

# Stimmung und Intonation bei Blechblasinstrumenten

**Mensuränderungen und deren Auswirkung bei Trompeten.**

## **Teil 8: Der Informationsgehalt von Impedanzkurven - Fakten, Visionen, Thesen & praktischer Nutzen**

Projektstand per 24.11.2024, Revision 20.0 – in work!!

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 Teil 8:

Übersicht zu diesem Teil meiner Projektarbeit und Dokumentation	3
---	---

<b>Fakten: Wie Instrumente und Messungen besser verstanden werden können</b>	<b>4</b>
--	----------

Interessante FFT der stehenden Wellen jeweils am Perturbationspunkt mit Sondenmikrofon	4
Eingangsimpedanz = Sicht auf die Lippenebene des Instruments	6
Pedaltöne und Sub-Pedal bei hohem Blech	8
Eine neue Sicht auf Gestalt & Informationsgehalt der Eingangsimpedanzkurve	9
Unterschiedliches Potential entlang der Instrumentenachse	9
Antiresonanz Frequenzen bei Trompeten mit Mundstück – und zyl. Mundstückersatz	10
Meine Definition von Funktionspositionen auf der physischen Instrumenten Achse	14
Positionsbestimmung an der physikalischen Instrumentenachse bei Bb-Trompeten	15
Äquivalente Zylinderlängen bedeutet Wellenlängen bzw. Frequenz	17
Es ergeben sich 2 Frequenzdomänen	17
Veränderungspotential bei Simulationen und bei Messungen, Unterschiede	18
Verluste und Bedämpfung des Potentials durch vorhandene Ausgleichseffekte von MPC+Bell	18
Schallgeschwindigkeit, Frequenzen, Wellenlängen und Positionen	19
Vorhandene Differenzen zwischen Simulationen und Messungen	20

<b>Visionen: Magnituden–Positionen anhand der Impedanzkurve bestimmen</b>
---

Berechnung Impedanz Peak –Kurven Start Pos. für die jeweilige Frequenz	21
Kann man die Lage von Magn.- / Pitchnodes aus der Impedanzkurve ermitteln?	22
Zusammenhänge; FFT Messung und Simulation, Vergleich über Frequenz	22
Äquivalente Zylinderlängen für Impedanz Peaks und Minima	25
Impedanz-Minima und deren starker Einfluß in einer closed-open Peak-Geometrie	26
Mundstück + Rohrverlängerung: Wie diese (miteinander) wirken = Modematching	27
Symetrie - sind diese Informationen nun brauchbar?	28
Die Definition und physische Position einer akustischen „Mitte“	28
Peak Magnituden – Funktionspositionen	29
Peak Frequenz – Pitch Funktions-Positionen	30
Peak Magnituden Nodes, Druckknoten und Druckbäuche	31
Startpositionen Peak Magnituden Nodes, Druckbäuche - eine grobe Annäherung	32
Peak-Pitch Positionen und der Versatz zu Peak Magnituden-Positionen	33
Ein Erklärungsversuch anhand der Minima-Frequenzen, XM-IN1 und XM-IN2	34

<b>These – Magnituden- &amp; Pitch-Node Positionen anhand Impedanzkurve, Simulation</b>	<b>35</b>
---	-----------

Geometrischer Mittelwert vs. arithmetischer Mittelwert (Durchschnitt)	36
Wave-Impedanz - Zusammenhänge und Formeln für Frequenzfaktoren	37
Fiktive Grundton-Frequenzen, reziprok WI-Crossings, WI-Mitte, Peak Maxima	39
Die Wave Impedanz-Mitte liefert Positionen für Magnituden-Nodes & Pitch-Pot	40
Magnituden-Nodes : Nur eine einzige IR - Referenzposition gibt den Grundversatz	41
Wave Impedanz Crossings unterhalb der Peaks liefern den Pitchversatz	44
Wave Impedanz Crossings oberhalb der Peaks ergeben ebenfalls Pitchversatz	46
Ergebnis und Zusammenfassung – mit Daten aus der plane Wave Simulation	49
Zielsetzung, Goal mit 1 Referenzpunkt, Treffer- / Fehlerquote:	50
Simulation vs FFT-Messungen	51
Umsetzung Impedanzwerte aus FFT Messung zu MPC Equiv. Länge – Praxistest #1:	51
Gegenüberstellung der gewählten Maxima als Referenzwerte Test A-C:	55
FFT-Auswertung mit neuen Funktionen und Formeln	56
Modifikationen ändern Funktionspositionen entlang der Instrumentenachse	57
Was passiert an der akustischen Mitte bei Perturbationen	59
Peak Maxima sind nur ein Teil eines elastischen Gesamtkorsetts	59

<b>Quick &amp; dirty - but straight forward! Praktische Lösungen sind gefragt</b>
---

Funktionierende Lösungen mit dennoch kleinstmöglichen Positionsfehlern bei Bb-Trompeten	60
---	----

## Übersicht zu diesem Teil meiner Projektarbeit

Ziel und Zweck dieses Projekts ist es physikalischen Abläufen auf den Grund zu gehen, um die akustischen Eigenschaften meiner (und anderer) Instrumente besser zu verstehen.

Dies hat mir bereits viele Erkenntnisse geliefert. Viele Gemeinsamkeiten von Simulationen zu Messungen sind mir nun bekannt, einige Auswirkungen und Ergebnisse weichen aber deutlich voneinander ab. Einige getroffene Aussagen stoßen daher an unterschiedliche Grenzen. Auftretende Abweichungen kann man grob unterscheiden anhand:

- Mundstück & „Gap“
- Mundrohr, Stimmzug-Gaps
- Schallbecherform, Mensur, Größe und Register allgemein
- das Vorhandensein enger Bögen, „krummer“ oder unrunder Ventildurchgänge
- Züge und deren Dichtheit, Verschleiß, Verunreinigungen, Rauheit, Korrosion, etc.
- Masse (Blechstärke) und Stützen, etc.

und vor allem Simulationsfehler anhand Modellen, wie auch physikalische Messfehler.

Ein spannender, noch fehlender Aspekt ist die Gesamtgestalt von Impedanzkurven und ihr möglicher Informationsgehalt. Die ermittelten Kurven sollten ja quasi einem akustischen „Fingerabdruck“ entsprechen, der auch wiederholt die Identität, Unversehrtheit, oder ungewollte Abweichungen (z.B. Undichtheit, Unfälle samt Wertverlust) davon aufzeigen kann. Auch alle gewünschten Änderungen z.B. durch Perturbationen werden so erfasst.

**Könnte man aus solchen Kurven abgesehen von Stimmung und Ansprache auch die äquivalenten Längen und vor allem die Positionen von Druckbäuchen, Druckknoten und somit Positionen mit Frequenz- und Magnitudenpotential annähernd genau bestimmen können, wäre das in der Praxis bei Reparaturen und Modifikationen ein wesentlicher Informationsgewinn und Vorteil!**

Noch einmal geht es in diesem Teil meiner Pionierarbeit daher etwas drunter und drüber. Manche Aussagen und Themen werden wiederholt, dies allerdings aus dem Grund weil ich versucht habe mich aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Gedankengängen der Thematik zu nähern, um an Lösungen zu kommen und ich denke, es ist mir letztendlich zumindest vorerst sehr gut gelungen.

Auch in diesem Teil gibt es nochmals eine Zweiteilung anhand der Ergebnisse von Simulationen, als auch anhand durchgeführter realer FFT Messungen am physischen Instrument.

Dieser recht „visionäre“ Abschnitt baut auf den Grundlagen und Verständnis der vorangehenden Teilen meiner Arbeit auf, Fehler können – da Pionierarbeit - nicht ausgeschlossen werden!

Viele Vergleiche und Berechnungen haben mir geholfen sprichwörtlich „Licht ins Dunkel“ zu bringen, sind aber aus Zeit- und Kostengründen in der Praxis nur schwer umsetzbar.

Es ist daher nun ein Punkt erreicht, wo aus den gefundenen theoretischen Lösungen und Thesen praxistaugliche Methoden und Regeln formuliert werden können. Diese sollten möglichst effizient sein und dennoch mit kleinstmöglichen Restfehlern gute Resultate abliefern – wir werden sehen!

**Quick & dirty - but straight forward!**

## Wie Instrumente und Impedanzmessungen besser verstanden werden können

Impedanzmessungen liefern eine Hüllkurve an einer definierten Position – hier am Input = Eingang, die man erhält, indem vorab alle erdenklichen **einzelnen** Frequenzen (sind viele anhand Samplingrate) mit möglichst der selben Intensität („Today Kurve“) in das Instrument geleitet und vom Schallbecher (mehrfach) wieder zurück reflektiert wurden. Erst die Verbindung dieser Punkte zu einer „Hüllkurve“ deutet darauf hin, wann sich eine maximale Resonanz bildet (Peak Maxima) oder quasi keine Resonanz zustande kommt. (Impedanz Minima, Antiresonanzen).

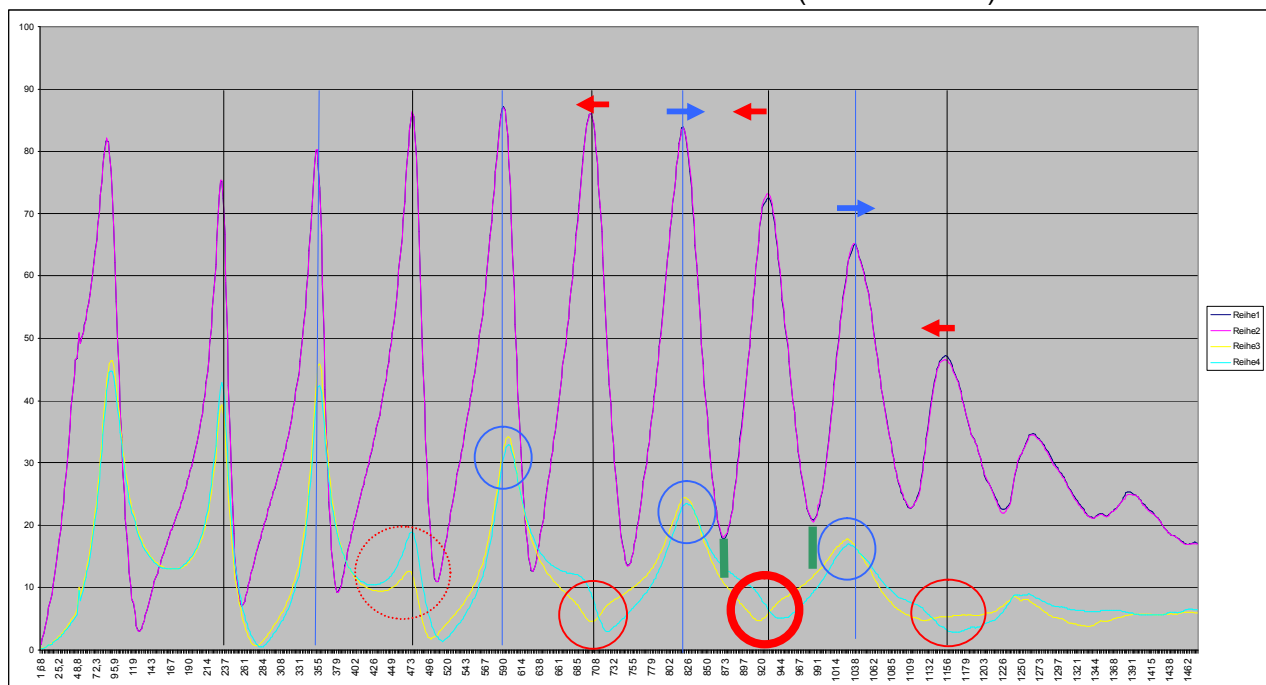
Es ist daher defacto unmöglich, an Punkten von Impedanz Minimas oberhalb des 2. Modes eine markante, stehende Welle zu generieren, die zudem das Potential hat, möglichst stark abzustrahlen = Lautstärke. Ebenso wird es (ohne Tricks, siehe Wiener Klappe oder zb. Half-Valve) unmöglich sein, die entstehenden Maxima zu „verstecken“ = „Kickser-Gefahr“!

## Interessante FFT der stehenden Wellen im Instrument mit dem Sondenmikrophon

Verhältnis von Druck zu Fluß **am Punkt einer Verengung** vs. Eingangs-Impedanz ohne Pert.::

Hier wurde das Anregungssignal über den Messkopf eingespielt, die Mikrophonaufnahme (Druckschwankungen) wurden aber mit dem Sondenmikrophon an verschiedenen Punkten im Instrument vorgenommen. Die hier gezeigten Grafiken sind also die Druckzustände an der Position des Sondenmikrophons innerhalb des Instruments und nicht an der Position der Lippenebene. Gleichzeitig ist das Mikrophon + dünnes Kabel selbst eine Perturbation in Form einer „Einengung“.

Situation an Positionen von Druckbäuchen und Druckknoten (hier ~ XM-IN1):



Rosa = Die Eingangsimpedanz ohne Perturbation auf Lippenebene für Vergleichszwecke.

Pressure, Aufzeichnung mit Mikrofonsonde bei ~XM-IN1 62cm = gelb und bei 64cm=hellblau

Gerade NT haben in diesem Bereich Druckknoten, ungerade NT haben hier Druckbäuche.

Eine lokale **Verengung vertieft** hier die resultierende Tonhöhe von **geradzahl. Resonanz-Peaks**.

Mode 8 hat bei Position ~62cm einen **Druckknoten**, wie man sieht stimmt diese Behauptung!

Mode 7 hat bei Position ~61cm einen Druckbauch,

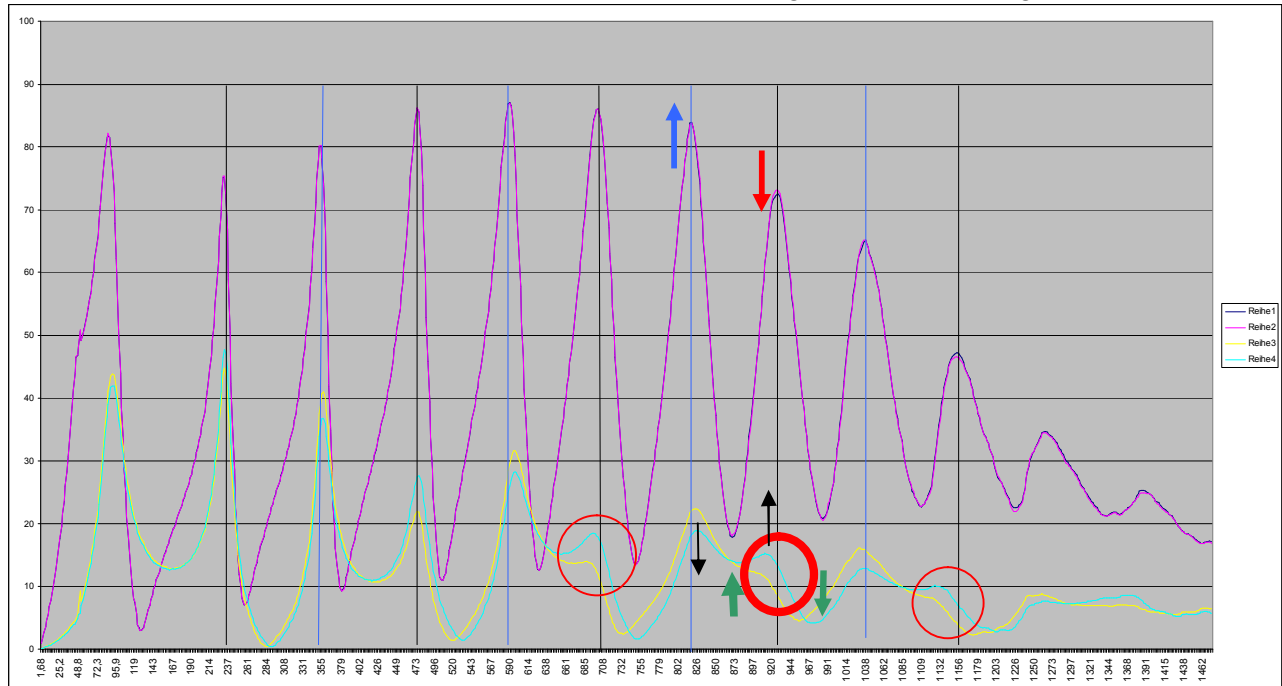
Mode 9 hat bei Position ~63cm einen Druckbauch, wie man sieht stimmt auch das!

gibt ohne Versatz Peak Magnitude Nodes & max. Pitch Pot (NT1-4 u. NT11-12 schon starker Versatz)

shared Minima – bilden hier lokal weder Druckbäuche – noch Druckknoten, sind dazwischen.

Eine Verengung nahe einem Druckknoten verschiebt die lokale Druckschwankung wesentlich stärker als nahe an einem Druckbauch, wo bereits max. Druckschwankungen vorliegen. D. h. z.B. bei XM-IN1 sind gerade NT stärker davon betroffen, mehr Pitch-Pot down durch Constriction.

Situation im Positionsbereich XM-Pitchnode – max. Peakmagnituden Änderungen:



Rosa = Die Eingangsimpedanz auf Lippenebene für Vergleichszwecke.

