markiert kommt an einer Frequenz zustande, die höher als die (viel zu tiefe) 1. Peakspitze ist. Exemplarisch ist auch die Frequenz des notierten Stimmtones C2 (NT4) schwarz markiert, dieser Ton ist mit Pianissimo Lautstärke Level bei dieser Trompete viel zu hoch und wird bei höherer Lautstärke tiefer. (100 Cent entsprechen einem Halbton-Abstand, 50 Cent einem Viertelton)



Auswertung anhand der Peak Frequenzen, sowie Gewichtung, Noten sind 1 Ganzton tiefer als klingend C. Trompete in Bb, hier mit 3 Ventilen und Standardgriffen V12, = Ventil 1+ Ventil 2 in Kombination, (V3 wird hier einzeln nicht verwendet), Hilfsgriffe sind nicht dargestellt, Änderung der vom Instrument angebotenen Resonanz / Stimmung mit Lautstärkeänderung. ET = Equal Tuning = gleichmäßig temperierte Stimmung. Zur Ermittlung der angegebenen Frequenz des Kammertones klingend A1 wurden die äquivalenten Fundamental Pitch = EFP Frequenzen der Modes 2,3,4,5,6 und 8 mit Ventilstellung V0 (keine Ventile gedrückt) gemittelt. Hier sind also die Abweichungen dieser einzelnen Modes im Mittel am geringsten.

## Stimmung – Hören - Intonation

Die Auswertungen zeigen die Abweichungen zu einer Referenz, der gleichmäßig temperierten Stimmung. Jenem Tuning-System, wo Schwebungen von musikalischen Intervallen - üblicherweise mit Zweiklängen assoziiert gleichmäßig auf 12 Halbtöne verteilt sind. Nur – wollen wir diese Referenz überhaupt erreichen? **Manchmal nicht, dann wieder schon.** Beim Spielen bedarf es einer Rückkopplung – die stärkste ist „hören“.

Zum Glück hat uns die Natur mit einem sehr gut funktionierenden Toleranzsystem ausgestattet was unser „Hören“ anbelangt. Das ermöglicht unserem menschlichen Gehirn auch stark verstimmte Akkorde und Töne jeweils in passende „Schubladen“ einzuordnen und „zurechtzuhören“. Für den Bläser selbst als Feedback-Loop für Korrekturen, als auch für Zuhörer. Dieser „Sinn“ ist individuell unterschiedlich stark ausgeprägt und die Umsetzung hängt stark von momentanen Umständen und Erwartungsmustern ab, diese wiederum ob wir uns von Schall einfach nur nebenbei „berieseln“ lassen, oder versuchen intensiv analytisch zu hören.

Bei einigen Menschen ist dieses Toleranzsystem weniger stark ausgebildet, andere Personen sind dagegen viel toleranter, was nicht gleich „unmusikalisch“ bedeutet. Solche Personen sind einfach nur ganz rasch viel glücklicher als andere!

Einige Anmerkungen zu Stimmungsabweichungen und objektiver Beurteilung von Blechblasinstrumenten: Manche Abweichungen kommen durch unpassende Ventillängen zustande, andere durch die Mensur und hier speziell durch den Einfluß des Mundstückes, Mundrohres und Schallbechers, weitere anhand von modematching der verschiedenen Bauteile untereinander, sowie möglicher Undichtheiten.

Jedes Instrument hat seine eigenen individuellen Abweichungen, man kann aber dennoch generelle Trends nennen, die sich in diesem Fall auf Bb-Trompeten, Kornette und Flügelhörner beziehen und bei den meisten Instrumenten dieser Gattung so auftauchen, sofern nicht gravierende andere Mängel oder Defekte vorliegen:

Alle Griffkombinationen mit mehr als 1 gedrücktem Ventil sind immer zu kurz / zu hoch, V123 weichen ohne Verwendung eines Triggers beinahe einen  $\frac{1}{4}$  Ton nach oben ab. Es sei denn, Längen sind unkonventionell.

Resonanzfrequenzen höherer möglicher Modes – auch wenn diese (z.B. für Anfänger) in unerreichbarer Höhe liegen mögen, beeinflussen lautstärkeabhängig durch ihre Stimmungsabweichung die Stimmung tieferer Naturtöne – nie umgekehrt. Die Stimmung hoher Modes ist deshalb sehr wichtig für tiefere Töne!

Der 1. Impedanzpeak bildet höhere harmonische Teiltöne an Frequenzpositionen, die weit unterhalb von Peakspitzen höherer Modes entfernt liegen. Dieser Peak ist messbar, aber nicht spielbar, es bildet sich ein höherer Pedalton. Dieser „fiktive“ Grundton ist musikalisch dennoch auf hohem Blech kaum verwertbar und wird daher auch nicht verwendet. Auch der tiefe Bereich Mode 2 aller Ventilkombinationen ist nur selten zu hoch. Durch Gewichtung wird dieser Bereich jedenfalls immer höher. Cis 1 und D1 sind immer sehr hoch.

Der Bereich um Mode 3 (notiertes G1) ist recht unterschiedlich, Mode 4 ist meist zu hoch (war nie zu tief); Mode 5 ist immer zu tief, und wird durch Weighting immer tiefer, Mode 6 oft zu hoch – speziell bei Perinet-Trompeten, (äußerst selten zu tief); Mode 8 meist schon zu tief, Mode 9 und speziell Mode 10 immer viel zu tief. Grund dafür ist der nachteilige Effekt von Kesselmundstücken, die als Helmholtz Resonatoren in diesem Bereich oberhalb der Mundstückresonanz ihre akustisch wirksame größte Länge erreichen. **Man muß daher hervorheben, daß verwendete Mundstücke und Mundrohre einen ganz bedeutenden Einfluß haben!**

Das gezeigte Beispielinstrument ist (noch) nicht optimiert und weicht nur im Bereich G1-C2 etwas stärker nach oben ab als ein grober Durchschnitt vieler verschiedener Instrumente aller Preisklassen, die ich bisher vermessen konnte. Flügelhörner weichen oft nicht wesentlich anders ab, allerdings werden mit größerem Mundstück Kesselvolumen die Modes 8, 9 und 10 bei weitem schwieriger zu blasen und noch viel tiefer.