Pressure, Aufzeichnung mit der Mikrofonsonde bei ~65cm = gelb und ~XM-PN 67cm = hellblau (~XM-Pitch) **ohne Versatz = Max. Peak Magnituden Potential, Pitch Nodes, shared=Min. Node**  
Eine lokale **Verengung reduziert** hier die Peak Magnitude von **geraden Peaks**. (Weicht Knoten auf)

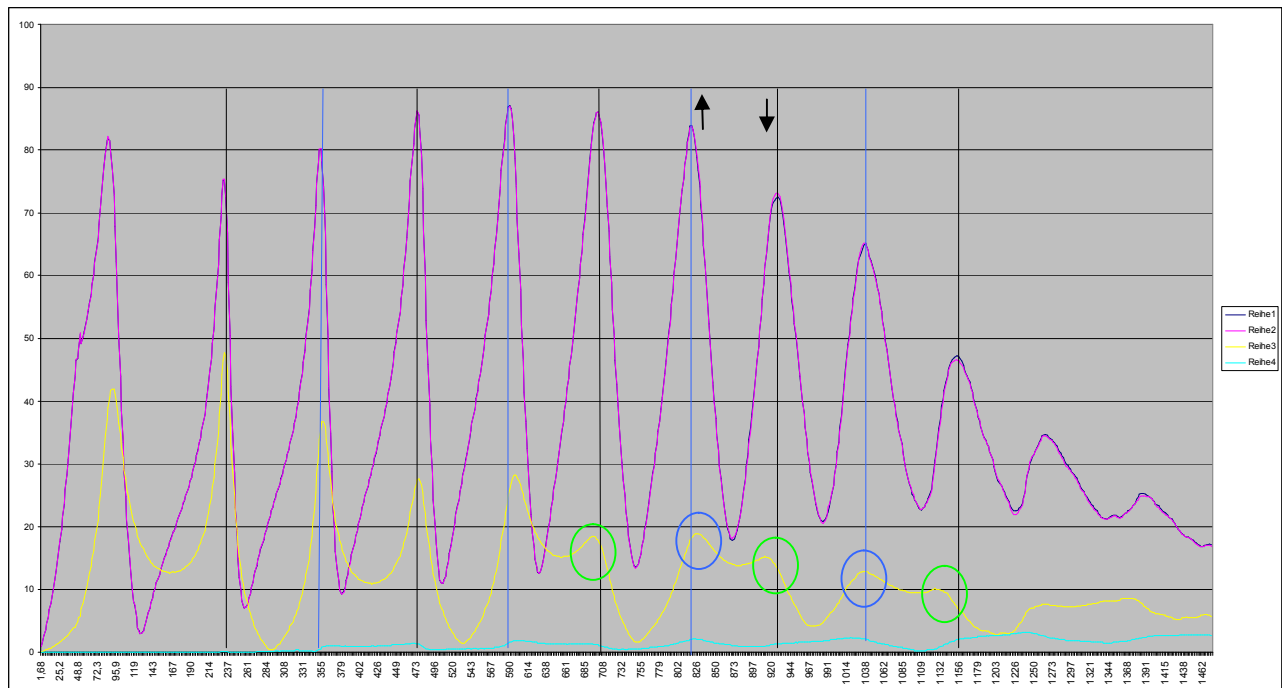
Eine Verengung zentriert zwischen Druckbauch und Druckknoten **z.B. bei XM-PN**, führt zu einer lokalen „Aufweichung/Behinderung“ der maximal möglichen Druckzustände. Lokal mögliche **Druckschwankungen zwischen Druckbäuchen und Knoten (Mode 7) werden geringer**, **zwischen Knoten und Druckbauch (Mode 8) steigen diese dagegen** in etwa dem selben Ausmaß.

Das geänderte Peak Input Magnituden Potential ist für gerade u. ungerade NT in etwa gleich.

Ein lokaler Druckabfall an einem der Druckbäuche erhöht die globale **Input** Impedanz Peak Magnitude, ein lokaler Druckanstieg an einem der Druckknoten hingegen reduziert diese!

Shared Impedanzminima (hier Mode 7/8) sind an dieser Position in der Magnitude dagegen kaum verändert, es ändert sich aber die Frequenz wo diese auftreten = **Minima Pitch-Pot.**

Lokal „wollen“ odd/even share Minima „Druckbäuche“ werden <-, even/odd „Druckknoten“ ->



Aufzeichnung mit Mikrofonsonde bei **67cm = gelb (~XM-PN)** wie vorhin, sowie

**~3cm vor Becherende im Schallbecher = hellblau:**

**Der Großteil der Schallwellen im Spielbereich wurde bereits zu den Lippen zurückreflektiert!**

**Noch höhere Frequenzanteile überwinden die Impedanz-Barriere leichter und entweichen stärker als tiefe!**

Das Mikrophon ist hier im Transferbereich mit viel Fluß – und wenig Druck. = Druckknoten

## Die Eingangsimpedanz ist die SICHT auf die Lippenebene des Instruments.

Eine andere Messposition ergibt also eine völlig andere Sicht auf lokale Druckverhältnisse. Die Lippenenebene ist deshalb so wichtig, weil diese Position die „Schnittstelle“ zu den schwingenden Lippen darstellt und die **aktuell schwingenden Frequenzen der Luftsäule** die bereits schwingenden Lippen mehr oder weniger **zum Schwingen anregen oder bedämpfen**.

Da aber auf einem Rohr oder einer Trompete üblicherweise nur ein einzelner „Klang“ zur selben Zeit gespielt werden kann - dieser besteht (ev.) aus einer Grundtonfrequenz und zahlreichen „harmonischen“ = ganzzahlig höheren Frequenzen in einem Mix aus unterschiedlichen Spektralanteilen an der Gesamtschwingung - ist die Impedanzkurve möglicherweise etwas verwirrend und auch irreführend.

Verschiedene **Grundtonfrequenzen** können nur zeitlich nacheinander produziert werden. Die Eingangsimpedanzkurve vermittelt so gesehen den Eindruck als wären alle möglichen Frequenzen und deren Zustände (Magnituden) immer ( wie die Tasten auf einem Klavier..) vorhanden. In Wirklichkeit haben wir nur die Druckamplituden der Frequenzen und der angeregten Harmonischen, die gerade geblasen wird.

Allerdings zeigen die Impedanz-Minima und daraus folgend Wave Impedanz - Crossings die physikalische Grenzen auf, die von „Nachbar Peak (bzw. Kandidaten)“ gezogen werden.

Bei der Messung wird versucht ein möglichst sinusförmiges Signal (möglichst obertonarm) zu verwenden, damit „harmonische“ nicht oder so wenig wie möglich entstehen. (Dies ist aber durch die für den Messkopf notwendige Signal-Pegelkorrektur und die Kapillare nicht mehr gegeben).



Das Messmikrophon zeichnet Druckschwankungen auf. Es wird kein Fluß aufgezeichnet. Die Fourier Transformation im Frequenzbereich liefert als Ergebnis die spektralen Anteile der untersuchten einzelnen Frequenz - einen Magnitudenwert – im (nicht existierenden) Idealfall nur 1 einzigen Wert pro Grundtonfrequenz, daher wird eine Fensterfunktion bei der FFT verwendet.

Wenn bei der nun einzeln nacheinander untersuchten Frequenz die aufgezeichnete Druckschwankung (Aufnahmepegel) besonders hoch ist, so ergibt sich in der FFT ein einzelner hoher Spektralwert/Magnitude für diese einzelne Frequenz, und bei jeder einzelnen Frequenz wo die Druckschwankung gering (Aufnahmepegel) ausgefallen ist ein einzelner niedriger Spektral/Magnitudenwert. Durch die sehr hohe Frequenzauflösung der FFT erhält man daher Ergebnisse für viele einzelne Grundtöne. In meinem Setup alle 0,168 Hz ein Grundton. Die grafische Kurve bildet sich aus den eng aneinanderliegenden Einzelwerten.

Stehende Wellen können aber in Rohren nur in der Nähe von Frequenzen entstehen, bei denen die passenden physikalischen Rahmenbedingungen vorhanden sind. Einseitig geschlossene, nicht modifizierte Rohre produzieren nur ungeradzahlig Vielfache einer untersten (vor allem von der Rohrlänge und Temperatur) abhängigen tiefsten Frequenz. Bei allen diesen ungeraden Vielfachen ist am geschlossenen Ende nämlich ein Druckbauch = max. Druckschwankung. Geradzahlige Vielfache bilden hier einen Druckknoten und sind quasi das Gegenteil einer stehenden Welle, sie können durch einen Druckimpuls nicht zum Weiterschwingen angeregt werden, entstehen bei jedem Roundtrip aber wieder neu als Knoten zwischen Druckbäuchen der Resonanzfrequenzen.

Stehende = reflektierte Wellen können nur auftreten, wenn es an einer gewissen Position am Ende des offenen Rohres zu einer massiven Veränderung der charakteristischen Impedanz kommt. Schallbecher sind Impedanzwandler, die im Gegensatz zu einem Rohr den stark sprunghaften Übergang ausgleichen, dabei werden tiefe Frequenzen in einem Horn stark beschleunigt.

Sie funktionieren daher frequenzabhängig, tiefere Töne = längere Wellenlängen erfahren den Impedanzwechsel wesentlich früher (kleinere Krümmung der Steigung) als höhere Töne (größere Krümmung). Ab einer weiter fließend verlaufenden Position wird diese Krümmung der Steigung und damit der Rohrquerschnitt so groß, dass es zu keiner Reflektion mehr kommt und die eingebrachte Energie ohne nennenswerte Reflektion nur noch abgestrahlt wird. (Cut off Frequenz).

**Musikalisch ideal brauchbar** sind Instrumente die alle harmonischen Vielfachen eines gemeinsamen Grundtones produzieren (gerade und oder nur ~ ungerade Vielfache bei z.B. Klarinette, Panflöte) und bei denen ein **verwertbares Gleichgewicht** aus Rückkopplung und Abstrahlung besteht. Das sind z.B. beidseitig offene Zylinder (Querflöte). Beidseitig geschlossene Zylinder fallen hier heraus, da nach aussen kein Ton abgestrahlt würde. Unmodifizierte Konusse, egal ob am kleinen Ende etwas geöffnet oder geschlossen liefern ebenfalls ~ annähernd harmonische gerade und ungerade Vielfache einer Grundfrequenz.

Diverse mathematisch errechnete Hörner, die dahingehend abgestimmt sind, möglichst die abgestrahlte Energie zu optimieren fallen ebenfalls aus dem Rennen, da hier nur ein winziger Bruchteil als unterstützende Reflektion zu den Lippen zurückkehrt (Megaphone Effekt), das verwertbare Gleichgewicht für schwingende Lippen fehlt beinahe komplett. Einige Hornformen haben aber sehr wohl akustische Eigenschaften die sie als Segmente zusammengesetzter Hörner verwertbar machen, z.B. Katenoidhörnern der Salmon Horn Familie, siehe Teil 2D und 2E.

Mathematische **Besselhörner** können alle Gestalten und Frequenzverhalten vom einseitig geschlossenen Zylinder bis zum Konus je nach gewähltem Flare Faktor annehmen. Es ist quasi das Chameleon der berechneten Hörner. Kombinationen aus Mundstück - zylindrischem Teil und „Bessel – Horn Becher“ liefern aber wiederum abweichende Frequenzen – aufgrund von Modematching – siehe Teil 2E.

Vereinfacht kann ein Blechblasinstrument als **sehr stark modifiziertes** geschlossenes Rohr angesehen werden. Die Mensur ist zwar nun eine völlig andere, es gibt ein Mundstück, einen Schallbecher, „konische“ Elemente etc., aber die Rahmenbedingung, daß das Rohr (bei Resonanzen) nach wie vor einseitig hochgradig geschlossen bleibt hebt die Beschränkung nicht auf, daß nur sehr nahe solcher Frequenzen stehende Wellenlängen = „Resonanzen“ bilden können, wo an den Lippen (zu diesem Zeitpunkt geschlossen) eine möglichst maximale Druckschwankung (Druckbauch) vorherrscht.

Durch die (gewollten) sehr starken Modifikationen wandern die möglichen Kandidaten für „Resonanzen“ allerdings nun zu anderen Tonhöhen/Frequenzen, ebenso tauchen die Kandidaten von „Antiresonanzen“ jetzt (aber bei nur geringfügig anderen) Tonhöhen/Frequenzen auf.

Letzendlich und stark „modifiziert“ nähern sich die Verhältnisse der möglichen Resonanz Kandidaten untereinander einem Grad, **wo es scheint als seien sie (~ teils zueinander schlecht stimmend), geradzahlige Vielfache eines (nicht existierenden) fiktiven Grundtons**, dem allerdings eine tatsächlich vorhandene tiefere 1. Grundfrequenz gegenübersteht.

Dieser 1. „Resonanz-Kandidat“ = NT1 kann bei engmensurierten Instrumenten allerdings nicht **mit seiner Frequenz** zum „Resonieren“ gebracht werden, da seine „harmonischen“ Vielfachen nicht an Punkten liegen, die am geschlossenen Ende einen Druckbauch haben und daher extrem bedämpfen! (Harmonisch im mathematischen Sinn, bedeutet: \*n; mit n=1,2,3,4, usw.)

Resonieren wird – ein Klang ohne Grundtonanteil bei höherer Grundfrequenz, wo die Anteile der Harmonischen diese Grundfrequenz bestimmen, die an der Lippenebene in Summe ein Maximum an Druckschwankungen haben. Bei sehr weit mensurierten Instrumenten (und kürzeren zyl. Rohranteilen) liegt dieser fiktive Grundton näher an der Stelle der 1. Naturtonfrequenz, bleibt aber auch bei Flügelhörnern dennoch intonatorisch viel zu tief. Dieser „Pedal“-Ton wird bei hohem Blech in der „Kunstmusik“ normalerweise und glücklicherweise nicht verwendet, bei Posaunen aber sehr wohl und oft lautstark als besonderer Effekt eingesetzt.

### Sub-Pedal bei hohem Blech:

Noch eine Oktave tiefer als die Pedalton-Oktave liegen gehörte Klänge, die z.B. beim „Warmblasen“ = starkes „Lipp-buzzing“ entstehen. Die „Bausteine“ solcher Klänge sind daher wieder höhere Frequenzanteile, hier mit einem im Klangspektrum Fall fehlenden Mode 1 und Mode 2. Solche Klänge sind daher sehr modulationsfähig in der resultierenden Tonhöhe! Die Frage warum solche tiefen „Klänge“, denen keine messbare Impedanz-Maxima gegenübersteht überhaupt entstehen können war einer der Beweggründe warum ich mich so intensiv mit der Akustik von Blechblasinstrumenten beschäftige.

Wichtig in dem Zusammenhang ist die Tatsache, daß diese physikalischen Prinzipien nicht auf den 1. Naturton / Grundton beschränkt sind. Alle stehenden Wellen haben die stärkste stehende Welle an der Frequenzstelle, wo sie in Summe mit den zeitgleich mitproduzierten harmonischen Vielfachen ein Maximum an Druckschwankungen an der Lippenebene haben. (Summenprinzip von Dr. Klaus Wogram), aber auch „Regimes of Oscillation“, Dr. Arthur Benade.

Die Sicht auf die Eingangs-Impedanzkurve zeigt also ein Stadium, wo keine oder kaum harmonischen Vielfache mitbeteiligt sind, dies entspricht einer äußerst obertonarmen (sinusförmigen) Anregung, diese ist wiederum in der Praxis von Bläserlippen aus Fleisch und Blut nur ev. bei einem „ppp - pianissimo“ Level zu bewerkstelligen.

Umso intensiver sich die Lippen durch stärkeren Luftstrom öffnen und schließen („schwingen“), um so mehr Oberschwingungen produzieren diese und diese harmonischen Schwingungen der Luftsäule im Instrument bekommen mehr und mehr Gewicht (und ändern dadurch neben dem abgestrahlten Klangspektrum auch die reflektierte resultierende Gesamtresonanz in Summe / Tonhöhe). Die Impedanzkurve zeigt also einen Zustand, der sich durch Lautstärkezunahme üblicherweise verändert. (Leiser geht wohl kaum!)



Ein Fakt ist also dass einseitig geschlossene Rohre stehende Wellen nur nächst jener Frequenzen zulassen, die am geschlossenen Ende einen Druckbauch haben. Sie entsprechen somit den höchsten Magnituden der FFT = Impedanz Maxima. An Impedanz Minimas sind nach wie vor die nicht resonierenden, „nicht mehr ganz geraden“ Vielfachen.

Beidseitig offene Zylinder (z.B. Querflöte) bilden im Gegensatz dazu stehende Wellen, deren Frequenzen an den Impedanz Minima liegen (mit einer kleinen Längenkorrektur)! An offenen Enden hat jede stehende Welle immer einen Druckknoten bzw. eine Transfer-Region.

Ein ev. zusätzliches, kleines Loch an der Stelle eines Druckknotens für eine einzelne stehende Welle verändert daher auch die betroffene stehende Welle vorerst scheinbar kaum, es sind aber harmonische Vielfache betroffen und daraus ein anderer resultierender Klang und Ansprache.

Durch die starken Modifikationen des ursprünglichen „fiktiven“ einseitig geschlossenen Rohres durch Mundstück, Schallbecher, und Verluste kommt es zu anderen Frequenzen, **aber mit der selben physischen Rohrlänge**, und es kommt unweigerlich zu „Verzerrungen“; ein Strecken und Stauchen in alle Richtungen und einem **Versatz der Maxima, als auch der Minima in deren Frequenz und Magnituden** und somit auch zu geänderten Positionen der Wave Impedanz Magnituden Werte, Wave Impedanz Mitten und Wave Impedanz Crossings.

Es bleibt also kein Stein auf dem anderen, mit der Ausnahme, dass nach wie vor nur solche Resonanzen bei Frequenzen entstehen, die an der Lippeebene nahe eines Druckbauches liegen. Antiresonanzen = Impedanz Minima haben bei dieser Frequenz hier am Input einen Druckknoten.

### Funktionskopplung von Druck, Fluß, Magnituden, Peaks, Minima, Wave Impedanz

Bevor ich mit diesem Projekt begonnen habe, lag das Hauptaugenmerk natürlich immer auf Frequenzspitzen und deren Lage in Frequenz = Tonhöhe = Stimmung und eventuell der Peak Magnitude = Ansprache. Die Minima und Wave Impedanz und RMS Werte (Halbwertsbreiten) habe ich zwar miterfasst bzw. berechnet, diese hatten aber meist nur statistische Funktion oder um weitere Faktoren wie Q-Faktor und Fractional Return berechnen zu können.

### Eine neue Sicht auf Gestalt und Informationsgehalt der Eingangsimpedanzkurve

Aufgrund der guten Übereinstimmung der ermittelten äquivalenten Längen ergeben sich für mich neue Ansätze, welche Informationen in der Impedanzkurve noch stecken und wie diese interpretiert werden können. Es fehlen noch einige fundierte Aussagen zu den komplexen Zusammenhängen von einerseits Druck / Fluß und den Ergebnissen in Frequenz und Magnituden, sowie Dämpfung und Verlusten.

### Nebeneffekt: Unterschiedliches Potential für Pitch und Magnituden Änderungen

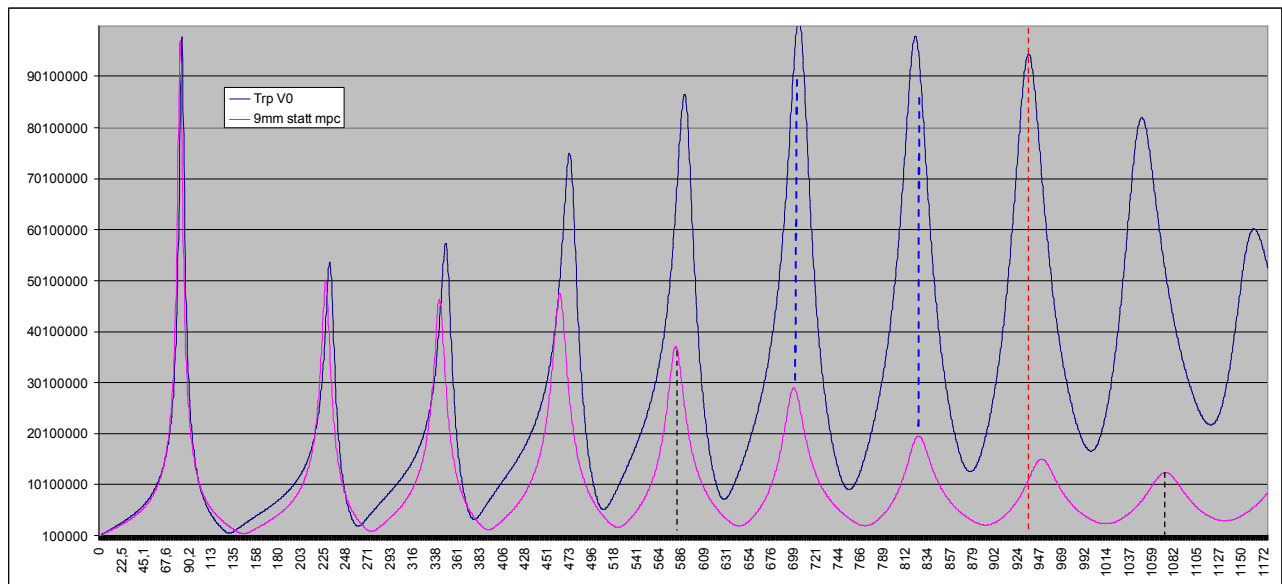
Ein weiterer Effekt ergibt sich durch die Erkenntnis, daß bei Perturbationen entlang der Instrumentenachse (auch im zylindrischen Bereich) das mögliche Magnituden Potential abnimmt, das mögliche Pitch Potential allerdings zunimmt, umso weiter die Position vom Mundstück entfernt ist und somit die möglichen Druckzustände in ihrer Intensität abnehmen.

Die maximal möglichen Druckschwankungen fallen Richtung Rohrende kontinuierlich etwas ab, dafür müssen im Gegenzug die Flußrate-Schwankungen entgegengesetzt etwas steigen. Die Druckknoten sind niemals tatsächlich bei Null, zu Beginn zudem noch etwas höher.

## Antiresonanzen bei Trompeten mit Mundstück und Mundstückersatz

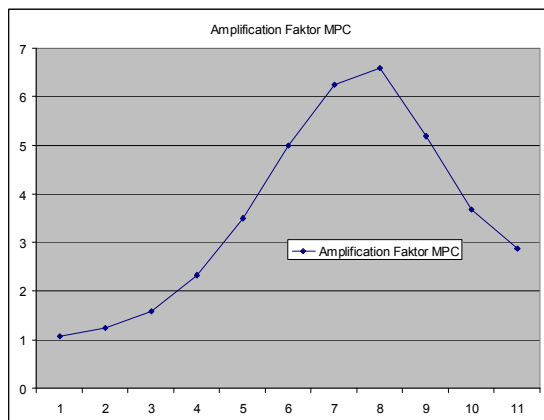
Bei einem closed-open Zylinder liegen Antiresonanzen jeweils in der arithmetischen Mitte der Peak-Frequenzen. Wird ein closed-open Zylinder zu einem closed-open Frustum aufgeweitet, so erhöhen sich tiefe Resonanzpeaks stark, die Minima = Antiresonanzen verschieben sich allerdings nicht in ihrer Frequenz, siehe Teil 2B.

In diesem Abschnitt soll dargestellt werden, wie sich eine Trompete mit Mundstück und alternativ dazu eine Trompete mit einem Mundstückersatz in Form eines 9mm zylindrischen Rohres selber Länge verhält. Das soll einerseits den Einfluss des Schallbechers im tiefen Frequenzbereich zeigen, andererseits die Effekte, die alleine nur durch das Mundstück auftreten. Die Versuche stammen aus der ART Plane Wave Simulation der Bb-Trompete mit Ventilstellung V0, die in den zahlreichen weiteren Versuchen bereits eingehend dokumentiert wurde, daß Mundstück ist das bisher verwendete simulierte Warburton 8M9.

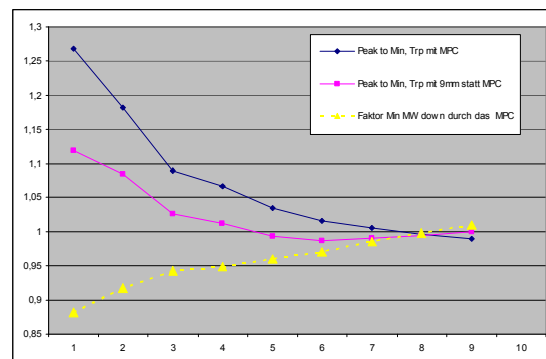


Man erkennt 1. die starke Amplifikation der Peaks um die MPC Popping Frequenz (Faktor 6,6 bei Mode 8), Das Mundstück erhöht tiefe Peak Frequenzen zusätzlich zum Schallbechereffekt, vor der MPC Frequenz nicht mehr (hier zwischen Mode 6-7) und vertieft höhere Peak Frequenzen. Die Peak Symetrie wird etwas oberhalb der Popping Frequ. erreicht, gemeint ist hier, daß der Frequenzabstand zu den Minima vor und nach dem Peak gleich ist, die Flanken beidseits gleiche Steigungen haben (schwarz / rot strichliert).

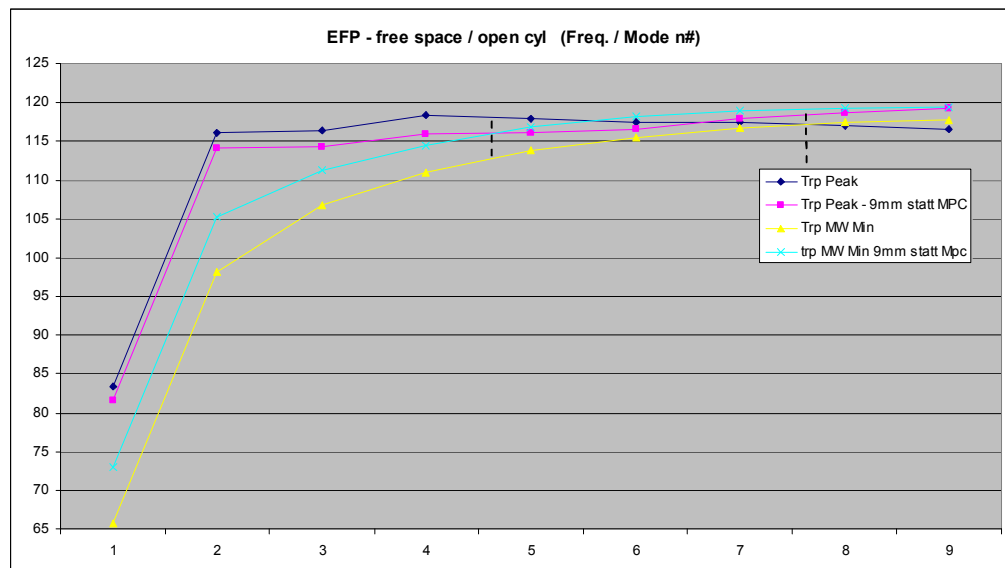
Bei der Trompete mit dem Ersatzadapter 9mm in Mundstücklänge fällt ins Auge, daß die Minima wesentlich stärker verschoben sind, es kommt zu einer 1. Symetrie um Mode 5, sowie ein 2. mal um Mode 9. Ohne Kesselmundstück weicht diese Konstellation also etwas weniger von closed-open Zylindern ab. Mit Kesselmundstück nähert sich das Verhalten der Minima aber dann ähnlich eines closed-Frustum an.



Peak Magnituden Faktor höher mit Mundstück gegenüber Trompete mit 9mm Adapter (ART Simulation, Messungen: Faktor kleiner)



Der Frequenzfaktor Peak Frequenz zum arithmetischen Mittelwert der Minimafrequenzen. Faktor 1,0=Symetripunkt, Gelb = MPC Effekt alleine



~ 117 Hz mittlerer Grundton (reine Stimmung), von der die einzelnen Modes dann noch stärker oder schwächer abweichen, open-open Zyl. equal. Länge: 344 m/sek /  $2 \cdot 117 \text{ Hz} = 1,47\text{m}$

Peaks mit Adapter:

die Abweichung von Mode 1 - 6 ist negativ, > Mode 7 positiv.

Peaks mit Mundstück:

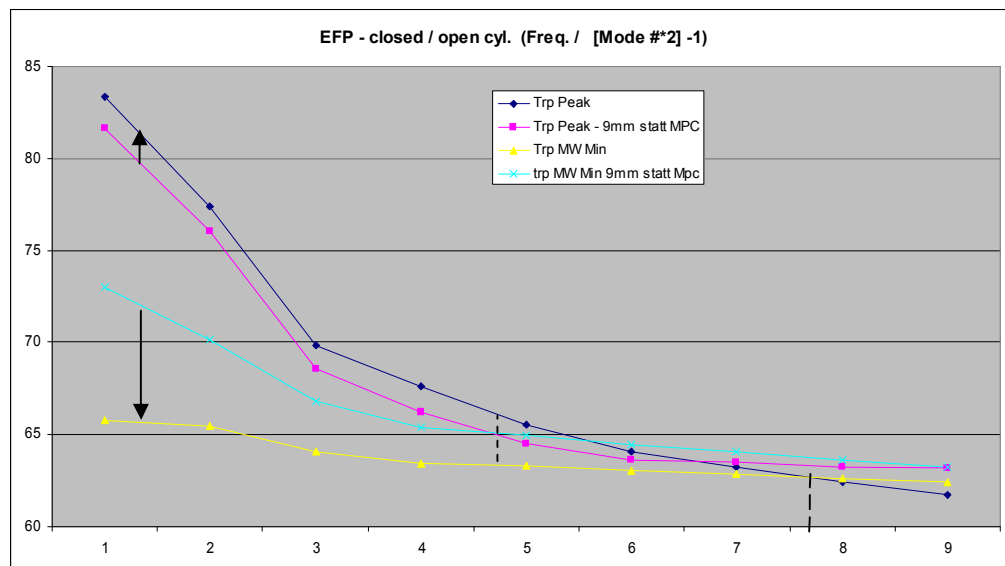
Das Mundstück hebt die Modes 1-6 zusätzlich an, das Mundstück wirkt effektiv als Verkürzung, ab Mode 7 wirkt das Mundstück als hätte es eine größere Länge.

Minima mit Adapter:

Minima und Mittelwerte sind wesentlich stärker in der Frequenz erhöht, liegen bereits ab Mode #4 höher als die Peakfrequenzen

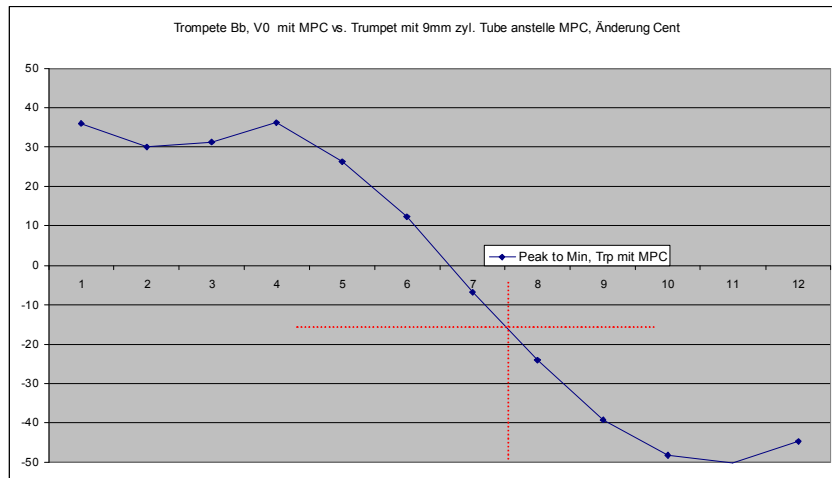
Minima mit Mundstück:

oberhalb des Symetripunktes liegen die Minima Mittelwerte höher als die Peak Frequenzen, tiefe Frequ. sind stark vertieft



Die selben Daten, allerdings hier als Grundtöne EFP von closed-open Zylindern dargestellt; 1,39 m Rohrlänge mit 344 m/Sek. Schallgeschwindigkeit ergibt  $344/4/1,39 = 62 \text{ Hz}$  Grundton cc.

Mode #2:	mit Adapter	eine equ. closed-open Zylinder Länge	von 1,132 m
	mit Mundstück	eine equ. closed-open Zylinder Länge	von 1,111 m = -2,1cm
Mode #11:	mit Adapter	eine equ. closed-open Zylinder Länge	von 1,367 m
	mit Mundstück	eine equ. closed-open Zylinder Länge	von 1,408 m = +4,1cm



Abweichung in Cent E.T., ART Simulation mit Mundstück gegenüber der Trompete mit 9mm Rohr-Adapter, entspricht effektiver Änderung der Resonanzfrequenz durch des Kesselmundstückes (Warburton 8M9).

Man darf nicht vergessen: z.B. Mode 8 mit Adapter hat weiter eine pos. Abweichung, daher sogar ca. -23 Cent mit Mundstück, aber bei dieser Frequenz sorgt das Mundstück bereits für eine negative Abweichung.

### Dispersion, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig ist:

Wellenlänge: mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit / Frequenz, bzw.

Ausbreitungsgeschwindigkeit \* Zeitperiode.

1 harmonische Welle mit z. B. 117 Hz Wiederholungsgeschwindigkeit bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 344 m/Sek. hat eine Wellenlänge von 2,94m.

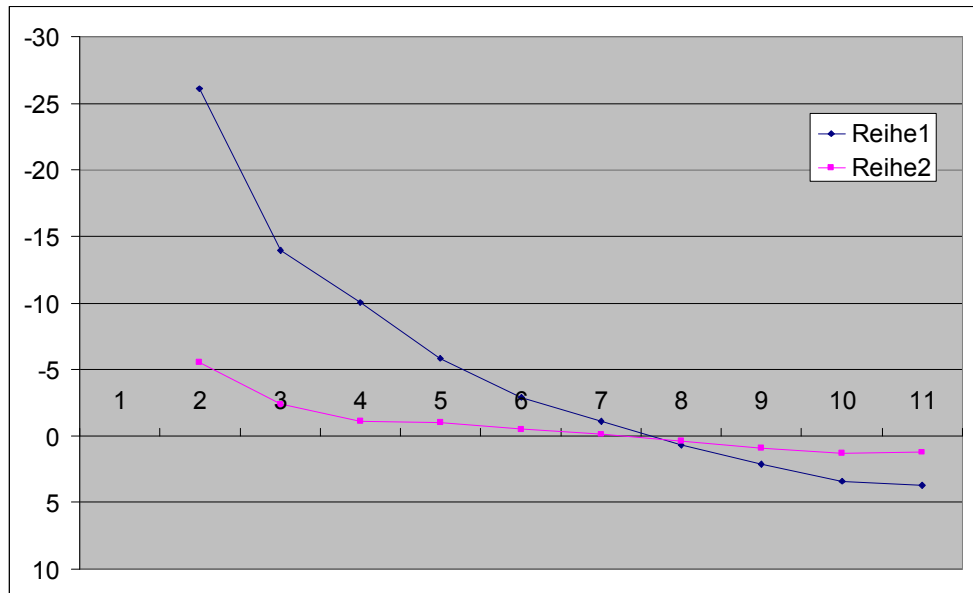
Ist (durch) bei einem Horn(anteil) die (mittlere) Phasengeschwindigkeit höher als die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit), beispielsweise 400 m/Sek., so wäre die Wellenlänge bei selber Frequenz 3,41m, andererseits wäre die selbe Wellenlänge von 2,94m bei einer tieferen Frequenz: Faktor = Schallgeschw./Phasengeschw' = Faktor WL/WL' = 0,86 \* 117 Hz = 100,6 Hz erreicht.

Bei einer Kombination mit Schallbecher sollte die Phasengeschwindigkeit bei tiefen Frequenzen höher sein und sich aber successive mit höherer Frequenz der Schallgeschwindigkeit annähern. Nur kann es nicht vollständig dazu kommen, denn man stellt fest daß die Hornfunktion dazu beiträgt, daß tiefe Frequenzen wesentlich früher reflektiert werden (Impedanz-Mismatch), und somit eine kürzere Ausbreitungstrecke haben (1x vor, Reflektion, 1 x retour), und dadurch schon kürzer sind. Das 2. Argument scheint daher bei Blechblasinstrumenten – und deren Becherformen wesentlich stärker ins Gewicht zu fallen, die gefundenen Druckbäuche und Druckknoten und deren annähernd konstanten Abstände legen das auch nahe.

Beim Zylinder haben Druckbäuche und Druckknoten ~ konstante Abstände im Rohr, beim Frustum closed-open sind die Druckbäuche – speziell tiefer Resonanz Modes sehr stark an das kleine Ende versetzt. Hier ist offensichtlich ein Zusammenhang zu den (tief bleibenden) Antiresonanzen („fehlende Spitze?“), zudem findet aber keine vorzeitige Reflektion vor dem offenen Ende statt, ebenso keine Dispersion.

Bei der Trompete ohne Mundstück, mit teilweise konischem Mundrohr und beinahe konischen 1. Teil des Becheranstoßes verhalten sich die Antiresonanzen annähernd so, als wären diese immer kürzer werdende Zylinder, allerdings zeigen die Mittelwerte der Antiresonanzen bei tiefen Frequenzen nur ca. das halbe Frequenzänderungs-Potential gegenüber den Resonanzen (Impedanz Peaks).