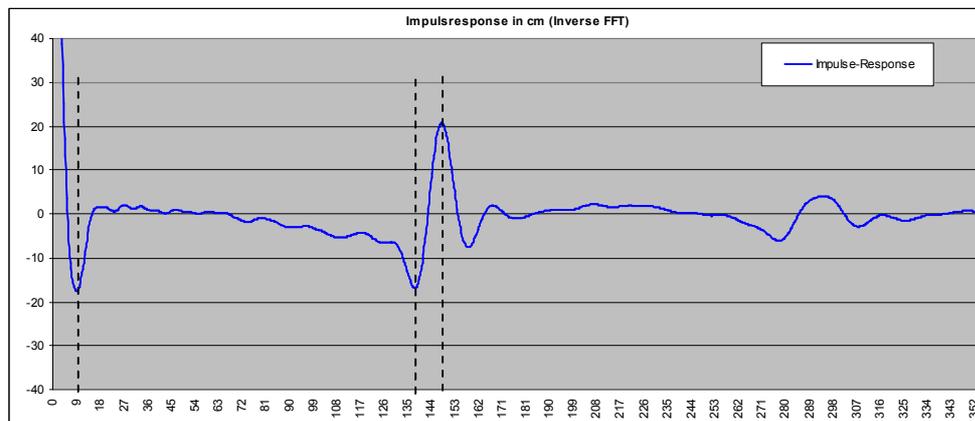
Auch wenn ein „druckloser“ Ansatz propagiert wird, ist es in der Praxis sehr häufig so, daß die Bläserlippen bei einem hohen C und darüber hinaus doch nicht mehr „entspannt“ sind und durch mehr Druck auch mehr Lippenfleisch in den Mundstückkessel hineinragt. Das MPC-Kesselvolumen verringert sich dadurch und die resultierenden Frequenzen in diesem Spielbereich steigen daher. Dies ist bei Messungen aber nicht der Fall! Töne speziell oberhalb der Mundstück Popping Frequenz sind in der Praxis dadurch etwas weniger tief.

Ebenso haben menschliche Bläser eine individuelle unterschiedliche Lippenmasse und unterschiedliches Stamina („Durchhaltevermögen“) sowie Blastechniken. Dazu kommt eine Tagesverfassung und Übung, die stark schwanken kann. Dies – und Unterschiede daraus - kann und soll bei einer rein objektiven Beurteilung bewusst nicht beinhaltet sein, muß aber für die Praxis selbstverständlich mit berücksichtigt werden!

## Impulseresponse – Informationen aus dem Zeitbereich

Sendet man einen „Knall“ (am geschlossenen Mundstückende) in das Instrument und zeichnet hier mit einem Mikrophon wiederum alle Druckschwankungen auf die aufgrund von Reflektionen, vor allem jene vom Schallbecher über der Zeit auftreten, erhält man die Response, also eine Antwort auf den Knall. Alternativ kann anstelle eines Knalls auch eine bereits durchgeführte Impedanzmessung durch eine inverse Fourier Transformation vom Frequenz- in den Zeitbereich überführt und ausgewertet werden.

Stimmung und Zeitdauer, und somit ermittelbare Längen durch zurückgelegte Wegstrecken sind stark von der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall und hier vor allem der Lufttemperatur abhängig. Auch weitere untergeordnete Parameter für die Dichte von Luft wie Luftfeuchte, Co2 Gehalt, etc. beeinflussen die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Mit den Informationen der Impulsantwort lassen sich Störstellen orten, als auch die Abschwächungen und Verluste durch Ventilschlaufen, deren effektive Längen und vieles mehr.



Trompete Bb, V0 Zeitbereich und Impulsantwort – hier bereits von Zeitdauer in Millisekunden anhand Schallgeschwindigkeit in akustisch wirksame Längen umgerechnet, x Skale in cm.

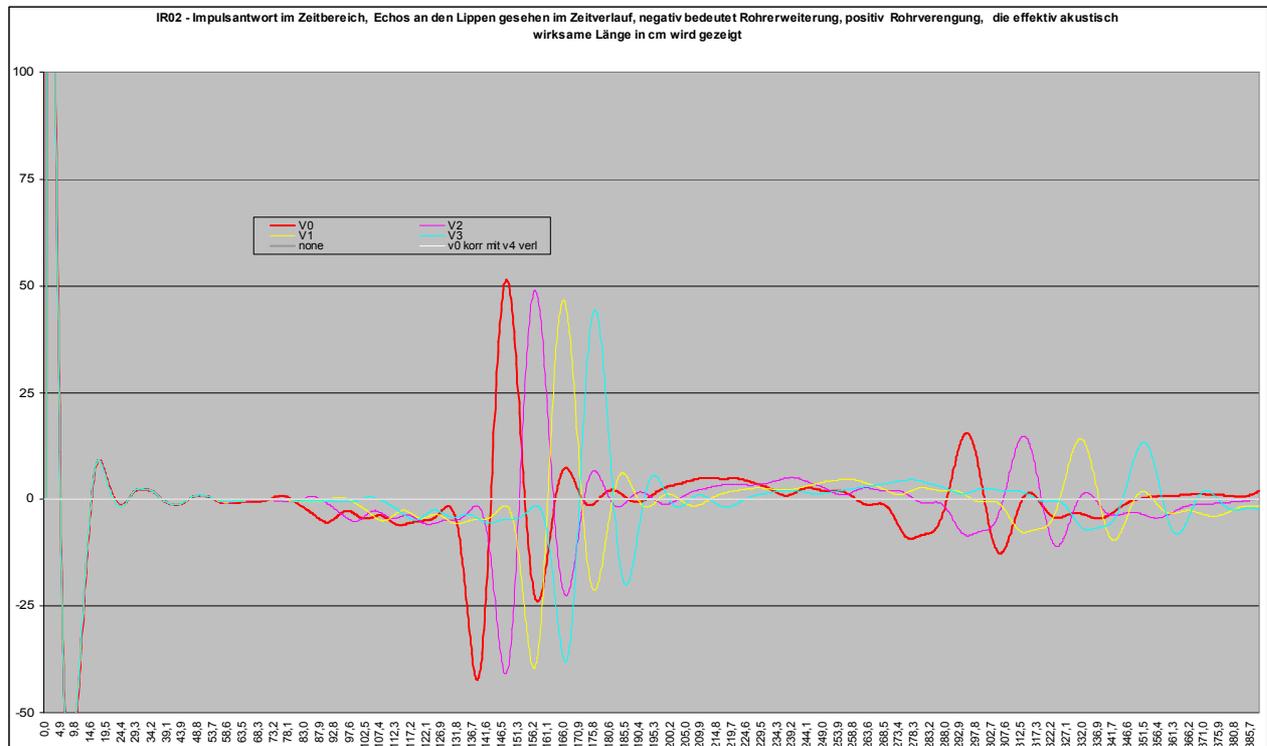
Der Mundstückbeginn ist hier bei 0cm, bei rund 9cm immer ein Reflex, der durch den Mundstückkessel verursacht wird. Generell haben Reflexe eine „Breite“ die sich durch die Filterfunktion des Mundstückes ergeben. Bei 137cm ein negativer Ausschlag = Bell Minima Reflex, bei 147cm ein positiver Ausschlag = Bell Maxima Reflex. Der Maxima Reflex entspricht der 2x der Strecke, die Schallwellen in freier Luft anhand der Schallgeschwindigkeit zurücklegen, also der Zeit die ein Impuls benötigt um vom Mundstück zum Schallbecher und wieder retour gelangen! Es ergibt sich eine „Roundtrip“ Time = Zeitspanne, die vergeht wenn ein Impuls von den Lippen ausgeht und zu diesen das 1. mal wieder zurückkehrt.