Bei der Trompete mit Mundstück nähert sich das Verhalten der Antiresonanzfrequenzen ähnlich dem eines closed-open Frustum an, allerdings mit dem Unterschied, daß Druckbäuche kaum zu Druckknoten versetzt im Rohr auftauchen, zudem kann man eindeutig feststellen, daß (unterhalb der Mundstück Resonanz) durch das Kesselmundstück die Resonanzfrequenzen erhöht werden, die Antiresonanzfrequenzen jedoch viel stärker vertieft werden, oberhalb der Mundstück- Resonanz werden im Endergebnis alle vertieft. Eine Symmetrie ergibt sich bei Trompeten mit ~ passendem Kesselmundstück immer etwas oberhalb der 1. Mundstückresonanzfrequenz und hier hat das Mundstück dann bereits eine akustische Mehrlänge, wirkt also länger als es tatsächlich ist: Um die Popping Frequenz hat es die equiv. Länge eines closed-open zylindrischen Rohres (nicht näher definierten Durchmesser) mit der selben ¼ Wellenlänge: ca. 1,2cm länger. Und man sieht, dies trifft bei dieser Frequenz auf die Mittelwerte der Antiresonanzen ebenfalls zu.



y= Längendifferenz in cm von closed-open Zylindern für die ermittelten Frequenzen:

Reihe 1 = ART Trompete V0, Resonanzfrequenzen (Impedanzmaxima)

Reihe 2 = ART Trompete V0, arithm. Frequenzmitte der Antiresonanzen

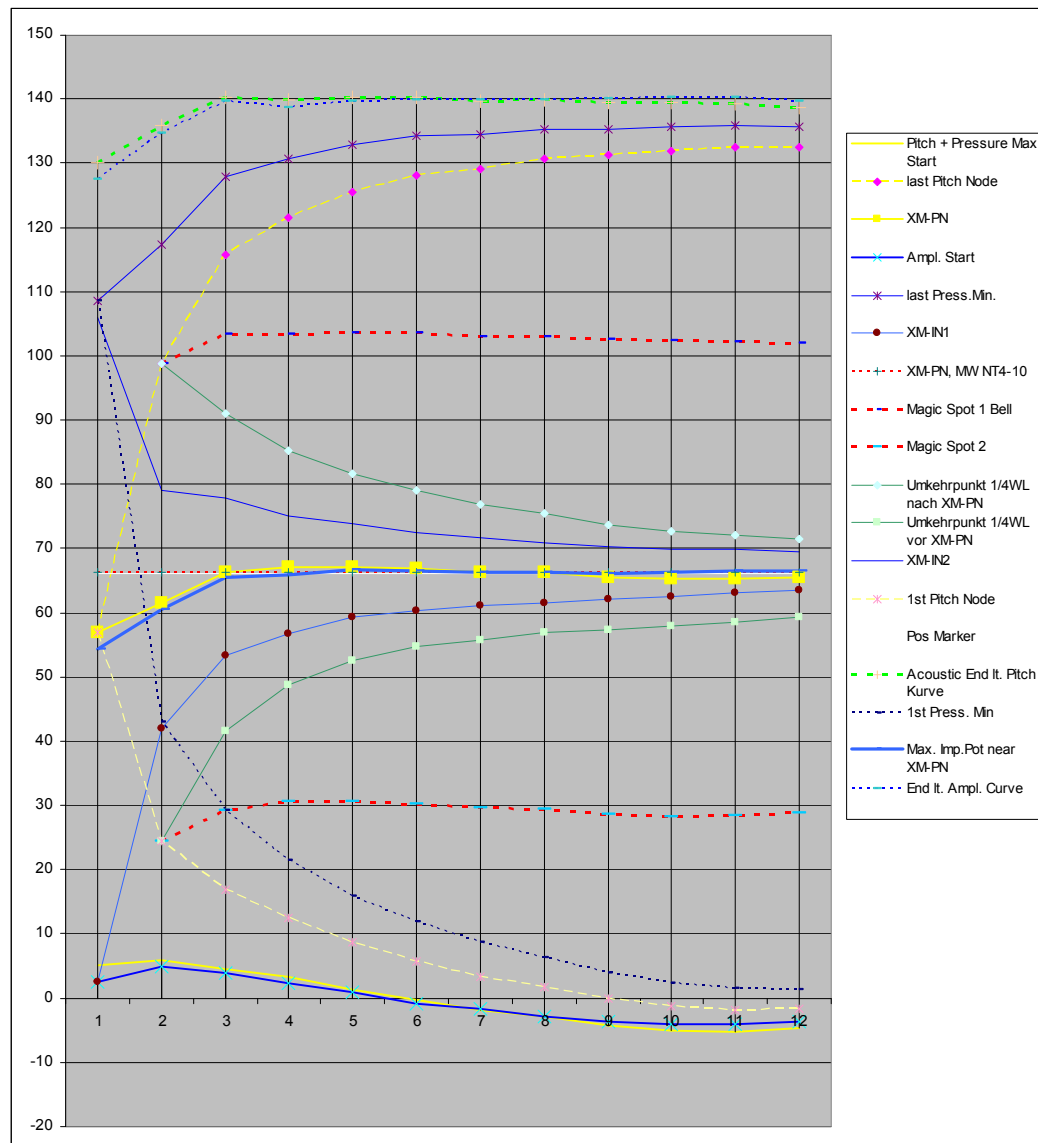
Diese Werte enthalten alle Komponenten: Mundstück 8M9, Mundrohr, zyl. Rohr, Schallbecher,  
ART Simulation Bb Trompete, Ventilstellung V0

Endkorrektur + Verluste sind bei den berechneten closed-open Zylinderlängen nicht berücksichtigt.

Bei FFT Messungen fallen die Intonationsabweichungen – speziell oberhalb der MPC Popp. Frequ. stärker aus, detto fallen die Unterschiede stärker aus wenn man das Mundstück nur mit zylindrischer Verlängerung gegenüber closed Zylindern – selber Resonanzmodelfrequenzen vergleicht.

## Meine Definition von Funktionspositionen auf der physischen Instrumenten Achse:

Bb-Trompete, ART-Simulation, Plane Wave, V0, Loss Faktor 1,33, 23,5 Grad C.



Druckbäuche sind in der Grafik irreführend als „Pressure Max.“ und Druckknoten als „Pressure Min. bezeichnet“. Das Mundstück + Mundrohr hat eine extra Länge oberhalb der Mundstück Popping Frequenz. Unterhalb ist es akustisch kürzer, daher im Plusbereich. Wir behandeln die Positionen, als ob es ein zylindrisches Rohr äquivalenter Länge wäre, daher sind die Startpositionen am Mundstück positiv oder negativ. Im weiteren wird mit der Schallgeschwindigkeit in freiem Raum und daraus resultierenden Wellenlängen gerechnet.

In der akustischen Mitte des Instruments ergibt sich die XM-Pitchnode Kurve (gelb). An Positionen die diese Kurve bilden ändern sich die Peakfrequenzen der Resonanzmodes bei lokalen Querschnittänderungen nicht.

An einem Symetripunkt – hier zwischen Mode 7 und 8 bzw. ~ 900 Hz etwas oberhalb der Mundstück Popping Frequenz kreuzt die Magnituden Potentialkurve, d.h. hier gibt es keinen extra Versatz von Peak-Pitch zu Peak- Magnitudenkurven, sondern 1/8 WL Abstand der globalen Frequenz und eine maximale Peakmagnituden-Erhöhung oder Absenkung bei lokalen Querschnittänderungen. Bei tieferen und höheren Frequenzen ergibt sich ein +/- „Pitch-Versatz“ zusätzlich zu den 1/8 WL Abständen der Magnitudenkurven.

1/8 WL Peak vorher, näher am Mundstück liegt die XM-IN1 Kurve (blau) = Magnituden Nulldurchgänge. Ungerade Modes haben an den Punkten, die zu dieser Kurve verbunden sind hier einen Druckbauch, gerade Modes einen Druckknoten. Dazu eine ¼ WL Peak später ergibt sich die XM-IN2 Kurve (blau) aus Positionen, wo stehende Wellen ungerader Modes nun Druckknoten und gerade Modes Druckbäuche bilden. *Die Besonderheiten der restlichen dargestellten Kurven sind in Arbeit Teil 3 ausführlich erklärt.*



## Positionsbestimmung an der physikalischen Instrumentenachse bei Bb-Trompeten:

Bei einer frequenzabhängigen Funktions-Position „XM-IN1“ (V0) haben alle ungeraden Resonanzmodes jeweils Druckbäuche. Mode 3 = notiertes G1, Mode 5 = notiertes E2, Mode 7 = notiertes Bb2, Mode 9 = D3.  
-> Umso höher die Frequenzen, umso weiter vom Mundstück entfernt liegt die jeweilige XM-IN1 Position.

Hier sind die ausgelösten lokalen IR Reflexe anhand einer Verengung am geringsten. Die Peakmagnituden der ungeraden Modes ändert sich an diesem Punkt (Druckbauch) nicht = Magnituden Node=Nulldurchgang.

Durch die Perturbationsart = hier eine lokale Einengung, sind die beiden daran angrenzenden Druckknoten dieser Modes lokal mehr als  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge vom perturbierten Druckbauch entfernt. Diese Mehrlänge steht den restlichen Druckknoten + Druckbäuchen = global nicht mehr zur Verfügung und diese sind daher durch die Perturbation etwas weniger weit als eine  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge voneinander entfernt, wobei die ursprüngliche  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge jene ist, die ohne die Einengung vorliegen würde (Referenz). Die resultierende =globale Peakfrequenz der Modes wird stark bis maximal höher als deren Referenzfrequenz ohne Perturbation. Die Input - Peaks der ungeraden Naturtöne werden an dieser Position dann stärker nach rechts geneigt. /

Alle Druckknoten dieser Modes liegen  $\frac{1}{4}$  WL von den Druckbäuchen versetzt mittig dazwischen, (mit Ausnahme der beiden vor und nach einer momentan vorhandenen Einengung am Druckbauch). Dies gilt für den zylindrischen Bore-Bereich und auch leicht „erweiternde“ Mundrohre und Bell Stems. Die globalen Abstände der Druckknoten definieren anhand deren Wellenlänge die Peakfrequenz!

Genau das selbe Verhalten zeigen alle geradzahigen Modes bei ihrer Funktions-Position XM-IN2 (V0) Mode 2 = C1, Mode 4 = C2, Mode 6 = G2, Mode 8 = C3, Mode 10 = E3, jeweils notiert.

Umso höher die Frequenzen, umso weiter vom Schallstück entfernt liegt die jeweilige XM-IN2 Position. Positionen tiefer Modes liegen anhand ihrer höheren Wellenlängen immer weiter von einem Zentrum in der Mitte - ich nenne dieses „XM“ - entfernt als die höherer Modes. XM-IN1 und XM-IN2 sind ohne Perturbation jeweils  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge voneinander entfernt, ebenso alle weiteren Druckbäuche von Druckknoten, mit einer Einengung am Druckbauch ist allerdings der Abstand lokal im Zentrum weiter, siehe oben.

Man kann das jeweils resultierende Zentrum als  $\frac{1}{8}$  Wellenabstand zwischen Druckbauchmaxima und Druckknoten beschreiben. Gerade Naturtöne haben bei XM-IN1 jeweils einen Druckknoten, ungerade nummerierte Naturtöne haben diesen bei XM-IN2.

Eine Querschnittänderung genau an einem Druckknoten sollte daher das gegenteilige Verhalten zeigen: Die globalen Magnituden der Peaks sind wiederum nicht geändert = Nulldurchgänge = Magnituden-Nodes.

Eine lokale Einengung am Druckknoten verkürzt lokal die Abstände zu Druckbäuchen davor und danach, global steht so nun mehr Länge zur Verfügung. Die globalen Abstände werden länger, verbunden mit einer starken oder maximalen Vertiefung gegenüber einer Referenzfrequenz ohne Perturbation.

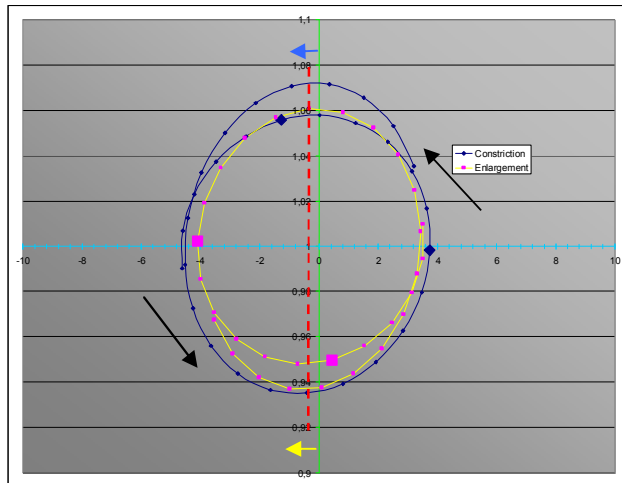
Wir haben: Globale Wellenlängen von Referenzfrequenzen, nun etwas veränderte globale Wellenlängen, und 2x einen stärker geänderten kürzeren Abstand als  $\frac{1}{8}$ WL, vor und nach der lokalen Perturbation (Constriction).

Verschiebt man die Einengung nun von einem Druckbauch in Richtung Druckknoten (bei ungeraden Modes von XM-IN1 in Richtung XM-IN2), dann ergibt sich ein Übergangspunkt, wo die globalen Wellenlängen gegenüber den globalen Referenz Wellenlängen nicht geändert sind = XM-Pitchnode. Global nicht mehr höher, aber auch noch nicht tiefer sind – keiner der globalen Druckknotenpunkte ist gegenüber der Referenz in der Lage geändert, aber wir haben durch die Perturbation selbst extra Verluste, bei Kugel und Bolzen messbar stark. Verluste vertiefen global, egal ob durch eine Einengung oder Erweiterung ausgelöst!

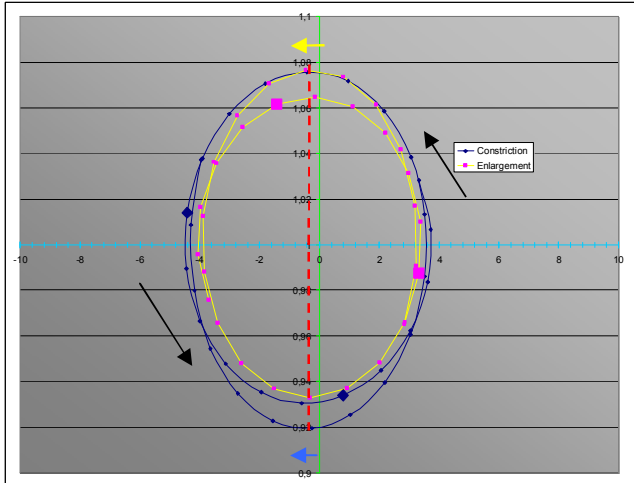
Die so „einseitig“ durch starke Verengungen ermittelten Pitch-Nodes an der Nulllinie passen daher nicht! Verluste = geringfügig generelle globale Vertiefung, eine Vertiefung durch eine Einengung hat daher den effektiven Nulldurchgang = Ursprung etwas später erst unter der 0 Cent Linie der Referenzfrequenz.

D. h. der tatsächlich gesuchte Ursprung der Position XM-Pitchnode ohne Perturbationen bei Mode 1, 3, 5, 7 und 9 mit einer Constriction liegt später -> als ermittelt, im Minus Cent-Bereich, bei Mode 2, 4, 6, 8 und 10 mit einer Constriction liegt früher <- als ermittelt, im Minus Cent-Bereich. Bei allen Modes ist an der gefundenen Referenz Null-Linie selbst noch (odd) / oder bereits (even) Modes eine erhöhende Wirkung durch die (starke) Einengung gegeben.

ART, Std. Perturbation, Grün: Referenzfrequenz; Rot: Pitch Nullversatz down durch Verluste = Ursprung.  
Plane Wave Modell, Radiationmodell Levine-Schwinger. Loss 1,33 Temp. ~23,5 Grad bei Std. Luftfeuchte



NT7, fixe Pos. 61+ 67cm sind markiert, 1cm Schritte



NT8, fixe Pos. 61+ 67cm sind markiert, 1cm Schritte

Constriction = Rechts: Druckbauch XM-IN1, ~61cm  
Constriction = oben: XM Pitchnode XM-IN2 ~71,5cm  
XM-PN: Ref: 66cm, Ursprung später bei Constr. -> 66,2cm

Constriction = Links: Druckknoten XM-IN1, ~61,5cm  
Constriction = unten: XM Pitchnode XM-IN2 ~70,5cm  
XM-PN Ref: 66,4 cm, Ursprung früher bei Constr. 66,2cm

Enlargement = Links: Druckbauch XM-IN1  
Enlargement = unten = XM Pitchnode XM-IN2 ~71,3cm  
XM-PN: Ref: 66,6cm, Ursprung früher bei Enlargement  
-> 66,2 cm

Enlargement = Rechts: Druckknoten XM-IN1  
Enlargement = oben: XM-Pitchnode XM-IN2 ~70,8cm  
Ref: 65,9 cm, Ursprung später bei Enlargement  
-> 66,2 cm

Dieser XM-Pitch Node Nulldurchgangspunkt zwischen den Magnituden Nulldurchgängen ist aber **nur dann** mittig nach exakt 1/8 Wellenlänge, wenn wir einen idealen closed-open Zylinder ohne Verluste hätten, oder aber wenn

- die Peakflanken links und rechts der Peakspitze annähernd die selben Winkel haben
- die Minima vor und nach den Peaks annähernd selbe Abstände zu den Peaks haben.
- die shared Minima Magnitude (zwischen Mode 7/8) einen Nulldurchgang vollzieht.
- lokale IR Reflexe am stärksten sind und die größte negativ zu positiv Abweichung haben (Constrictions).

Peak Magnituden wären an diesem Punkt dann ebenfalls maximal nach oben ausgelenkt. **Diese Peak Symetrie**, die der Symetrie bei einem Zylinder entspricht, ergibt sich bei Bb Trompeten etwas oberhalb der Mundstück popping Frequenz und liegt je nach Kessel, Seele und Rückbohrung und verwendetem Mundrohr zwischen 800 und 900 Hz, also im Bereich zwischen Mode 7 und Mode 8 mit Ventilstellung V0.

Umso größer die Wellenlänge (tiefere Naturtöne V0) im Vergleich zu dieser „idealen 1/8 WL“ passenden Symetrie ist, desto flacher werden ansteigende Flanken vor den Peakspitzen, die Peaks neigen sich mit Ihren Spitzen sichtlich zu dieser symmetrischen Position oberhalb der Mundstück Popping Frequenz **!**. Peak-Pitch Nulldurchgänge und Positionen mit maximalem Pitch Potential liegen weiter vom Mundstück entfernt – durch eine kürzere effektive Wellenlänge eine kürzere äquivalente Länge des Mundstücks+Mundrohres **↑**.

Umso kürzer die Wellenlänge (höhere Naturtöne) im Vergleich zur idealen 1/8 WL Symetrie ist, desto flacher werden abfallende Flanken nach den Peakspitzen, die Peaks neigen sich ebenfalls sichtlich zur Mundstück Popp. Frequenz, nun nach links **!**. Pitch-Nulldurchgänge passieren hier bereits früher, liegen näher am Mundstück **↓**. Am idealen Symetripunkt **!** gibt es diese Neigung aus obiger Definition nicht und Pitch-Nodes liegen an Positionen wo die Peak Magnituden ihr vollen Potential haben, ohne nennenswerten Versatz.

Zuvor habe ich erklärt, daß die XM-IN1 Position = Druckbäuche oder Druckknoten – näher am Mundstück liegen, je länger die Wellenlängen sind. Das würde bedeuten, daß XM-IN1 Positionen für Modes oberhalb der MPC Popping Frequenz weiter entfernt sein müssen. Das wären sie auch, wenn wir einen closed-open Zylinder vor uns hätten (2 XM-IN Positionen vor und nach XM-PITCH-Node bei 50% Rohrlänge). Beim Konus mit Spitze oder open-open Zylindern gibt es nur eine XM-IN Position bei 50% Rohrlänge, beim Frustum closed-open dann zwischen diesen Extremen, siehe dazu Teil 2B und auch Blechblasinstrumente mit oder ohne Mundstück verhalten sich so wie das Frustum closed-open betreffend möglicher Magnituden-Node Positionen im Rohr, beispielhaft die Funktionspositionen XM-IN1 und XM-IN2 getrennt durch XM-PN.

## Äquivalente Zylinderlänge bedeutet Wellenlänge bzw. Frequenz

Beim closed-open Zylinder liegen Impedanz Minima Frequenzen = gerade Vielfache eines Grundtones = **Antiresonanzen** in der arithmetischen Mitte zwischen den Impedanz Peak Maxima = Resonanzen.

Diese Impedanz Minima Frequenzen werden aber nicht verschoben, wenn ein closed-open Zylinder zu einem closed open-Frustum aufgeweitet oder zu einem Konus mit Spitze eingengt wird!  
Beim Frustum closed-open ohne Mundstück sind Peaks nie unter der arithm. Mitte der Minima = nur erhöht.

Wir haben es hier zudem zusätzlich zur zylindrischen Boresize mit äquivalenten Längen des Mundstücks + Mundrohres, sowie eines Schallbechers und Mode-Matching Effekten der Bauteile in Kombination zu tun.

Mit einem Mundstück, Mundrohr, zylindrischer Boresize und Schallbecher ergibt sich als Gesamteffekt, daß Minimafrequenzen

- unterhalb der „1/8 WL Peak Symetrieposition“ in viel geringerem Ausmaß verschoben sind obwohl Peak Frequenzen – vor allem durch einen Schallbecher stark angehoben sind. (Ähnlich Frustum closed-open)
- oberhalb gegenüber einem Zylinder wie Peaks abnehmen, aber dennoch an höheren Frequenzen liegen bleiben, auch wenn hohe Resonanzpeaks vertieft werden – z.b. durch das Mundstück und durch das Bell Skirt. Siehe dazu Teil 2E meiner Arbeit. Die Impedanz Minima sind daher in diesem Zusammenhang von größerer Bedeutung als bisher angenommen und ergeben die „Sägezahn-förmige“ Gestalt der Peaks.

Äquivalente Längen von Zylindern gehen immer von einer Frequenzänderung = reziprok der Wellenlänge = Zylinderlänge aus, Magnituden werden dabei nicht betrachtet! Die Input Impedanz Peak-Magnitudenwerte sind aber ein ganz wesentliches Kriterium gut spielbarer Instrumente!

Es ergeben sich in dieser Blechblasinstrument-Konstellation daher 2 „Frequenz-Domänen“ und somit 2 äquivalente Längen, die sich in ihrem jeweiligen Korsett gefangen gegenseitig in Schach halten:

### Die 1. Frequenzdomäne

stützt sich auf Impedanz Minima Frequenzen und ist nicht so stark von äquivalenten Längenänderungen betroffen. Minima sind nach wie vor näher einem einseitig geschlossenen Zylinder, mit einem starken Nebeneffekt: **Positionen von Peak Magnituden-Potential und Druck zu Fluss**. Vorhandene Minima-Frequenzen, ihre Lage zueinander **und daraus Peak-Magnituden Potential bilden diese 1. Domäne**. **Ändert sich die Peak Magnitude nicht (Node), so auch nicht die Breite, gibt ~ Minima Pitch Nodes**. Im weiteren wird diese Domäne von mir als Grundversatz oder als Magnitudenkurve bezeichnet.

### Die 2. Frequenzdomäne

= „Pitch-Kurve“ steht für **Peak-Frequenz-Potential**, und als Nebenprodukt ergibt sich hier das Impedanzminima-Magnitudenpotential samt deren Magnituden Nulldurchgängen und **Fluß zu Druck**. Diese Pitch-Kurve gibt gegenüber der Magnitudenkurve zusätzliche äquiv. Längeneffekte durch Mundstück, Mundrohr und Schallbecher wieder, zeigt frequenzabhängig die Position der akustischen „Rohr-Mitte“.

Pitch-Nodes und Pitch-Potential tieferer Modes sind noch weiter vom Mundstück entfernt, da akustisch höher/kürzer /. Bei höheren Modes oberhalb der idealen „Symetrie“ aber näher am Mundstück \, hier hat das Mundstück akustisch wirksam die Länge eines Zylinders, der nun länger als die **overall akustische Länge** des Mundstücks ist. Die „overall“ Länge liefert der IR-Bell Minima Reflex im Zeitbereich.

Ein Horn = Schallbecher verstärkt diesen Effekt. Tiefe Frequenzen werden wesentlich früher reflektiert (höhere Frequenz), hohe Töne erst bei immer höherer Krümmung der Steigung  $F''(x)$  bis zu einer Schwelle, der Hornbarriere, ab der keine nennenswerte Reflektion mehr in Richtung Mundstück stattfindet bzw. stark abgeklungen ist, Siehe Teil 2D.

Auswertungen der IR-Reflexe ergeben: Ein relativ kleines Kesselmundstück + Mundrohr + zylindrisches Rohr in üblicher Boresize 11-12mm hat eine „overall“ akustisch wirksame Mehrlänge von ~ 20mm gegenüber einem closed-open Zylinder in Boresize mit der selben Gesamtlänge und damit der selben notwendigen Endkorrektur am offenen Ende, siehe Teil 6, Time Domain.

Für diese akustisch wirksame Mehrlänge sind alle Peaks und Minima in der Impedanzkurve in Summe verantwortlich. Jene Peaks mit den höchsten Magnituden dominieren aber das Ergebnis dieser Summe, und diese liegen bei Trompeten, Kornett und Flügelhörnern etwas unterhalb der Mundstück Popping Frequenz. Mode 8 V0 liegt über der Mpc Popp. Freq. und hat daher bereits eine extra Mehrlänge zu diesen „overall“ 20mm. Dies gilt genauso für andere Grundstimmungen als Bb bzw. mit Ventilschleifen.

*Entscheidend ist das Verhältnis Kessel zu Seele und Rückbohrung – wobei hier das ganze Mundrohr + zyl. Rohr zur Rückbohrung gezählt werden muß. Bei anderen Blechblasinstrumenten und Mundstückgeometrien wie Posaune und Horn ergeben sich andere Verhältnisse und die Effekte müssen hier anders verteilt liegen, speziell beim Waldhorn. (Hier liegen die MPC Popp. Frequenzen dann oberhalb des üblichen Spielbereichs). Es wird hier vorerst nur hohes Blech mit Kesselmundstücken betrachtet, eventuell finde ich einmal Zeit für tiefere Instrumente und trichterförmige Mundstücke und die Unterschiede daraus!*

Zurück zu Kesselmundstücken, hohem Blech und dem Symetrie-Punkt:

Bei tiefen Modes ist dieser Pitch-Versatz relativ gering und anhand WL in der Praxis eher vernachlässigbar:

V0 (Bb)	Peak	=1/8 Wellenlänge		
Mode 2	~233 Hz	~ 18 cm,	Versatz 1,5cm =	+ 8% Richtung Schallbecher
Mode 4	~466 Hz	~ 9,0 cm,	Versatz 1,0cm =	+11% „-“
Mode 8	~932 Hz	~ 4,6 cm,	Versatz ~0	~ 0%

Bei höheren Moden ist dagegen ein starker Versatz: Bei Mode 10 ~ - 0,8cm bei einer 1/8 WL von ~3,5cm! Hier ist mit konventionellen Kesselmundstücken der größte akustisch wirksame Längenzuwachs und der Versatz beträgt  $\frac{1}{4} = \sim -0,8\text{cm}$  um welche Pitchkurven „out of phase“ sind. Auch die max. Auslenkungen = das Pitchpotential sind zu den max. Magnitudenänderungen im selben Ausmaß versetzt und „out of phase“. Perturbations-Spiralen zeigen diese Effekte sehr eindrücklich. Konventionelle Mundstücke und Mundrohr-Geometrie beeinflussen das akustische Verhalten in diesem Frequenzbereich sehr stark, siehe Teil 2F.

Durch Störungen = Verluste wird das Instrument akustisch wirksam länger = tiefere Frequenzen, größere globale Wellenlängen, egal ob die Verluste durch eine Einengung oder Erweiterung hervorgerufen werden!

#### Bei Simulationen zeigt sich:

Fallende Nulldurchgänge (gegenüber der globalen Referenzfrequenz) ungerader Modes bei XM-PN erscheinen etwas früher, aufsteigende gerader Modes später (mit Constriction). Das Pitch Pot selbst und ein Versatz zur Grundstimmung ergibt sich dann anhand der Perturbationslänge (Nullversatz down).

Dieser wächst überproportional anhand der Querschnitt-Reduktion. Allerdings sind die errechneten Auswirkungen auf Magnituden und Pitch-Potential speziell bei starken Perturbationen extrem überdimensioniert, dies scheint ein Fehler im zugrunde liegenden mathematischen Modell bei der Behandlung von Verlusten zu sein. (Siehe Versuch Kugel). Bei Plane-Wave Modellen zeigen lokale Einengungen immer ein starkes Übergewicht gegenüber lokalen Erweiterungen. Höhere simulierte Verlustfaktoren ~1,66 bringen ein etwas realistischeres Pitch Potential, Magnituden Potential bleibt aber gegenüber Messungen zu hoch.

Bei sphärischen Modellen bzw. einer Mischung aus plane und sphärisch – einer Matrix aus zylindrischen und konischen Abschnitten (Mapes-Riordan) haben dagegen Erweiterungen mehr Potential, unabhängig vom Radiation-Modell und unabhängig von einem stärker berücksichtigten Verlust-Faktor. Der ermittelte Nullversatz down (also Verluste) durch lokale Perturbationen ist bei diesem Modell gegenüber dem Plane Wave Modell aber noch stärker, siehe dazu Teil 7. Openwind <https://openwind.inria.fr/> meint dazu, die Mischung plane/sphärische Wavefront verursacht große Abweichungen spez. im Mundstück Kessel + Seele.

#### Bei meinen physischen Messungen mit Messkopf zeigt sich:

Bei Impedanz-Messungen fällt das Änderungspotential geringer aus, bzw. wird stärker „bedämpft“. Speziell Magnitudenänderungen sind wesentlich geringer. Constrictions und Enlargements zeigen im zylindrischen Bereich in etwa gleiches Potential. Extra Verluste sind geringer, ein Nullversatz down bei Perturbationen in Blechstärke (Hülsen) und in moderater Länge (~2cm) aufgrund von Verlusten kann fast ignoriert werden.

#### Pitch-Potential und Verluste – Bedämpfung durch Mundstück und Schallbecher:

Die äquiv. wirksame Länge des Mundstücks wird bei etwas tieferer Frequenz aber wieder kürzer, die equiv. Länge des Schallstücks wird ebenfalls etwas kürzer (= Reflexionspunkt früher), denn beide sind frequenzabhängig – und so wirken beide als Federkraft gegen diese Vertiefung durch Verluste und auch bei Perturbationen jeweils etwas abschwächend in entgegengesetzte Richtungen, siehe Teil 3.

**ART Simulation - Plane Wave, Closed-open Zylinder, mit Loss Faktor 1,33 (Teil 2C) :**

Beim closed-open Zyl. gibt es diese ausgleichenden Federkräfte nicht und Constrictions kreuzen mit Enlargements bei rund -0,7 Cent = ein größerer negativer Pitch Nullversatz, bei der ART Trompete V0 wurden -0,3 Cent ermittelt. Beim etwas engeren 10mm closed-open Zylinder liegen die Ursprungspositionen für Pitch mit Standard Perturbation permanent jeweils ~0,5 cm später als die Magnituden-Positionen.

Gefundene Pitch Nodes am Referenz Nullpunkt liegen bei einer Einengung jeweils etwas näher an Druckbäuchen, bei einer Erweiterung näher an Druckknoten. Eine gebildete „shared“ und Ursprungsposition liegt mittig, aber mit einem permanenten Nullversatz down (-0,7 Cent) mit der Standard Perturbation Hülse 20mm, R0,5mm. **Beim closed-open Frustum** ändern sich einige Auswirkungen, aber **Pitch-Nodes liegen auch hier immer etwas weiter in Richtung offenes Ende** gegenüber den Magnituden Positionen, es ergibt sich hier dann aber sehr rasch einen relativ starken Nullversatz aufwärts (+2 Cent).

*Hinweis: Die obigen Werte gehen von nicht zueinander invers proportionalen Querschnittänderungen aus, hier wurde die +/- Durchmesserdiffenz des Rohrquerschnittes konstant gehalten.*

### ART Tests: Temperatur, Luftfeuchte, Schallgeschwindigkeit, Wellenlängen und geänderte Positionen daraus:

Die ART-Versuchsdaten wurden unter Annahme einer Schallgeschwindigkeit von 344,481 m/Sek, = entspricht 22 Grad Celsius mit Std. Luftfeuchte ausgewertet.

Tatsächlich waren die Versuche mit Lossfaktor 1,33 mit 22 Grad Celsius und einer Luftfeuchte von 80%; die Simulation ist also das Ergebnis wie bei ~23,5 Grad mit Std. Luftfeuchte, und das entspricht dann einer höheren Schallgeschwindigkeit von 345,4m / Sek.

Das bedeutet etwas zu kurze errechnete Wellenlängen; der Unterschied beträgt Faktor 1,00266 bzw. 4,6 Cent als Längenunterschied.

	Mit 22 Grad	mit 23,5 Grad	berechnet:
IR Minima wäre dann	137,7cm	* 1,00266 = 138,06 cm	(+4mm oder 2 Samples)
IR Maxima wäre dann	147,05 cm	* 1,00266 = 147,44 cm	(+4mm oder 2 Samples)
XM IN-1 (Bell Minima IR / 2 )	-2cm wäre dann	+2mm später...	= 67,0cm.
1/8 Wellenlänge Peak Mode 8	= 4,602 cm	zu 4,614 = + 0,0123cm;	Diff. 1/8 WL
von XM-IN1 +1/8WL = 15 * 1/8 WL		bis Magn. Start Position	= 15 * 0,123mm = 1,84 mm
bei Peak Mode 10			= 21 * 0,09 mm = 1,88 mm
bei Peak Mode 2	18,548 cm zu 18,597mm		= 3 * 0,5 mm = 1,50 mm

*Da XM-IN1+ 1/8 WL bei höherer Schallgeschwindigkeit 2mm später wäre und die Wellenlängen der Modes aber proportional dann länger sind, ergibt sich wieder die selbe Startposition als mit etwas zu geringer Geschwindigkeit.*

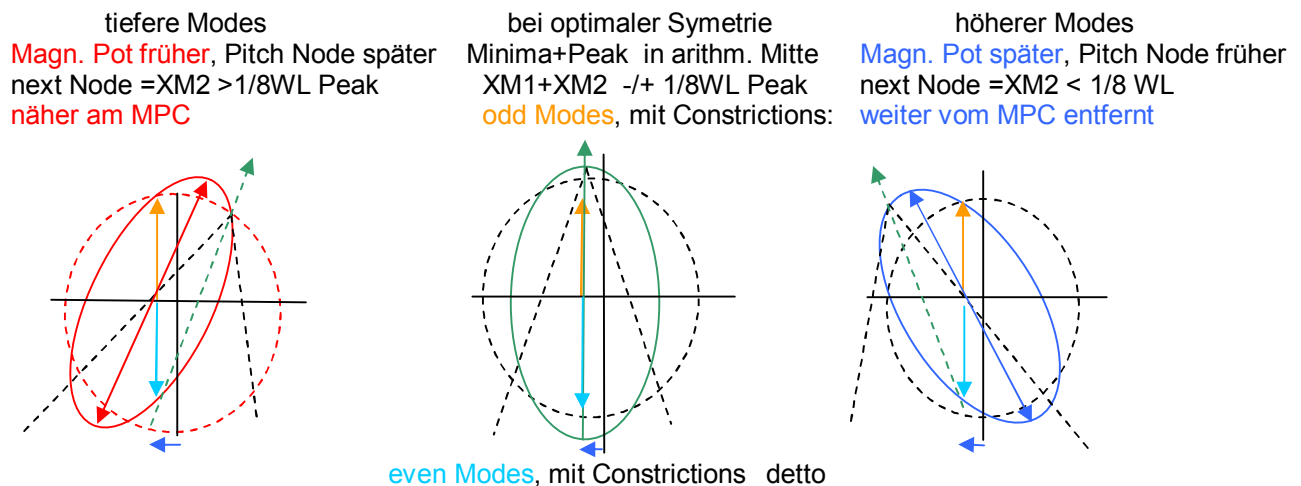
**Bei geänderter, korrekt bestimmter Temperatur ändern sich die Schallgeschwindigkeit und Frequenzen, die Wellenlängen und somit auch Positionen aber nicht! Wellenlänge = Speed/Frequenz.**



## Vorhandene Differenzen zwischen Simulationen und Messungen:

**Simulation:** Änderung Peakspitzen global am Eingang, denn diese interessieren natürlich am meisten, neigen sich zu den höchsten Magnituden- die sich durch Mundstück+Mundrohr ergeben.

bei XM-PN Ursprung (**Versatz dn**), mit Proben Richtung Schallbecher = immer gegen den Uhrzeigersinn



Das Magnitudenpotential ist generell sehr hoch, immer dann hat Pitch Potential geringe Anteile. Generell gibt es einen **Pitch-Versatz <-** zu tieferen Frequenzen aufgrund Verlusten durch die Perturbation. Perturbations-Radius für Angelpunkte + Perturbationslänge für Pitchversatz down anhand Verlusten. **Auch starke XXL-Perturbationen verschieben Magnituden-Nulldurchgänge bei Simulationen nicht.**

### FFT-Messungen Peak-Magnituden:

**Auch Magnituden Nulldurchgänge sind versetzt.** Sowohl an Druckbäuchen (NT7 bei XM-IN1) als an Druckknoten (NT8 bei XM-IN1) liegen gefundene Nulldurchgänge bei starker Einengung jeweils näher am Mundstück, wobei an Druckbauch Positionen aber ein kleinerer Versatz bei Radiusunterschieden auftritt.

Mit Testbolzen 7,25mm liegen Nulldurchgänge rund 5mm zu früh, mit Kugel 8mm rund 8mm früher gegenüber einer Hülse mit Durchmessereinengung 1mm und Länge 20mm (Standard Perturbation). Der tatsächliche Ursprung ist daher um mindestens diese Beträge später, Richtung XM-PN.

Bei FFT Messungen mit offensichtlich wesentlich mehr Gesamtverlusten = weniger Dynamik ändern sich Verhältnisse. Lokale IR Reflexe sind bei Constrictions immer wesentlich stärker als bei Enlargements. Das gemessene Magnituden Potential ist aber immer wesentlich geringer gegenüber Simulation.

**Die obigen Aussagen gehen von nicht zueinander invers proportionalen Querschnittänderungen aus, hier wurde die +/- Durchmesserdiffenz des Rohrquerschnittes konstant gehalten. (ca 10% mehr Pot.)**

Mehr Verluste = **Impedanz Minima Magnituden liegen höher**, die globale Grundstimmung fällt etwas. Es scheint, als würden sich die Peak Minimafrequenzen bei starken Perturbationsradien bei den FFT Messungen stärker verschieben als bei den Simulationen, dies würde den Magnitudenversatz erklären. Das habe ich aber nicht genau untersucht, es ändert ja auch nichts an den Unterschieden zu Simulationen, aber Minima-Frequenzen und Maxima-Magnituden bilden ja wie entdeckt - eine gemeinsame „Domäne“.