Bei einer Bb-Trompete mit einer akustisch wirksamen Rohrlänge  $V_0 = 1,47\text{m}$  benötigt der Schall hierfür  $\sim 8,5\text{ ms}$  bei Raumtemperatur. Während dieser Zeit sind die Lippenschwingen auf sich „alleine“ gestellt und werden noch nicht von einer stehenden Welle unterstützt, die sich erst aufbauen könnte. Im Fall eines notierten hohen C3 = Mode 8 = 8 ganze Schwingungen lang, bei tieferen Moden sind es entsprechend weniger. Umso länger die Rohrlänge ist, desto länger fällt der Einschwingvorgang aus und auch die Intensität der Reflexe nimmt ab. Neben der zeitlichen Abstände können daher anhand der Reflexstärken weitere Aussagen zu Dämpfung, Verlusten, Undichtheit und vielem mehr gewonnen werden.

Nimmt man ein Maßband und beginnt ein Instrument abzumessen wird man rasch feststellen, daß die physische Länge nicht mit der akustisch wirksamen Länge anhand der Bell Maxima übereinstimmt. Die physische Länge ist immer viel kürzer (bei einer Bb-Trompete mit Mundstück rund 10 cm).

Das Mundstück hat zudem eine akustisch wirksame Länge, die mit der Tonhöhe stark variiert. Misst man die Impulsresponse eines Trp. Kesselmundstück + Mundrohr + zylindrisches Rohr in Boresize und dazu als Referenz das zylindrische Rohr in selber Länge, so ergibt sich eine „over-all“ bzw. „globale“ akustische wirksame Mehrlänge von rund 20mm, gegenüber dem gleichlangen zyl. Rohr. Diese grundsätzliche Mehrlänge muß von den gewonnenen Impulse-Response Positionen abgezogen werden, um den tatsächlichen physischen Abstand vom Mundstückrand, z.b. zu einer lokalen Störung zu ermitteln.

Für die effektive Mehrlänge durch Ventilschlaufen kann dagegen direkt die (da schon akustisch wirksame) Längendifferenz zu  $V_0$  verwendet werden, hier sind auch bereits Abweichungen durch zusätzliche Verluste enthalten. Speziell im Fall von Perinet Ventilen und notwendigen Zuglängen ist das praktisch, da hier 3 unterschiedlich lange und gekrümmte Ventildurchgänge vorliegen.



Impulse Response von ms auf cm akustisch wirksame Länge umgelegt, hier sichtbar 1. und 2. Pulsantwort. Verschiedene Ventillängen übereinandergelegt, deutlich erkennbar die Abschwächung der Reflexe anhand Mehrlänge und Verlusten. Bell IR-Minima Position / 2 ~ 20mm im Fall eines Trp. Mundstückes ergeben die physische Position einer „akustische Mitte“ (XM), auf die später noch intensiv eingegangen wird.

Lokale Störstellen äußern sich in der Impulsantwort als vorzeitige Reflexe. Die Impulseresponse hat jedoch auch ohne „Störungen“ immer eine sehr wellige Form. Ein zuerst negativer Ausschlag, gefolgt von einem positiven Ausschlag deutet auf eine lokale Rohr Erweiterung (Enlargement) hin, z.B. ein Stimmzug-Gap.

Ein zuerst positiver Ausschlag, gefolgt von einem negativen Ausschlag entsteht anhand einer lokalen Einengung (Constriction), z.B. eine größere Delle. Leider verdecken allerdings immer näher am Mundstück liegende Störungen und deren Reflexe darauf folgende kleinere Reflexe. Dadurch sind auch mehrere kurz nacheinander liegende Störungen teilweise nicht erkennbar. Es bedarf hierzu schon detektivischem Gespür und Erfahrungen, wie Impulsresponse Auswertungen anderer Instrumente aussehen, spez. bei vorhandenen Fehlern, als auch Undichtheiten. Dieser Punkt wurde hier nur angesprochen und wird ausführlich in Kapitel 5 und 6 dieser Arbeit behandelt.

## Lokale Änderungen und deren globale Auswirkungen

Es ist sehr bedeutsam zu erkennen, daß lokale begrenzte Änderungen der Querschnittfläche (Durchmesser) - ab nun als „Perturbation“ bezeichnet - positionsabhängig starke lokale Effekte haben, global aber dafür teils gegenteilige Auswirkungen ergeben. Bei Messungen ist die globale Auswirkung einer lokalen Perturbation eine Änderung von Tonhöhen und Magnituden der Modes an der Lippeebene.

Im Zeitbereich ist es so, daß Energie durch vorzeitige Reflektionen der Hauptreflektion nicht mehr zur Verfügung steht, andererseits könnte durch gezielte „early“ Reflections – der Einschwingvorgang bestimmter Töne begünstigt werden, oder wenn unpassend auch stark verschlechtert werden, ähnlich dem selben globalen Effekt durch längere Rohrlängen und höherer Modes - meist daher nur als „Hilfsgriffe“ bezeichnet und verwendet. Siehe dazu RF = Reflection Factor, Sideletter #2.

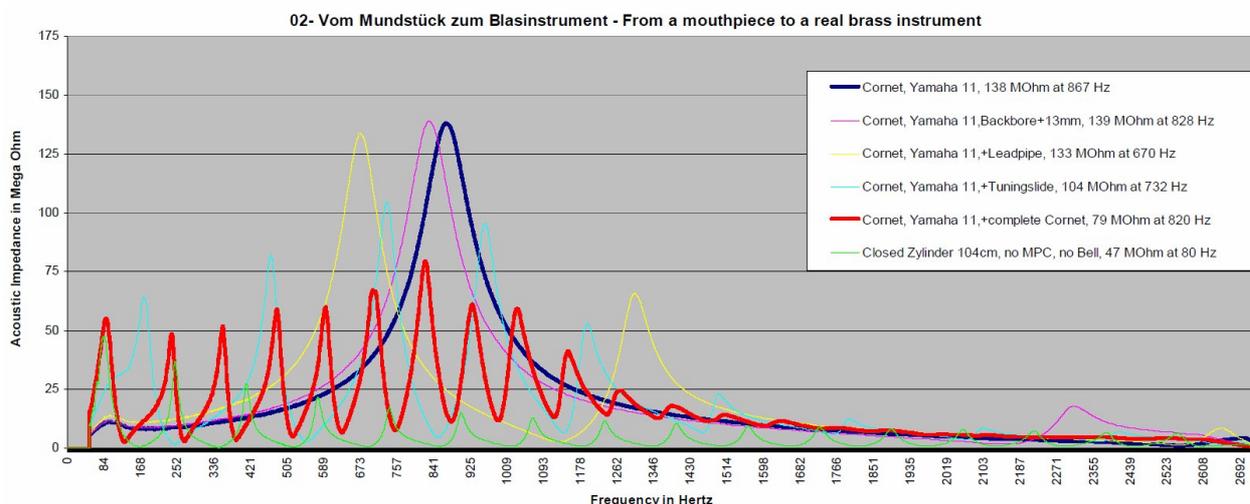
Kennt man die globalen Auswirkungen von lokalen Änderungen oder vorhandener Abweichungen, dann lassen sich diese gezielt platzieren. Einzelne Töne lassen sich praktisch aber nie verändern. Möchte man einen bestimmten Vorteil erzielen, dann muß man leider meist etliche Nachteile in Kauf nehmen. Man wird daher versuchen, die Nachteile möglichst auf Bereiche (Töne) zu verlagern, die nicht verwendet werden. Klingt sehr einfach, ist aber oft nur sehr schwer umsetzbar. Eine gute Strategie ist es daher, vorhandene Abweichungen zu lokalisieren und eventuell zu korrigieren, bevor zusätzliche gesetzt werden.