### FFT-Messungen Peak-Pitch:

Das gefundene Pitch Potential ist teilweise höher bzw. ist der gemessene Nullversatz geringer oder gar nicht vorhanden. Dadurch lassen sich Pitch-Nodes mit Kugel und Bolzen nicht eindeutig bestimmen. Teilweise verläuft der Pitch-Versatz fast nur unter der Null Linie. (Auch bei der Simulation wenn XXL, hier extrem).

Mit geringen Perturbationen ist ein erreichtes Pitch Potential sehr gering und damit die Fehlerstreuung hoch, auch liefern Referenz Messungen eine zu hohe Fehlerstreuung. Pitch-Nulldurchgänge sind also für mich mit Perturbations-Proben nicht eindeutig identifizierbar, Magnituden Nulldurchgänge sowie maximales Potential sind etwas leichter und genauer herauszufinden. Die verfügbaren Simulationsmodelle liefern aber ebenfalls recht unterschiedliche Positionen, auch zueinander. **Es bleibt ein großes Fragezeichen, wie es besser ginge!**



Reale Pitch-Positionen müssen daher „geraten“ werden. Ich versuche dies anhand der gemessenen IR-Bell-Minima aus dem Zeitbereich und der Impedanzkurven-Symetrie. Dies könnte ohne Perturbation erfolgen und bei jeder Messung, sowie nach erfolgten Mensuränderungen automatisch berechnet und neu angepasst ablaufen. Sind dann aber Vorhersagen für weit entfernte „Peaks“ noch einigermaßen korrekt?

### Berechnung Impedanz Peak-Kurven-Start Position für die jeweilige Peak Frequenz:

Behandelt man das Instrument als wäre es ein idealer Konus, ohne Stimmungsabweichungen:

Akustische Länge anhand IR – Maxima für V0 (alle NT, inklusive NT8) z.B. = 147,17 cm

IR-Maxima / 2 =  $\frac{1}{4}$  WL des fiktiven Grundtones (EFP) = 73,59 cm

$\frac{1}{4}$  WL fikt. Grundton EFP / 8 =  $\frac{1}{4}$  WL NT8 = 9,20 cm NT8 SOLL

$\frac{1}{4}$  Wellenlänge des fiktiven Grundtones Mode 8 =  $9,25\text{cm} * 8 = 74\text{cm} * 2 = 148\text{cm}$ .

ergibt 0,83cm akustisch länger = bzw. Stimmungsabweichung Mode 8 um 10 Cent (zu tief), aber nicht die Information zur Lage der Pressure-Nodes, sondern nur globale Abstände...

Die Lage der Pressure Maxima oder Pressure Nodes, Punkte wo Imp. Peak Magnituden-Nulldurchgänge vorliegen, können so nicht errechnet werden, können aber ausgemessen werden!

Var. A: IR-Minima / 2 = mit 137cm = 68,5cm – 2cm extra Länge Mundstück gegen Zyl. = 66,5cm

Var. B: IR-Minima – 2cm extra Länge Mundstück gegen Zyl. =  $137 - 2 = 135 / 2 = 67,5\text{cm}$

Ein Mittelwert (Durchschnitt) daraus wäre XM-PN ~ Mode #8 = 67,0cm

NT8 FFT Messung V0 Peak today = 929,8 Hz, gibt  $\frac{1}{4}$  WL = 9,25 cm NT8 IST (mit 345m / Sek).

Minus  $\frac{1}{8}$  WL = 4,625cm = wäre Max. Pitch Pot. Mode 8 near XM-IN1 dann bei ~ 62,4cm.

Ohne einen Versatz wäre das gleich XM-IN1 von Mode 8, dieser muß zwingend später liegen als XM-IN1 von Mode 7, die Differenz der  $\frac{1}{8}$  Wellenlängen beider Modes beträgt rund 0,5cm

XM-IN1 von Mode 7 sollte daher bei rund  $62,4 - 0,5\text{cm} = 61,9\text{mm}$  liegen.

XM-IN1 = Pressure Anti-Node bei NT7, Ursprung Position **ermittelt** = 61,9cm

**Ampl. Start Pos. ermittelt NT8 = XM-IN1 - ((NT #-1) \*  $\frac{1}{4}$  WL 9,25cm) =  $62,4 - 64,75 = -2,35\text{cm}$ .**

Das wäre der grundsätzliche MPC-Equivalent Längenversatz bei NT8 für Magnituden und Pitch, sofern es der exakte Symetriepunkt wäre. Die Mehrlänge des Mundstücks und Mundrohres gegenüber einem Zylinder selber Länge habe ich mit 2,0cm +/- 10% festgestellt.

Es bleibt praktisch ein Restfehler von ca. 0,5 cm bei der Bestimmung der Funktionspositionen, abhängig speziell vom Mundstück und Mundrohr.

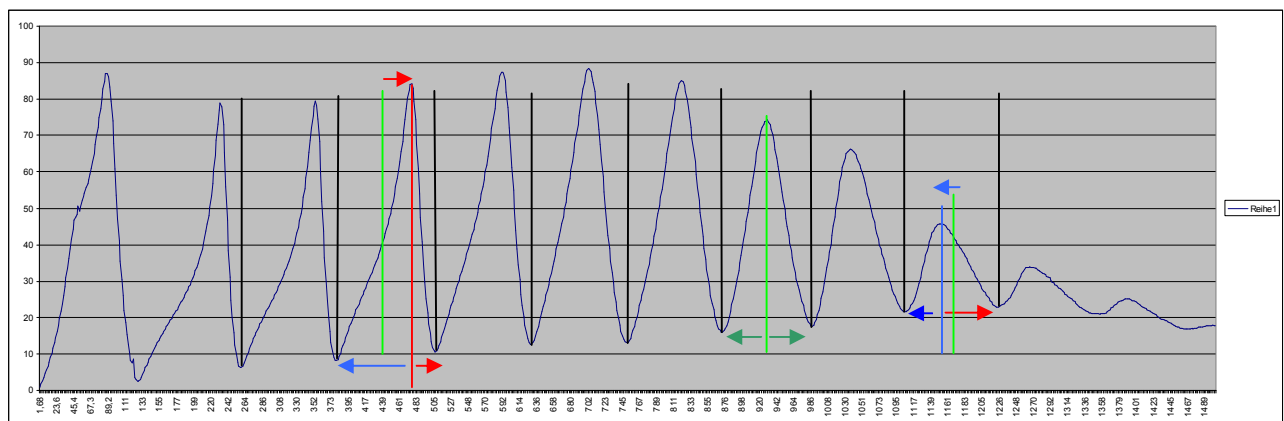
Ich habe bisher allerdings nur die Positionsprobleme bei Moden betrachtet, wo es zu keinem oder nur minimalsten Pitch Versatz kommen sollte. Die Suche für alle weiteren Frequenzen ist daher extrem zeitraubend und auch zunehmend fehlerträchtiger.

## Kann man die Lage von Magn.- / Pitchnodes aus der Impedanzkurve ermitteln?

Wenn ja, dann wäre das ein ganz entscheidender Vorteil gegenüber sehr langwieriger und sehr fehlerträchtiger Druckmessungen oder Impedanzkurven Vergleichen!

Diese Positionen sind erforderlich um Perturbationen, Stimmzug Gaps, Wiener Klappen und eventuell auch Stützen / Masse gezielt und erfolgreich zu platzieren.

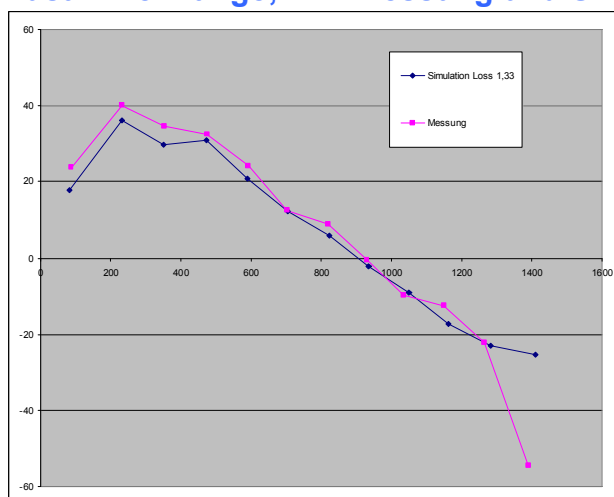
Da der Versatz von Pitch Nodes zu Impedanz Nodes oberhalb der MPC Frequenz an einem Symetripunkt kurze Zeit gleich Null ist, und beidseits mit zunehmendem Frequenzabstand monoton größer wird, sollte das Zentrum der Peaks bzw. die Flankensteilheit eine wichtige Rolle spielen. Die Peakspitzen neigen sich ja sichtlich wahrnehmbar jeweils in Richtung der MPC-Pop.-Frequenz. Bei ~ NT 7-8 ist in diesem Fall die Abweichung bei der Bb Trompete am geringsten.



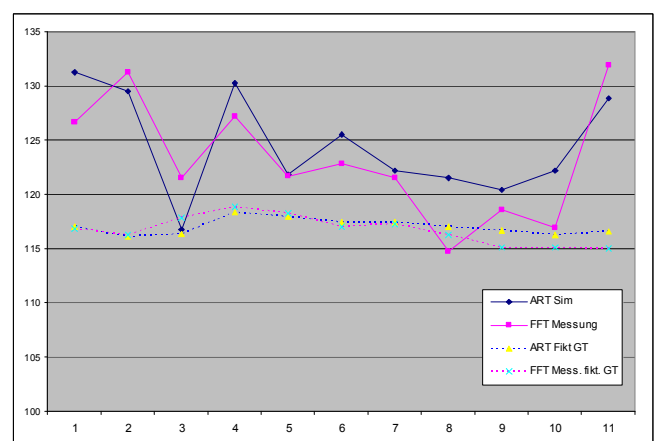
Frequenz Maxima und deren Abstand zu den Minima bzw. zum Zentrum der Minima, vorhandene Shifts und vorhandener Pitchversatz (FFT Messung V0).

*Wäre der Abstand gleich, wäre kein extra Versatz von Pitch- zu Amplituden-Kurven, sondern exakt 1/8 Wellenlänge Abstand! Equiv. Längen wären gleich einem closed-open Zylinder.*

## Zusammenhänge; FFT Messung und Simulation, Vergleich über Frequenz:

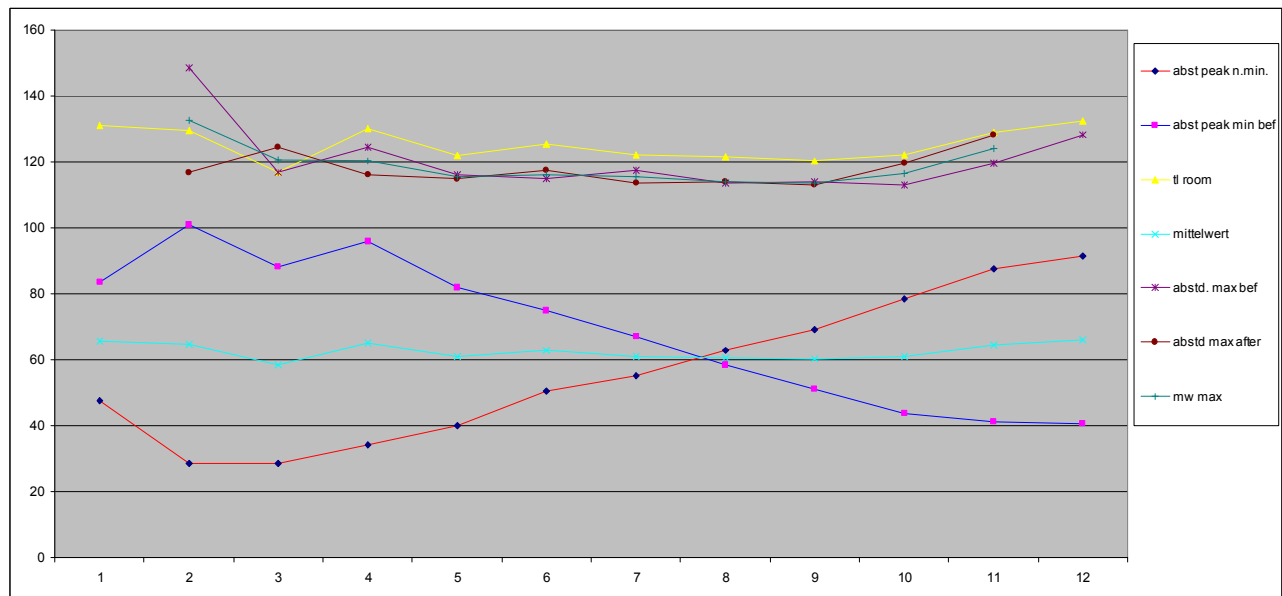


Abweichung **Peak Center** jeweils in Hz vom Mittelwert der Minimafrequenzen davor und danach

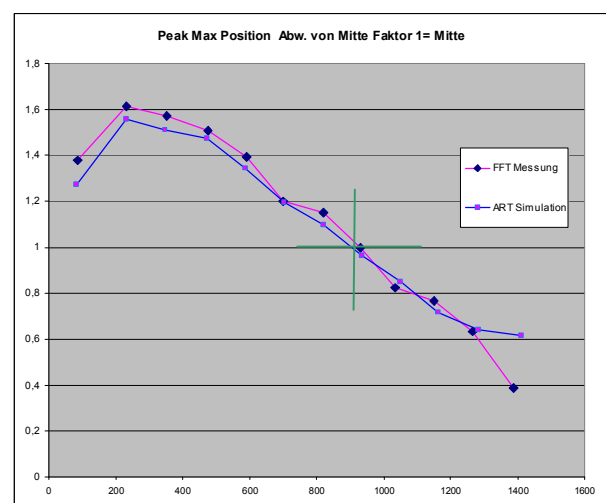
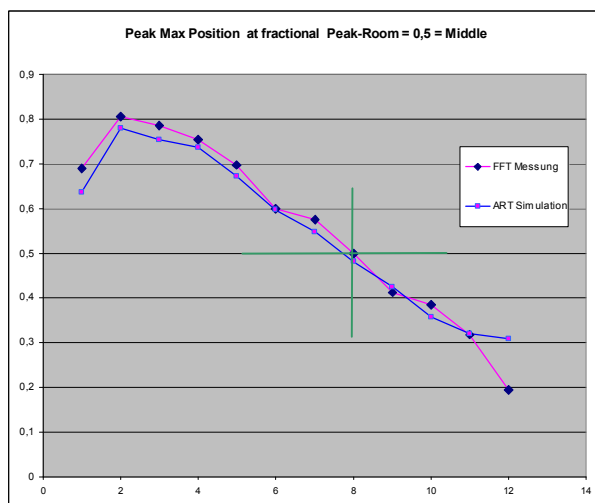


Frequenzraum der einzelnen Resonanzen, Abstand von Minima davor und danach in Hz

Bei der FFT Messung liegt Peak NT8 hier zufällig exakt bei Pos. 0 also der genauen Mitte zwischen den Minima. Ansteigende Flanken bis NT8 sind flacher, ab NT 8 sind abfallende Flanken flacher.



ART-Simulation, Lage der Peaks zu den Minima in Hz.



0 =Minima davor , 0,5= Mitte, 1 = next Minima

0=Minima davor, 1=Mitte, 2= next Minima

NT2 Peak weicht 60% nach rechts ab, NT 11 Peak 40% nach links **von der Mitte aus.**  
 bzw. NT2 Peak ist bei 80% Gesamtraum NT 11 Peak bei 33% Gesamt **zw. den Minima.**

Frequenzen:

XM-IN1:

Magn. Pot.

Peak Minima

Mitte zwischen

max. Pitch.Pot.

Pitch Nodes

Mitte

Imp.Minima

tiefere z.B. NT3, NT4

> **nachher**> **später****früher**< **vor Magn. Pot**

bei Symetrie Schnittpunkt

hier

hier

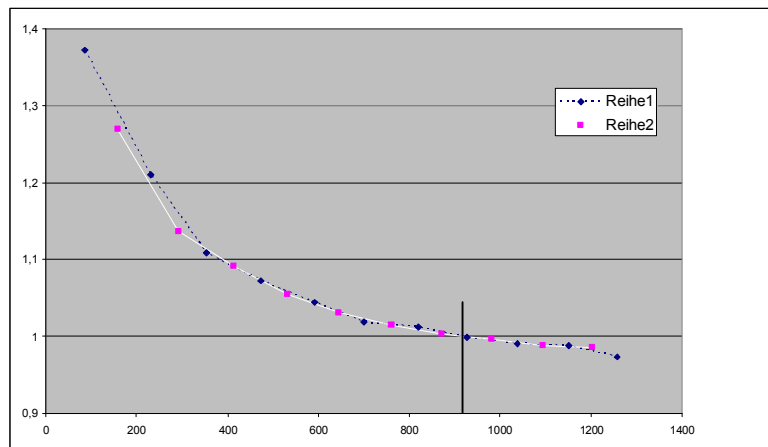
&lt;- = -&gt;

**bei Magn. Pot. =XM-PN**

höhere z.B. NT9, NT10

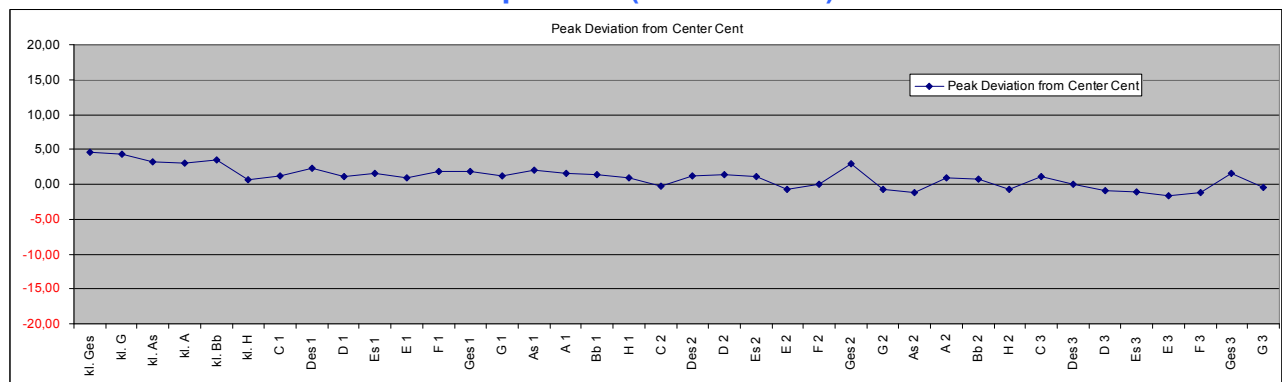
<**vorher**< **früher****später**> **nach Magn. Pot**

Obwohl beide Bb-Trompeten (Simulation gegenüber Messung) ein sehr unterschiedliches Intonationsverhalten zeigen und die Impedanzkurven stark voneinander abweichen, halten sich die Unterschiede bei den Frequenzverhältnissen von Minima zu Maxima in Grenzen. Die Idee und das Modell dahinter sollte daher für andere Bb-Trompeten mit einem relativ kleinen Restfehler genauso funktionieren. (Möglichst mit selbem Mundstück!)