## Mundstücke und Mundrohre

Diese müssen zurecht als sehr wichtige Komponenten für Stimmung und Ansprache, vor allem im mittleren und hohen Spielbereich angesehen werden. Überspitzt ist ein Mundrohr die Verlängerung des Mundstücks und das restliche Instrument samt Schallbecher die Verlängerung von Mundstück und Mundrohr.

Kesselmundstücke bestehen aus einem Kessel, einer Einengung = Seele und einem Backbore bzw. Hinterbohrung. Üblicherweise gehen diese 3 Elemente fließend ineinander über, das ist aber prinzipiell für die grundlegende Funktion nicht notwendig, ebenso wäre ein runder Querschnitt bei Instrumenten nicht zwingend notwendig, ist in der Produktion und insgesamt mit Abstand aber am einfachsten zu realisieren.

Das Mundstück wirkt als Helmholtz Resonator. Dieser entwickelt in Abhängigkeit von Kesselvolumen und Länge+Bohrung einer Engstelle (Seele) eine ausgeprägte Resonanzfrequenz. Diese lässt sich auch feststellen und hören, wenn man mit der Hand auf den Kesselrand klatscht; durch das plötzliche Verschließen entsteht ein kurzes „Popping“-Geräusch bzw. Ton, dieser entspricht in der Tonhöhe der 1. Resonanz oder MPC = Mundstück Popping Frequenz. Kurze Mundstücke haben nur diese 1. ausgeprägte Resonanz, z.B. Kornettmundstücke. Ist das Mundstück länger (Trompete), dann entsteht eine weitere Resonanz oberhalb des Spielbereichs. Wird das Kesselvolumen vergrößert sinkt die 1. Frequenz; wird es verkleinert, dann steigt diese Frequenz. Wird der Querschnitt der Hinterbohrung vergrößert steigt ebenfalls die 1. Frequenz und fällt bei einer Querschnitt-Reduktion. Der Durchmesser und Länge der Seele wirken im Endeffekt so, daß ein Aufweiten oder Verkürzen die Impedanzmagnitude – also die Einflußkraft des Mundstückes reduzieren.



Wird ein Mundstück mit einem Rohr verlängert, so bilden sich anhand der Länge mehr und mehr mögliche Resonanzen. Diese werden logischerweise mit Längenzunahme auch immer tiefer.

Hier am Beispiel eines Kornett Mundstückes, das Schritt für Schritt zum kompletten Instrument samt Schallbecher komplettiert diese Eingangsimpedanz Kurven in den verschiedenen Stadien ergibt.

Wie man sieht behält auch das komplette Instrument die starken akustischen Auswirkungen des Mundstücks und seiner mächtigen Resonanz im Magnitudenverlauf. Das Mundrohr in diesem Fall stark „konisch“ \*; reduziert die maximal mögliche Magnitudenerhöhung zwar stark, verbreitert allerdings den Mundstück-Effekt, speziell für tiefere Frequenzen, die dadurch ebenfalls stark in der Magnitude angehoben werden.

Im Gegensatz ist dazu ein zylindrisches Rohr ohne Mundstück, einseitig geschlossen (an der Messkopffseite) hellgrün eingetragen und leider etwas schwer sichtbar. Es ist rund 40cm kürzer als das komplette Kornett und liegt zwischen der Länge der hellblauen und roten Kurven. Hier sind die Magnituden wesentlich geringer, bleiben allerdings bei höheren Moden nach wie vor stark ausgeprägt.

Beim exemplarischen Kornett samt Schallbecher (rot) sorgt dieser durch die sogenannte Hornfunktion für immer weniger Reflektionen, bei rund 1200 Hz sind die Reflektionen bereits so stark reduziert, daß beinahe nur noch Abstrahlung höherer Frequenzen erfolgt, man bezeichnet dies als obere Cut-Off Frequenz – wie man sieht ist es aber ein fließend verlaufender Frequenzbereich, kein plötzlicher „Schnitt“.

„konisch“ \*: Immer wenn bei einem Instrument „konisch“ steht ist dies nicht unbedingt strikt der Fall! Es wird meist als Abkürzung für „sich irgendwie im Durchmesser erweiternd“ ebenso verwendet, das macht akustisch aber große Unterschiede! Der kurze englische Begriff „flaring“ wäre hier eigentlich passender.

## MPC EL – equivalent Length / äquivalente Längen geschlossener Zylinder:

Ein Kesselmundstück ändert in Verbindung mit Rohren seine akustisch wirksame Länge mit der Frequenz. Vorhin habe ich bereits erwähnt, daß es eine „overall“ größere akustische Länge hat als ein Zylinder. In Verbindung mit dem Mundrohr bei der Testtrompete sind das ~ 20mm. Es wirkt also länger = tiefer als es tatsächlich ist. Hinzu kommt nun aber, daß das nur an einer bestimmten Frequenz der Fall ist. Bei tieferen Frequenzen wirkt es dagegen kürzer, bei höheren Frequenzen allerdings noch viel länger. Im Endeffekt bewegen sich die wirksamen Längenunterschiede von tief bis hoch bei rund 10 cm! Die verbreiternde Wirkung eines Mundrohres wurde auch bereits angesprochen. Gemeinsam mit dem Schallbecher werden Frequenzen tiefer Modes gegenüber Zylindern stark erhöht, das Mundstück senkt in Verbindung mit einem Mundrohr allerdings höhere Frequenzen oberhalb der MPC Popping Frequenz gleichzeitig stark ab.

Man kann verallgemeinernd sagen, ab ca. einer  $\frac{1}{2}$  Wellenlänge die der MPC Popping Frequenz entspricht, dh. bei ca. der Hälfte der Popping Frequenz = um 400 Hz je nach Kesselvolumen wird das Mundstück + Mundrohr die dominierendere Größe für Frequenzänderungen, darunter ist der Schallbecher mit seiner höheren Phasengeschwindigkeit bei tieferen Modes die vorwiegende Quelle für Frequenzerhöhungen gegenüber einem Zylinder selber Länge. Tiefe Modes können daher durch ein anderes Mundstück und Mundrohr kaum stark abgeändert werden, dies gelingt eher schallbecherseitig. Hohe Frequenzen sind in der Domäne von MPC, Mundrohr und Bellskirt! Damit diese Übersicht kompakt bleibt, stoppe ich hier vorerst.

## Reflektionen, Schallbecher, die Horngleichung und Hornfunktion

Eine Reflektion findet grundsätzlich immer dann statt, wenn es zu einer Änderung des Wellenwiderstandes kommt. Ein unendlich langes Rohr hat eine charakteristische Impedanz, die bestimmt und berechnet werden kann. Engere Rohre haben eine höhere WI, auch ein endliches Rohr hat eine ähnliche charakteristische Impedanz. Bei Blechblasinstrumenten ist die WI stark abhängig von Mundstück, Schallbecher, Verlusten und wiederum Frequenz. Auch der freie Raum hat eine (aber extrem kleine) Wellenimpedanz. Kommt es zu einem abrupten Ende wie bei einem offenen Zylinder oder Tonloch, dann ist das vergleichbar mit einem Bore-Step von einem engen Rohr in ein extrem weites Rohr (dem Raum), verbunden mit einer extremen Änderung des Wellenwiderstandes. Daher kommt es an offenen Enden überhaupt zu diesen starken Reflektionen und Phasendrehung. Endkorrekturen bei sprunghaften Enden (enge Zylinder) könnte man sich bildlich in etwa wie etwas herausquellende Luftblasen vorstellen, ebene Wellenfronten nehmen nun eine kugelförmige Form an. Das Rohr wirkt akustisch länger als es ist. Bei Hörnern bzw. deren Bellskirts = stark ausschweifender letzter Teil = Stürze - übersteigt das momentan aber meine eigene Vorstellungskraft.

Bei Hörnern ist dieser letzte „Step“ nicht abrupt für alle Frequenzen, sondern wird über die Horngleichung und von der Hornfunktion  $U > 0$  beschrieben. **Schallbecher sind frequenzabhängige Impedanz-Wandler.**

Im Gegensatz zu Hörnern für Lautsprecher, die dimensioniert sind, um möglichst viel Energie und Schall abzustrahlen, sind Schallbecher bei Blechblasinstrumenten dermaßen konzipiert, daß sie möglichst viel reflektieren und wenig abstrahlen (tiefere Frequenzanteile). **Das klingt fürs Erste ziemlich erschreckend!**

**Die Krümmung der Steigung** =  $F''(x)$  d.h. die 2. Ableitung einer Querschnittänderung als Funktion ist dafür verantwortlich, **daß sich Wellenfronten im Schallbecher schneller als in freier Umgebung fortpflanzen.** Höhere Modes sind davon kaum betroffen. Die höchsten Phasengeschwindigkeiten erreichen Frequenzen gleich oberhalb einer (unteren) Cut-Off Frequenz, die stark „überhöhte“ Geschwindigkeit reduziert sich dann rasch auf ein „normales“ Geschwindigkeitsniveau mit steigender Frequenz. Vereinfacht gesagt werden tiefe Modes bereits früher im Schallbecher und bei bereits geringer Krümmung reflektiert, hohe Modes erst viel später bei einer höheren Krümmung der Steigung. Ist eine Frequenz bereits reflektiert spielt es daher nur noch eine untergeordnete Rolle ob sich der Schallbecher am Ende = Bell Skirt noch weiter stärker krümmt oder überhaupt noch vorhanden ist!

Will man eine Reflektion erzwingen, dann muß eine plötzlich stark erhöhte Krümmung her! Sogenannte Besselhörner als auch Kombinationen von Katenoid-Horn Segmenten als beliebte Beispiele liefern solche starken Krümmungen der Steigung. Aber meist wird man auf freie Formen stoßen, die historisch bedingt sind und denen ev. auch keinerlei mathematische Funktion zu Grunde liegt. Aus allen Formen lässt sich anhand ihrer Geometrie deren Hornfunktion „U“ annähern, diese wiederum beschreibt eine obere Cut-off Frequenz und eine Barriere anhand einer „Potential – Wand“, welche tiefere Frequenzen nur schwer durchdringen können (werden kaum abgestrahlt), höhere tunneln bereits stärker durch und ober der Cut-off Frequenz ist die „Barriere“ nicht mehr vorhanden und die gesamte Schallenergie wird abgestrahlt. **Dies bedeutet, daß eine Unterstützung der Lippenschwingung durch eine stehende Welle nicht mehr stattfindet.**

Ein Zylinder und Konus haben keine Krümmung der Steigung, hier ist die Phasengeschwindigkeit gleich der Schallgeschwindigkeit in freier Umgebung, wo sich Schall dann kugelförmig = „sphärisch“ ausbreitet und die Phasengeschwindigkeit nicht dispersiv = frequenzabhängig variiert. Bei einem linearen Konus kommt es erst am offenen Ende zu einer Reflektion, ebenso bei einem offenen Zylinderende.

**Ein Frustum** closed-open ist laut meiner Definition eine Abkürzung für einen linearen Konus mit fehlender Spitze, = ein Kegelstumpf, an dem das kleine Ende akustisch verschlossen und das große Ende offen ist.

Generell geht man aktuell davon aus, daß sich Schallwellen innerhalb von sogenannten „Waveguides“, und das finde ich treffend - habe noch keine besser passende deutsche Übersetzung dazu parat - erzwungen nun unterschiedlich fortpflanzen sollten. In engen zylindrischen Rohren als „ebene = plane Wellenfronten“ und „plattgedrückt ausgebildet“, weil ohne Steigung, in konischen und „flaring“ Hörnern aber wiederum sphärisch / halbkugelförmig.

Das ist nicht ganz eindeutig geklärt, und bereits Dr. Benade ging ~ 1970 eher von einer „Mischform“ der Wellenfronten aus. Was diese Form allerdings mit Stimmung und Intonation sowie Radiation bedeuten soll ist mir nach wie vor ein Rätsel. Schließlich muß der Impuls bei Reflektion ja auch wieder zurückwandern. Wie sieht dies dann aus und welche Auswirkungen hat das dann? Auch die Radiation Impedanz ist nach wie vor nicht restlos geklärt. Dadurch kommt es bei Simulationsmodellen zu teils sehr großen Abweichungen. Manche physische Modelle gehen von einem Loch bzw. einem Ventil (Kolben) in einer sehr großen Wand aus (das Loch in diese Wand wäre das Schallbecherende); andere von einer pulsierenden Kugel im Raum (((?))) Schwierig. Keines diese Szenarien entspricht den tatsächlich vorliegenden Abläufen exakt.