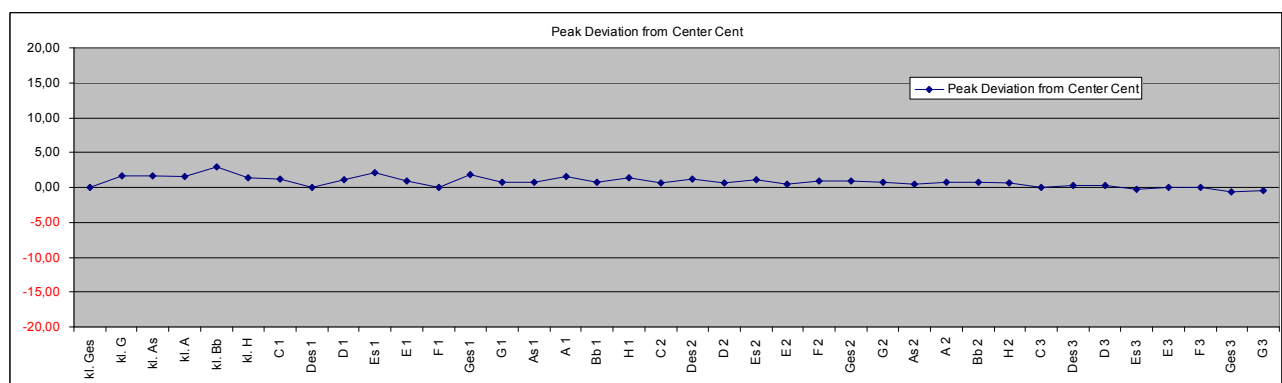


Blau: Peaks zu arithm. Mitte Minima, rosa Minima zu arithm. Mitte Peaks ( 1,38/ //1,0\\ 0,98 )  
 Faktoren Peak Frequ. zu Mitte Minima Frequ., um ~900 Hz bei 1,0 – hier liegt die ideale Symetrie.

**Auch ermittelte Peak Center Frequenzen (hier bei 98%) weichen bereits minimal ab.**



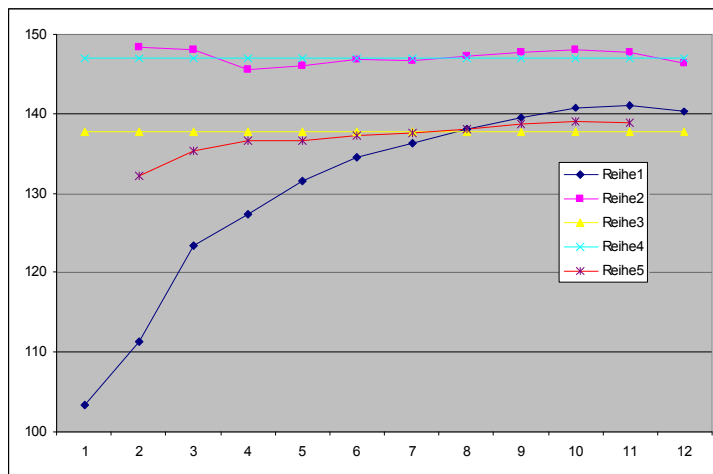
**FFT Messung:** Trend Peak Abweichung von Center Frequ. bei 98 % Peak Höhe rund 4 Cent über den Spielbereich, oberhalb Mode 8 (C3) aber nur minimal negativ



**ART Simulation:** Peak Abweichung von Center Frequ. bei 98 % Peak Höhe  
 Auch hier zeigt sich der Trend - insgesamt ca. 4-5 Cent.

Das bedeutet die Steigungen / Winkel reichen bis an die oberste Spitze des Peaks.

## ART Simulation: Äquivalente Längen für Impedanz Peaks und Minima



x=Mode #, y= eqL in cm

Reihe 1: Längen von closed-open Zylindern in cm für selbe Resonanzfrequenzen der Trompete (V0) in cm  
 $= ((\text{Mode \#} * 2) - 1) * \frac{1}{4} \text{ WL Peak Frequ.}$  → equiv L closed Zylinder für Mode 2 ist ~ 23% kürzer

Reihe 2: Längen von open-open Zylindern in cm für selbe Resonanzfrequenzen der Trompete (V0) in cm  
 $= (\text{Mode \#} * 2) * \frac{1}{4} \text{ WL Peak Frequenz}$ , also  $1 * \frac{1}{4}$  bzw.  $2 * \frac{1}{8}$  WL länger als closed-open Zyl.

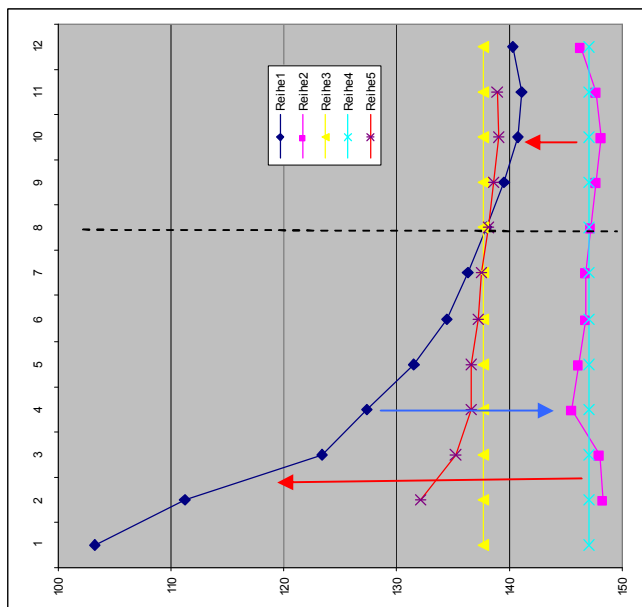
Abweichung zu Reihe 4: + = zu lang; - = zu kurz ---> gegenüber reiner Stimmung!

Reihe 3: Impulse Response Bell Minima = globale Gruppenlaufzeit closed-open Zylinder

Reihe 4: Impulse Response Bell Maxima = globale Gruppenlaufzeit open-open Zylinder

Reihe 5: Längen von closed-open Zylindern für selbe Mittelwerte der Antiresonanzen der Trompete (V0)

Wenn man diese Auswertung betrachtet, stellt sich heraus, daß die mittlere Frequenz der Antiresonanzen gegenüber dem closed open Zylinder durch das Mundstück/Mundrohr + Schallbecher geändert werden, allerdings nur geringfügig im Vergleich zu den Resonanzfrequenzen. Siehe hierzu Ergebnisse mit Mundstückersatz 9mm – Das Mundstück vertieft bei tiefen Modes die Antiresonanzen stark.



x=eq L in cm, y Mode #

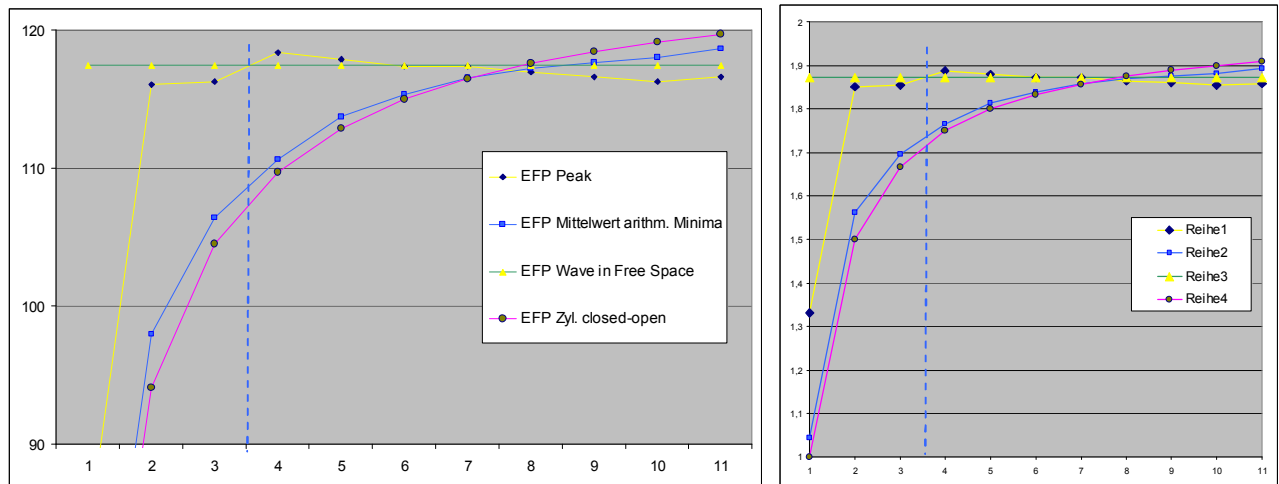
Dreht man die Grafik passend, ergibt Reihe 1 ~ ein Profil, daß an ein Schallbecherende erinnert.

Unter Mode #5 dominiert das Schallstück die Stimmung, darüber die frequenzabhängige Länge des Kesselmundstücks. Strichliert der „Symetripunkt“ der Peaks, dominiert durch die MPC Popp. Frequenz.

Natürlich kann die Stimmungsabweichung nicht auf das letzte Stück des Schallbechers reduziert werden, aber es wären eindeutig notwendige Korrekturen der Steigungen im Schallbecher über passende Bereiche notwendig, genauso wie das um die MPC Popp. Frequenz bei Mundrohren der Fall ist.

*Bell IR-Minima (137,7/2) -2,4cm = 66,45cm XM-IN1+1/8WL, das Mundstück hat in der ART-Simulation eine global akustische Mehrlänge von 2,4 cm gegenüber seiner physischen Länge, alle physischen Positionen liegen daher diese Mehrlänge früher als bei einem closed-open Zylinder entlang der Instrumentenachse.*

### Minima – und deren starker Einfluß in einer closed-open Peak-Geometrie



Ergebnisse der Impedanzwerte Art Trp. V0 – plane Wave, **Rechts: Frequ. Änderung als Faktor;  $y = \text{EFP in Hz}$**   
 Bell IR-Maxima = 147,05 cm – für free Space Berechnung  $F = (n \cdot \text{Speed}) / (2 \cdot \text{Länge}) / \text{Mode\#} = \text{EFP}$   
 Bell IR-Minima = 137,70 cm – für die Berechnung Closed Zyl.  $F = ((n \cdot 2) - 1) \cdot \text{Speed} / (4 \cdot \text{Länge}) / \text{Mode\#} = \text{EFP}$   
**Nicht gezeigt: EFP Mode 1 = Grundton closed-open Zylinder: 62,7 Hz MW-Min. 65,6Hz, Trompete: 83,4 Hz**

Grün: Resonanzen, die den selben Grundton ergeben (z. B. Konus mit Spitze) anhand Gruppenlaufzeit, gleichzeitig die Referenz für harmonische Verhältnisse = Reine Stimmung bzw. „Just Intonation“.

Gelb: Peaks = Resonanzen der Trompete / die Mode Nr. = äquivalent fundamental Pitch. – Frequ. gegenüber grün gleichzeitig die Abweichung = Inharmonizität gegenüber reiner Stimmung

Blau: Trompete: Arithm. Mittelwerte der Minimafrequenzen vor und nach jedem Peak, EFP Minima-Mitten Frequenz Mode #2 = ~5% höher als beim eL closed Zyl.

Rosa: closed-open Zylinder:  
 = Arithm. Mittelwerte der Minimafrequenzen vor und nach jedem Peak, EFP Peaks = Resonanzen eines closed-open Zylinders\*, Länge = IR Bell Minima

Berechnet man die Frequ. eines closed-open Zyl. so sind dessen Minima und Maxima jeweils 1/4 WL eines gemeinsamen tiefsten Grundtones voneinander entfernt. Maxima sind somit immer 1/2 WL des gemeinsamen Grundtones entfernt. Der Grundton selbst entspricht 1/4 Wellenlänge.

**\*Die Minima sind beim closed-open Zylinder daher immer in der arithm. Frequenzmitte zwischen Maxima, folglich entsprechen arithm. Mittelwerte der Minima somit wiederum exakt den Maxima Resonanzen!**

Weitet man einen closed-open Zylinder am offenen Ende zu einem „Konus“ auf, dann erhöhen sie die Peak Resonanzen, die Minima-Frequenzen bleiben jedoch an der Stelle, wo sie auch im Zylinder auftreten!

Stellen wir uns die Trompete als so geänderten closed-open Zylinder vor. Zusätzlich wurde ein Teil durch ein Kesselmundstück und ein Mundrohr ersetzt, und der letzte offene Teil wurde zu einem Horn aufgeweitet.

Dadurch ergeben sich 2 signifikante Resultate betreffend Resonanzen gegenüber dem zylindrischen Rohr: Resonanzen tieferer Modes sind sehr stark erhöht, oberhalb der MPC Popp. Frequ. aber wieder vertieft\* Impedanz Minima + Mitten wurden geringfügig erhöht, oberhalb aber wie die Resonanzen wieder vertieft. \*Peaks liegen durch das Mundstück hier auch unter der arithm. Mitte der Minima, bei einem Frustum nie.

Am Schnittpunkt – hier ~Mode 8 haben die Impedanz Minima und Maxima auch bei der Trompete kurz eine Symetrie, die ein closed-open Zylinder bei jedem Mode hat ~ gleiche Abstände 1/4 WL eines gemeinsamen Grundtones. XM-IN1 + 1/8 WL liegen beim closed-open Zylinder bei 50% Rohrlänge, XM-IN1 und XM-IN2 davon +/- 1/8 WL entfernt. Es gibt keinen Versatz durch ein Mundstück, Druckbäuche liegen exakt am geschlossenen Ende mit Startposition 0,0 und Druckknoten am offenen Rohrende (+ Equiv. Korr. Länge).

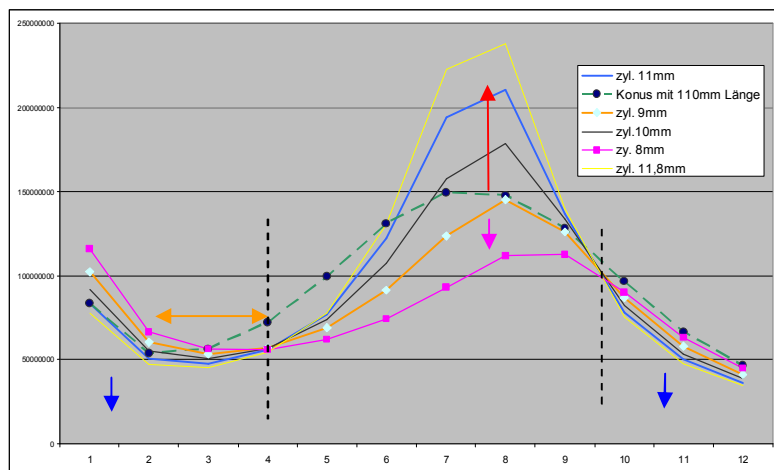


Unterhalb der MPC Popp. Frequenz liegen gemittelte Frequenzen von Imp. Minima teils weit unter der Peak Frequenz, oberhalb dann relativ rasch über den Peak Frequenzen. Peaks erhalten dadurch unterhalb eine lange und flache linke aufsteigende Flanke, oberhalb eine rasch ansteigende linke und langsam fallende rechte Flanke. **Der Peak Versatz kann also einerseits zur Mitte der Minima in Bezug gebracht werden, andererseits auch in Bezug zu den jeweiligen einzelnen Minima zuvor/danach, oder auch zur Frequenzmitte der Minima, die ein equivalenter closed-open Zylinder hätte.**

*Zusätzlich findet durch ein Kesselmundstück eine **extreme** Abänderung der Magnitudenwerte gegenüber einem closed-open Zylinder statt. Wo diese Abänderung ihr Maximum erreicht gibt es kaum Pitch-Potential – und wie sich zeigt so auch kaum auftretende Abweichungen zu Magnitudenpositionen = Pitch-Versatz ~0.*

### Mundstück + Rohrverlängerung: Wie diese (miteinander) wirken = Modematching:

Wiederholung, siehe dazu Teil 2F:



Die Peak Magnituden um die Mundstück Popping Frequenz **fallen** mit kleinerem Querschnitt. Das Mundstückende hat Dia 8,9mm. Ein plötzlicher „nur“ 9mm Zylinder ist ein „Bore-step“, aber ein negativer Sprung in der Funktion  $F(x)$ !  $\frac{1}{4}$  WL der MPC Popp. Frequenz =  $(\text{Speed/Frequenz}) \cdot 100/4 = \sim 10\text{cm}$ .  $\frac{1}{2}$  WL=20cm,  $\frac{1}{4}$  WL Mode 4=18,4cm  $1/1\text{WL}=40\text{cm}$ ,  $\frac{1}{4}$  WL Mode 2=36,8cm Das Mundstück beginnt physisch erst  $\sim 1,2\text{cm}$  nach seinem 1. Druckbauch! Der Step ist hier nahe an Druckknoten von  $(\frac{1}{4}\text{WL})$  Mode7: 10,3cm und Mode8: 9,2cm (mit  $A1=442\text{ Hz}$ , ET)

Ein Mundrohr „verbreitert“ den Einfluß der Mundstückresonanz, reduziert die möglichen Peak Magnituden. Das Peak-Pitch Potential wird dadurch größer, und wie es sich zeigt auch der auftretende Pitch - Versatz. Das Trp. Mundstück 8M9 entwickelt in Kombination mit Mundrohr und zyl. Rohren Magnituden Nodes mit  $\sim \frac{1}{2}$  WL = 20cm, mit längeren konischen Mundrohren liegt dieser Bereich etwas tiefer bei  $\frac{1}{2}$  WL  $\sim 25\text{cm}$ .

Peak Pitch Nodes bilden eine gemeinsamen Domäne mit „shared“ Minima Magnituden-Nodes  
Peak Magnituden Nodes bilden eine gemeinsamen Domäne mit „shared“ Minima Pitch-Nodes, wobei sich aber odd/even shared Minima gegenteilig verhalten, was zu einer kaum geänderten Mitte führt, d.h. bei lokalen Perturbationen auf das sich die obige Annahme bezieht verschieben sich shared Minima Frequenzen und dadurch auch deren Mitte nicht einseitig, durch das Mundstück jedoch schon.

Das Mundstück (+ Mundrohr) wirken zudem aber unter der MPC Popp. Frequenz akustisch kürzer - der frequenzerhöhende Effekt bei Peaks **vermengt sich** mit dem viel stärkeren Schallbechereffekt, der Schallbecher alleine würde Peaks Mode 4-6 nicht so stark erhöhen (verkürzer).

- an einem Übergang gleich lang und danach akustisch länger als ein zylindrisches Rohr mit selber Boresize, maximal oberhalb der Mpc. Popp. Frequenz bei rund 1000-1100 Hz. (Danach wieder akustisch etwas kürzer werdend, in etwa der obere Magnituden-Node von MPC+Mundrohr.) Wo das Mundstück seinen stärksten Einfluß auf Peak Magnituden nehmen kann, **entspricht das dem Einfluß auf die Minimafrequenzen** vor und nach den Peaks - und somit wieder deren resultierenden Mitten zueinander. Die resultierende Mitte der Minima ist daher an diesem Punkt annähernd gleich der Peak-Mitte!