Die mathematische Horngleichung als Differentialrechnung aufgestellt - geht von moderaten Änderungen der Krümmung aus und ist bei großen Krümmungssteigerungen, die bei Trompeten Bell-Skirts auftreten aber überfordert! Diese Gleichung wurde auch vorwiegend für das Gegenteil aufgestellt: Möglichst maximaler Energieaustausch / Modematching mit möglichst geringen Reflektionen am Hornende zurück in das Horn.

Verluste werden in der Literatur oft argumentiert, daß Schallwellen sich kugelförmig ausbreiten würden, durch enge zylindrische „Waveguides“ dadurch aber behindert werden. Luftmoleküle stoßen **so vermehrt** zusammen, das gibt extra Reibung / Wärme -> Verluste. So würden Randschichten mit viskothermalen Verlusten bestehen, etc.). Auch die Abstrahlung durch den Schallbecher selbst zählt man so zu Verlusten!

Es sollte insgesamt deutlich werden, daß Abstrahlung und Reflektion in einem Verhältnis stehen müssen, das den Anforderungen von Blechbläsern entspricht. Einerseits sollen starke stehende Wellen gebildet werden um die Lippenschwingungen zu unterstützen, und dass macht einen Großteil der eingebrachten Energie aus, andererseits sollen „Klänge“ ausreichend stark abgestrahlt werden.

## Luft und Lippen

In Zeiten der „Covid-Pandemie“ die gerade kursiert kommt jemand vielleicht schnell auf die Idee, mit einem Trompetenschallbecher wäre man automatisch ein „Super-Spreader“, also jemand der Aerosole und auch Corona Viren effizient, stark und vor allem sehr weit versprühen könnte. Dies würde eine Luftmenge und Geschwindigkeit voraussetzen, die allerdings nicht möglich ist. Tatsächlich bewegt und tauscht sich die zugeführte Luft, auch wenn heftig geblasen wird nur äußerst langsam aus. Man schafft es daher auch nicht, mit einer Trompete eine Kerze auszublasen – versuchen Sie es!

Es ist absolut nicht notwendig Luft durch das Instrument zu blasen! Das wird viele jetzt erschrecken, ist allerdings eine Tatsache und eventuell eine große Hilfe seine persönliche Herangehensweise beim Spielen eines Blechblasinstrumentes zu finden. Zahlreiche Versuche belegen das und ebenso wird bei Messungen mit dem Messkopf keinerlei extra Luft zugeführt.

Wir verwenden den Luftstrom allerdings dazu, die Lippen am periodischen Öffnen und Schließen des Lippenspaltes = schwingen zu halten. Die Lippen sind für die Tonerzeugung verantwortlich, die Luftsäule im Blechblasinstrument unterstützt dabei sofern sich stehende Wellen passender Länge bilden können = Resonanzen oder behindert aber die Lippenschwingungen bei ausgeprägten Antiresonanzen.

Dies war ein kompakter Überblick über mein Brassissima Projekt. Alle Themen wurden nur kurz angesprochen oder gestreift und werden detailliert in den einzelnen Teilen meiner Arbeit durchleuchtet.

Ich hoffe, ich konnte einige Aspekte vielleicht aus einem neuen Blickwinkel aufzeigen und freue mich wenn Sie aus meiner Projektarbeit den einen oder anderen verwertbaren Nutzen ziehen können.

**Anhang:**

Von mir verwendete Abkürzungen / Shortcuts / Bedeutung:

<b>Abkürzung / Shortcuts:</b>	<b>Deutsch</b>
Acoustic Impedance	Verhältnis von Schalldruck zu Schallfluß
Ampl. Max.	Eingangsimpedanz Peak Maxima Pot.
Ampl. Min.	Eingangsimpedanz Peak Minima Pot.
Ampl. Pot	Potential einer Änderung der Eingangsimpedanz-(Peak Maxima)
Amplitude	Eingangsimpedanz Potential Peak
Antinode	ein Maximum oder Minimum – Gegenteil von Node / Nulldurchgang
attenuation / decrease	Abschwächung
Bb Trompete	B Trompete
Bell	Schalltrichter
Bell Flare	das ausladende Schallstückende
Bore size	Bohrung, Durchmesser oder Radius eines zylindrischen Rohres
Cent	1/100 eines Halbtones in gleichmäßig schwebender Stimmung
Change	Änderung
Clock	Uhr
Closed (Cone / Zyl)	geschlossen (hier einseitig) Konus / Zylinder
Constriction / Constr.	lokale Einengung Durchmesser
Druckbauch / Press. Max	Druckbauch / Max. (Maximale Fluktuation zwischen Über- und Unterdruck)
Druckknoten / PrNode	Druckknoten / Umgebungsdruck
Dyn. Bandwith:	wie sehr ein Grundton durch Harmonische beeinflusst werden kann
Einengung	lokale Einengung Durchmesser
Enlargement / Enl.	lokale Erweiterung Durchmesser
Equivalent Length	akustisch wirksame Länge mit Frequenz veränderlich
Eqv L	akustisch wirksame Länge mit Frequenz veränderlich
Erweiterung	lokale Erweiterung Durchmesser
ET	gleich schwebend temperierte Stimmung
Even	gerade Vielfache des Grundtones
Flow	Schallfluß
Fractional Return:	Anteil Energie, die zu den Lippen zurückkommt
Gap	Eine Diameter Erweiterung / (gewollt/ungewollt)
GT	Grundton
Harmonische	mathematisch, aufsteigend ganze Zahlen
harmonic - math.	alle aneinanderfolgende ganze Zahlen (ohne Unterbrechung)
Hole	Loch
HT Frequenz Achse:	Auswertungen über die Frequenz - mit Fehlerstreuung
Impedanz; / Impedance	Verhältniss von Schalldruck zu Schallfluss
JI	Just Intonation = reine Stimmung bezogen auf Grundton
Kesselvolumen	Volumeninhalt des Mundstück-Kessels
Konisch / conical	als Bezeichnung für "sich erweiternd" verwendet, auch ohne fixen Winkel
KT	Kammerton
Level	Lautstärke / Ausführung ppp - fff
lower(s)	vertieft (Tonhöhe)
Magic Spot	bestimmte Stellen, siehe Kennkurven
Main Bore:	Bohrung des zyl. Anteils
Mpc	Mundstück
Mpc Eqv. L	akustisch wirksame Länge des Mundstücks
MPipe	Mundrohr
MR	Mundrohr
MW	Mittelwert
Node	Knotenpunkt / an Nulllinie
NT #	Naturton Nr.
NT1	Grundton
Nulldurchgang	Linie schneidet bei 0
Obertöne / harmonics	Obertöne / "mathematisch" harmonische des Grundtones
ODD	ungerade Vielfache des Grundtones

open	offen
Peak	Impedanzmaxima / Spitze
Perturbation	Störung, lokale Veränderung Durchmesser
Pitch	Tonhöhe / Frequenz
Pitch Pot.	Potential einer Tonhöhenänderung
Popping frequ	1. Resonanz des Mundstückes
Press. Mln. / Pmin	Druck - der jeweilige Niedrigpunkt eines lokalen Unterdrucks/min. Schwankung
Press.Max. / Pmax	Druck - der jeweilige Höhepunkt eines lokalen Überdrucks/max. Schwankung
Pressure	Luftdruck
Q-Faktor / Resonanzgüte	Wie schwer es ist, die Tonhöhe (mit Lippen) zu ändern Hoch = schwerer
raise(s)	erhöht (Tonhöhe)
reine Stimmung	Just Intonation = reine Stimmung bezogen auf Grundton
reinforcement / increase	Verstärkung
Roundtrip Time	Zeitdauer Signal von Lippen zu Schallbecher + zurück in 1/1000 Sekunden
Standing Wave	Stehende Welle / Luftsäule im Instrument
Std. Pert.	Standardänderung: Hülse oder Erweiterung, Radius 0,5mm, Länge 20mm
stehende Welle	die stehende Luftsäule
Stengelvolumen	Volumeninhalt des Mundstückschafes/Rückbohrung/Stengels
Strahl - Linien	Gerade, die sich fortsetzen würde
Stürze	Schallbecher-Ausladung
Umkehrpunkt	bestimmte Regionen/Positionen, siehe Kennkurven
V0	kein Ventil gedrückt
V0-16cm	Verkürzungsventil! 2 Halbtöne höher als V0
v1	1. Ventil gedrückt (1 Ganzton länger/tiefer)
v123	1+2+3, -Ventil gedrückt ( 6 Halbtöne länger/tiefer)
v3	3. Ventil gedrückt (1 1/2 Ganzton länger / tiefer)
Valve	Ventilschleife - Längenverhältnis zu V0+
velocity	Geschwindigkeit
Versatz / Offset	Korrekturwerte/Abweichungen
Wave Impedance:	Das Umfeld innerhalb des Instruments
Wgt / Weighting	Gewichtung nach Summenprinzip Wogram
Wiener Klappen/Löcher	Überblasklappen/Löcher
WL	Wellenlänge
XM	der bestimmte Punkt in der Mitte bei x
XM-IN bzw. XM-Ampl	der Impedanz Nulldurchgang in der Mitte bei x
XM-PN bzw., XM-Pitch	der Pitch Nulldurchgang in der Mitte bei x

## Glossary:

## Used Shortcuts / Definitions:

<b>Abkürzung / Shortcuts:</b>	<b>English</b>
Acoustic Impedance	Ratio of Pressure to Flow
Ampl. Max.	Input Impedance Maxima Peak
Ampl. Min.	Input Impedance Minima Peak
Ampl. Pot	potential of changes to input impedance (maxima peak)
Amplitude	Input Impedance Potential
Antinode	antinode
attenuation / decrease	attenuation / decrease
Bb Trompete	B flat trumpet
Bell	bell
Bell Flare	Bell Flare
Boresize	radius oder diameter of cylindrical tube
Cent	1/100 of e semitone in equal tempered scale
Change	change
Clock	clock
Closed (Cone / Zyl)	closed (here at one end) conical / cylindrical tube
Constriction / Constr.	local constriction of diameter
Druckbauch / Press. Max	Pressure Antinode (Max. Pressure)
Druckknoten / Press. Min	Pressure Node / Min. Pressure)
Dyn. Bandwith:	how much a 1st partial can be influenced by higher harmonics
Einengung	local constriction of diameter
Enlargement / Enl.	local enlargement of diameter
Equivalent Lenght	equivalent acoustic Lenght, changes with frequency
Eqv L	equivalent acoustic Lenght, changes with frequency
Erweiterung	local enlargement of diameter
ET	equal tempered scale
Even	even numbers of 1st natural
Flow	Acoustical Flow
Fractional Return:	Fractional retourn of enery to the lipps.
Gap	an Enlargement (wanted oder not wanted)
GT	1st Natural / root tone
Harmonische	mathematical ascending whole numbers
harmonic - math.	harmonic series
Hole	hole
HT Frequenz Achse:	half-tone frequency analysis - with error compensation
Impedanz; / Impedance	Ratio of acoustic pressure to flow
JI	JI = just intonation, related to 1st harmonic. (root)
Kesselvolumen	volume of mouthpiece cup
Konisch / conical	often use only as description of taper / not only with a fixed rate
KT	Concert Pitch
Level	Volume Level ppp to fff
lower(s)	lowers (pitch)
Magic Spot	magic spots, see "Regions of Interest"
Main Bore:	Main Bore Size
Mpc	Mouthpiece
Mpc Eqv. L	Mouthpiece eqv. Length
MPipe	Leadpipe
MR	LeadPipe
MW	Mean Value
Node	node
NT #	Natural Tone #
NT1	1st natural tone
Nulldurchgang	zero crossing
Obertöne / harmonics	overtones of the 1st natural tone

ODD	odd numbers of 1st natural
open	
Peak	impedance maxima peak
Perturbation	disruption, local change in diameter
Pitch	Frequenzy of natural tone
Pitch Pot.	potential of pitch changes
Popping frequ	1st resonant frequency of Mouthpiece
Press. Node / PrNode	Pont of the Pressure Node
Press.Max. / Pmax	Point of the max. Pressure Antinode (+/- fluctuation)
Pressure	air pressure
Q-Faktor / Resonanzgüte	how easy it is, to correct the pitch up/down with (the lips) lower=easier
raise(s)	raises (pitch)
reine Stimmung	J1 = just intonation, related to 1st harmonic. (root)
reinforcement / increase	reinforcement / increase
Roundtrip Time	Time span from lips to bell and back in 1/1000 seconds.
Standing Wave	standing wave inside the instrument
Std. Pert.	Definition: Gap oder sleeve with radius 0,5mm and Lenght 20mm
stehende Welle	standing wave
Stengelvolumen	volume of mouthpice backbore
Strahl - Linien	ray-line which would continue
Stürze	Bell
Umkehrpunkt	turning points, see "Regions of Interest"
V0	no valve is pressed – without valve loops
v0-16cm	is a shortening valve! 2 semitones higher / shorter then V0
v1	1st valve pressed / 2 semitone longer, lower)
v123	1st+2nd+3rd Valve pressed (6 semitones longer/lower)
v3	3rd valve presse / 3 semitones longer, lower
Valve	valve pressed / ratio to V0 (no valve pressed)
velocity	velocity
Versatz / Offset	offset / displacement
Wave Impedance:	typical impedance inside the instrument
Wgt / Weighting	Weighting Level Sum prinzip after Wogram
Wiener Klappen/Löcher	Vienna Keys, open Holes
WL	wavelenght
XM	the specific point in the middle at x
XM-IN1 or XM-Ampl1	the impedance zero crossing in the middle at x
XM-PN oder XM-Pitch	the pitch zero crossing in the middle at x

A.R.T. = Acoustical Research Toolkit    open source Simulation Software  
OW = OpenWind © Inria, France    open source Simulation Software  
©Bias, ©Bios by Artim    commercial Simulation Software

**Begriffe, richtig gedeutet:**

Frustum	=	Kegelstumpf, Konus mit fehlender Spitze
Apex/Vertex	=	Spitze
Throat	=	(Hals) .....Verengung / Einschnürung / (Mundstück-Seele)
Mouth	=	(Mund) .....gemeint ist immer das größere, offene Ende -->
flare, flaring	=	Ausladung, ausladend, erweiternd (->> Richtung Schallbecher)
tapered	=	zugespitzt, verjüngt, konisch (<<- Richtung Mundstück)
MPC Cup	=	Mundstück Kessel (teilweise egal welche geometrische Form)

**Umrechnungsformeln: Freq.Faktor nach Cent & vs., Wellenlänge, etc.**

Kreisfläche	S = pi * ( r <sup>2</sup> )	oder pi * (d <sup>2</sup> ) / 4
Radius aus Kreisfläche	Wurzel aus ( S / pi)	
Kreisumfang (Perimeter)	2 * pi * Radius	oder Durchmesser*pi
Freq. Faktor nach Cent:	Log(Faktor;2) * 1200	1/Frequ. Faktor = Längenfaktor
Cent nach Freq. Faktor:	2 <sup>(1/1200)^Cent</sup>	
λ = WL Wellenlänge in m:	Speed m pro Sek / Frequenz in Hz,	Equiv. L Fundamental Cone = c / 2 f
¼ WL Wellenlänge in cm:	(Speed/Frequenz)*100/4	Equiv. L Cyl.Fund. closed-open = c / 4 f
Schalldruck oder Ohm in dB	=20*log10(Ohm oder Pascal)	log. dB nach linear Ohm = 10 <sup>(dB/20)</sup>
-6db = 50%, -3dB= 70,71%	-20dB = 10% +6dB= 200%	100 Mohm = 160dB
Kraft F=m*a (Masse * Beschl.)	=kinetisch, potentielle Kraft: F= -k*x	-k =Federkonstante, x = Auslenkung

**Zusammenhänge von Zeit – und Raum Einheiten (in Metern und Sekunden):**

Wellenlänge, Wellenzahl und Kreiswellenzahl sind die räumlichen Analogon zu den zeitlichen Größen Periode, Frequenz und Kreisfrequenz.

T	Periode	=	Kehrwert der Frequenz	= 1 / f	Sek/~	Δt = φ° / 2pi * f
f	Frequenz	=	Kehrwert der Periode	= 1 / T	~/Sek,	f = φ° / 2pi * Δt
f	Root (n=1)	=	Speed / Wellenlänge			
(1/λ)	Wellenzahl (WL k)	=	Speed / (Wellenlänge * n)			mit steigender Freq.: steigt linear diagonal
ω	Kreisfrequenz	=	Kehrwert der Wellenlänge	= 1 / λ		
	= Winkelfrequenz	=	Faktor Freq. zu Speed c	= f / c		= k / 2*pi
π	Konstante Pi	=	Frequenz * 2 * π	= 2 * π / T		Zahl steigt stark diag.
rad	Radian = Bogenmaß	=	Angular Freq. = Radiant/Sek	= Kreisumrundungen/T, ω = k * c		
rad	=1,0	=	½ Umrundung Kreis (180 Grad)= π	= 3,14... =1/2 Schwingung		
Phasenwinkel phi φ°	in rad	=	1 * Umrundung Kreis (360 Grad)= π * 2	= 6,28... = 1/1 Schwingung		
cos (phi φ°)	Winkelfunktion	=	Verhältnis Kreisbogen/6,28..	1 rad=360/2pi = 1WL / 6,28...		
sin (phi φ°)		=	w * t, Winkeldifferenz 2er Wellen φ°(w)	= arctan (w /w0)		
tan		=	eilt sin +90 Grad = ¼ λ voraus	cos (π /2) = 0		
λ	Wellenlänge	=		sin (π/2) = +1		
k	Kreiswellenzahl	=	Steigung=(dy/dx),(sin φ°/cos φ°)	arctan (tan) = phi φ°		
(k <sup>2</sup> = w <sup>2</sup> / c <sup>2</sup> bzw. 1/c <sup>2</sup> * w <sup>2</sup> )		=	Geschwindigkeit / Frequenz	= c / f		= T * c, = 2π / k
k(n)		=	Wellenzahl * 2 * π	= (1 / λ) * 2 * π		steigt linear diagonal
k(n)		=	spatial Frequency	= 2 / (π * λ)		
		=	Radiant pro m	= (2*π *f) / c		½ Pi wo Freq = ¼ WL
		=	k =	= ω / c		1Pi wo Freq = 1/2 WL
		=		= 2*π / λ		2Pi wo Freq = 1 WL
		=		= π		
		=		= Mode # (n)		

**Mittlere Phasengeschwindigkeit nicht dispersierend (=c0):**

c od.v Speed od. Velocity	=	Wellenlänge / Periode	= λ / T	Wellengleichung:
in free Space	=	Wellenlänge * Frequenz	= λ * f	c <sup>2</sup> = w <sup>2</sup> / k <sup>2</sup>
	=	Frequenz / Wellenzahl	= f / (WL)k	Schallausbreitung:
	=	Kreisfrequenz / Kreiswellenzahl	= ω / k	(1/c= Δt für 1m)
Phasengeschwindigkeit (pv)	~	c0 / [ 1- (WL/ WL cut off) <sup>2</sup> ]		(bei Exponentialhorn)
Phasengeschwindigkeit (pv)	=	c0 / Wurzel aus [ 1- (WL/ WL cut off) <sup>2</sup> ]		(bei Katenoid)
Gruppenlaufzeit (gv):	=	c0 * Wurzel aus [ 1- (WL/ WL cut off) <sup>2</sup> ]		
Guided Wavelenght (WLg):	=	WL / Wurzel aus [ 1+ (WL/ WL cut off) <sup>2</sup> ]		
Zeitkonstante (t):	=	1 / (2*pi * Fc)	= 1/ w cutoff	=1/Grenzkreisfrequenz