## Symetrie - sind diese Informationen nun brauchbar?

Es gibt nur einen einzigen Übergangsmoment und Punkt, an dem die Sache sprichwörtlich rund laufen kann. Nur an diesem Punkt könnten Peak - Pitch-Änderungen zu Peak Magnituden Änderungspotential 1/8 WL der Peak Frequenz voneinander entfernt liegen. Ebenso trifft dies auf Peak-Pitch Pot und Minima Pitch-Pot sowie detto alle weiteren Nodes (Nulldurchgänge) zu. 1/8 WL der Peakfrequenz vor und nach dem Peak liegt ~ hier die geometrischen Mitte der Magnitudenwerte von Maxima und Minima = die Wave-Impedanz, auch bei FFT-Messungen.

## Die Definition und physische Position einer akustischen „Mitte“:

Diese liegt nach einer Startposition mit Druckbäuchen = Mundstückbeginn abzüglich der generellen, global akustisch wirksamen Mehrlänge des Mundstück+Mundrohres = eine negative Position,

gefunden ~  $-2,xx \text{ cm} + \{(Mode\# * 2) - 1\} * 1/8 \text{ Wellenlänge einer bestimmten Frequenz}$

### Diese bestimmte Frequenz:....

ist aber nur dann die Peak-Frequenz, wenn der Peak symetrisch in der Mitte der Minimafrequenzen liegt und hängt von der Frequenz Domäne ab: Peak-Pitch oder Minima-Pitch (für Peak Magnituden Positionen). An besagter Symetriefrequenz sind diese gleich der Peakfrequenz und es ergibt sich ein vorsichtiger, erster Anhaltspunkt, wo diese Positionen im Instrument entstehen können / müssen:

$\{(Mode\# * 2) - 1\} * 1/8 \text{ Wellenlänge einer bestimmten Frequenz}$

bei XM-PN odd Peaks

even Peaks

Minima: odd/even shared:

Druck zu Fluß steigt, -fast Bauch

Magn. Nodes

odd/even sh. Pitch max up

even/odd sh. Pitch max dn

mit Constr.

Magn. Pot max. up  
Pitch Node

Magn. Pot max. dn  
Pitch Node

eine 1/8 WL zuvor

Bei XM-IN1

Druckbauch für odd Peaks  
Magnituden-Node

Druckknoten für even Peaks  
Magnituden-Node

Minima: zw. Bauch u. Knoten

odd/even sh. Magn. max UP

mit Constr.

max. Pitch-Pot UP

max. Pitch-Pot down

Pitch Nodes

eine 1/8 WL danach

bei XM-IN-2

Druckknoten für odd Peaks  
Magnituden-Node

Druckbauch für even Peaks  
Magnituden-Node

Minima: zw. Knoten u. Bauch

odd/even sh. Magn. max DN

mit Constr.

Odd max. Pitch-Pot down

Even max. Pitch-Pot UP

Pitch Nodes

Die XM-Pitchnode Position der Symetriewellenlänge = ohne Versatz - ist also eine Funktionsposition, welche die akustisch wirksame Position, durch die berücksichtigte Mehrlänge des Mundstückes + Mundrohres aber bereits die physische Position an der Instrumentenachse angibt.

Im Fall der ART Trp. V0 liegt die gefundene Symetriefrequenz zwischen Mode 7 und 8.

einen Positionsstartwert

von  $-2,4 \text{ cm}$

eine XM-IN1 Position

$Start + \{(Mode\# * 2) - 2\} * 1/8 \text{ Wellenlänge Peak Frequenz}$

eine XM-PN Position

$Start + \{(Mode\# * 2) - 1\} * 1/8 \text{ Wellenlänge Peak Frequenz}$

eine XM-IN2 Position

$Start + \{(Mode\# * 2) - 0\} * 1/8 \text{ Wellenlänge Peak Frequenz}$

bzw. jede weitere Position anhand der Wellenlänge.

Was nun fehlt ist die schwierigere Aufgabe, Positionen der anderen Modes zu ermitteln.

Nur bei einem idealisierten closed-open Zylinder kann der Fluß an entgegengesetzter Stelle zu Druck sein, in jeder anderen oder abgeänderten Geometrie ist dieser Fluß immer gestreckt / verzerrt. (Siehe Perturbationsspiralen)

## Peak Magnituden – Funktionspositionen:

### Auf Intonation / Inharmonizität bezogen:

Immer wenn ein Mode =Peak Frequenz akustisch wirksam zu kurz ist, liegen seine Positionen weiter Richtung Schallbecher, bzw. nach einer akustischen Mitte der Symmetriefrequenz.

Ist ein Mode akustisch wirksam zu lang, liegen seine Positionen weiter Richtung Mundstückende.

Das ist der Effekt des Mundstückes + Mundrohr.

### Das bedeutet ...

neigt sich die Peakspitze nach rechts:  $> /$  liegen Peak Magn. Nodes weiter vom Mpc entfernt

neigt sich die Peakspitze nach links :  $> \backslash$  liegen Peak Magn. Nodes näher zum Mpc.

als die Referenz ohne Neigung = |

### Wir brauchen daher als Versatz am Mundstückende

für Peaks  $> /$  eine etwas größere Wellenlänge = geringere Frequenz als die Peakfrequenz

für Peaks  $> \backslash$  eine etwas kleinere Wellenlänge = höhere Frequenz als die Peakfrequenz.

### Gleich bedeutend ist ...

neigt sich die Peakspitze nach rechts:  $> /$  liegt die Mitte der Minima dazu bei längerer Wellenlänge

neigt sich die Peakspitze nach links :  $> \backslash$  liegt die Mitte der Minima dazu bei kürzerer Wellenlänge

als die Referenz ohne Neigung = | d.h. in der Mitte

*Der Schallbechereffekt verschiebt tiefe Modes aber zeitgleich sehr stark Richtung Mundstück, obwohl diese „akustisch“ kürzer sind → diese sind aber einfach nicht „kurz genug“; Mode 1 und 2, teils noch Mode 3!*

Wir können also sagen, der globale Impedanzberg am Input hat zwar eine eindeutige Spitze, diese ist allerdings meist nicht das Zentrum des „Berges“, Wellenlänge und daraus Positionen, wo sich durch lokale Querschnittänderungen dann globale Peak Magnitudenänderungen ergeben.

Aber auch die Mitte der Minima sind nicht das Zentrum, diese zeigen lediglich einen vorhandenen Versatz und daß sie von Rohränderungen weit weniger stark beeinflusst werden, speziell Richtung offenes Ende und – immer dann wenn Peak Magnituden kaum Änderungspotential haben. *Im Umkehrschluß hätten Peak Magnituden das größte Änderungspotential wo Imp. Minima Frequenz –Mitten kaum abweichen.*

Ein möglicher Maßstab ist die Wave Impedanz (WI), sie beschreibt die geometrische Mitte zwischen Impedanz Maxima und Minima, liefert also vorerst Magnitudenwerte, aber keine Frequenzwerte. Oberhalb der Wave Impedanz Magnitude wäre dann „Resonanz“; unterhalb 1/Resonanz = „Antiresonanz“.

Wir können zur Wave Impedanz Magnitude die gefundenen Frequ. Positionen an den Flanken ermitteln, und aus diesen wiederum einen Mittelwert bilden, die WI-Frequenz Mitte, *diese eventuell auch wieder geom.*

Wir können aber auch die Minimafrequ. vor dem Peak und die Peakfrequenz mitteln, und erhalten dann eine Frequenz dazwischen, aber keinen Magnitudenwert dazu. Das selbe dann mit dem Peak und der Minima Frequenz oberhalb. Auch hier könnte der passende Magnitudenwert an den Flanken dazu ermittelt werden, (dieser wird aber außer für Grafiken gar nicht gebraucht).

Nur bei der Plane Wave Simulation sind geometrische Mitten der Wave-Impedanz und jene der „Frequenz Crossings“ annähernd gleich. D.h. einem Wave Impedanzwert steht ein Frequenzwert an den Flanken gegenüber. Bei FFT Messungen liegen die Crossings der Frequenzmitten näher an den Peak Frequenzen, mit höherer Magnitude, Wave-Impedanz Werte sind dazu geringer (Ausnahme bei der ~ Symmetriefrequenz).

Bildet man nun wiederum eine Mitte aus den Frequenz-Crossings (=Flankenmitten), so ergibt sich eine Frequenz, die wiederum in die selbe Richtung wie Minima-Mitten zu Peaks abweicht, allerdings geringer.

Wir haben es hier mit äquiv. Längen der Minima zu tun. Allerdings nicht mit den großen Unterschieden in der akustischen Länge, sondern mit Positionen wo sich bei Änderungen **Minima-Pitch Nodes** bilden, und diese

bilden sich **abseits vom Symmetriepunkt nicht mehr bei einem maximalen Peak – Magnitudenpotential**, sondern bekommen einen sehr starken Versatz dazu in Richtung Mitte der Minimafrequenzen.

### Peak Frequenz – Pitch Funktions-Positionen:

Geht man systematisch vor und „schiebt“ eine Perturbation – z.B. Einengung am Mundstück beginnend Richtung Schallbecher, findet man die Magnitudennodes der Modes bei XM-IN1 mit der Frequenz aufsteigend immer später, näher zur akustischen Mitte des Instruments. Man könnte das vergleichen mit einem Entlangfahren an der Impedanzkurve – von der tiefsten zur höchsten Frequenz.

Nun ergibt sich zusätzlich, daß maximales Pitch-Änderungspotential (z.b. um XM-IN1, XM-IN2) oder Pitch Nodes (z.b. bei XM-PN) bei niedrigeren Modes und somit Peaks mit Neigung / immer später auftreten, bei Modes mit Peaks \ oberhalb der Symetrie allerdings früher, als die Positionen von Magnitudenänderungen. Es gibt also eindeutig einen stärkeren Zusammenhang für Peakspitzen und Resonanzfrequenzen für Frequenzänderungen, als das bei Peak Magnituden der Fall ist – dies orientieren sich öffentlich stärker an den Impedanzminima Frequenzen.

Es gibt also nichts gegenteilig zu sagen, globale Peak - Pitch Positionen weichen einfach etwas stärker ab, anhand ihrer „Steigung“; unabhängig ob lokal an einem Druckbauch, Druckknoten oder dazwischen.

Wir haben es bei den Verschiebungen wiederum nicht mit den großen Frequenzabweichungen z.b. Mode 2 gegenüber dem closed Zylinder von 35cm zu tun, sondern innerhalb von Größenordnungen, die durch die MPC-Equiv. Länge + Mundrohr verursacht sind = frequenzabhängige Abweichungen von rund +/- 5cm.

Die Positionsabweichungen gegenüber Peak Magnitudenpunkten betragen bei V0 Mode #2 rund 1,5cm (akustisch kürzer) weiter Richtung Schallbecher und bei Mode 10 rund 1,0 cm (akustisch länger), weiter Richtung Mundstück.

XM-Pitch-Nodes	> / liegen weiter vom Mpc entfernt	als Minima-Pitch/Peak Magn. Pot.
XM-Pitch-Nodes	=   liegen als Referenz vom Mpc entfernt	= Minima-Pitch / Peak Magn. Pot.
XM-Pitch-Nodes	< \ liegen näher am Mpc	als Minima-Pitch/Peak Magn. Pot.

Peak Pitch = Frequenzdomäne und äquivalente Länge anhand der Peaks:

Immer wenn „etwas“ näher am MPC Ende liegt – bzw weiter in die negative Länge des Mpc vordringt, dann ist es „akustisch“ wirksam länger (als das Mundstück physisch lang ist).

### Für beide Positions-Kurven gilt:

Unterhalb ca ½ WL MPC Popp. Freq. hat der Einfluß des Mundstück/Mundrohres auf die äquiv. Längenänderungen stark abgenommen und Schätzungen müssen daher etwas in Richtung weniger akustischer wirksamer Verkürzung gemacht werden. (Positionen werden in Richtung Mundstück korrigiert).

Es müssen daher gegenüber Peaks im Einflussbereich des Mundstückes für den Frequenzbereich unterhalb der 1/2WL MPC Popp. Frequenz andere Parameter für Schätzungen verwendet werden, bzw. muß auch ein Übergang zwischen den Modellen hergestellt werden.

Betrachtet man die gelbe „Intonationskurve“ der Peaks gegenüber der grünen Pitch „Vorgabe-Linie“, dann stellt man eine grobe Ähnlichkeit dieser Kurve zu jener Kurve fest, die aus den Punkten bei XM-PN gebildet werden (bei rund 66-67 cm).

Betrachtet man die blaue Minima Kurve, so hat diese eine grobe Ähnlichkeit mit der Kurve, die aus Punkten von Magnituden Nodes gebildet vor der Instrumentenmitte erscheint. = XM-IN1. 1/8 WL später wäre dann XM-IN1+1/8WL).

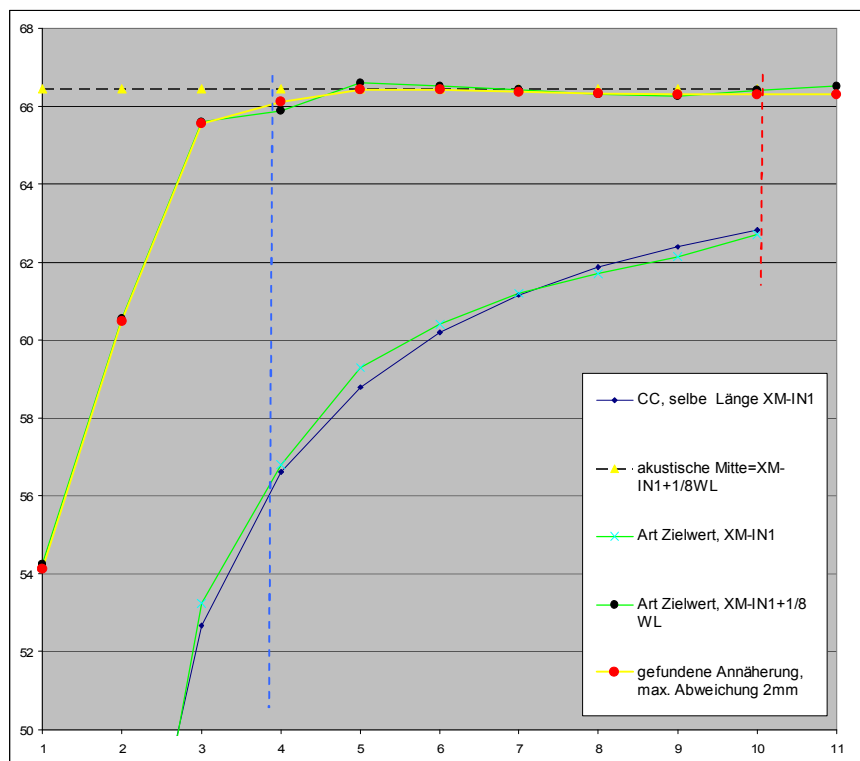
## Magnituden Nodes, Druckknoten und Druckbäuche

Nimmt man die Position von Druckzuständen im closed-open Zylinder, so zeigt sich, daß exakt in der Mitte des Rohres keine Druckknoten- und Druckbäuche entstehen, sondern jeweils 1/8 Wellenlänge davon entfernt liegen. In der Mitte bilden sich Pitch Nodes, als auch das maximale Magnituden Änderungspotential.

Es zeigt sich, daß dies auch bei Trompeten samt Mundstück und Schallbecher zu einem Gutteil der Fall ist und Modes im Einflussbereich des Mundstückes annähernd an einer solchen Mitte liegen. Tiefere Modes liegen stark im Einflussbereich des Schallbechers, und sind stark in Richtung Mundstück versetzt, um so tiefer die Frequenz ist. Das Instrument ist hier akustisch zwar schon stark kürzer = Reflektionen finden früher im Schallbecher statt, aber nicht kurz genug. Die resultierende akustische Mitte liegt daher näher am Mundstück.

Akustische Position Mitte Instrument =  $(\{(Mode\# * 2) - 1\} * \frac{1}{8} \text{ Wellenlänge Peakfrequenz})$

abzüglich 1/8 ergibt daher XM-IN1 = ~ Druckbäuche ungerader Modes bzw. Druckknoten gerader Modes.



Grafik #1

*Mode 4-10: eine „Z-Form“ bei der Trompete aufgrund MPC-Äquiv. Längenänderung*

Schwarz-strichliert:

Die akustische Mitte, als physische Position anhand Position XM-IN1 Mode 7 + 1/8WL = 66,45cm

*Die akustische Position der Mitte (137,7/2) liegt in diesem Fall 2,4cm weiter Richtung offenes Ende (MPC)*

Blau: XM-IN1 eines closed-open Zylinders mit selber Länge (IR-Bell Minima) 137,7cm

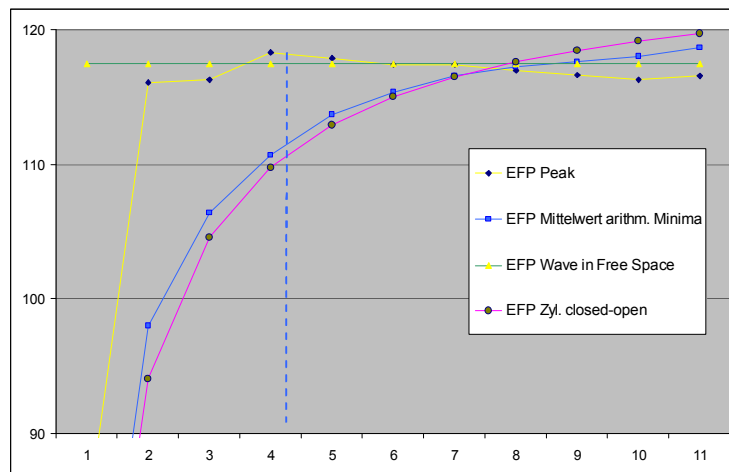
Grün: Die gefundenen Positionen bei der ART-Simulation Plane Wave, Bb-Trp. V0 XM-IN1 sowie XM-IN1 + 1/8 Wellenlänge Peakfrequenzen.

Gelb: Das Ergebnis der gefundenen Annäherung anhand Stimmung (Peak Frequ.)

Es ist also erstaunlich, wie gering die Abweichungen der Druckpositionen gegenüber einem closed-open Zylinder sind, sofern man den betrachteten Bereich auf Mode 5- 10 einschränkt, und findet eine fließend verlaufende Zweiteilung der Positionen durch den Schallbecher Effekt.

Man erkennt: Selbe Länge closed-Zyl.: Tiefe Modes haben größere Wellenlängen, XM-IN Pos. liegen dadurch weiter von der Mitte entfernt Richtung Mundstück - allerdings nur bis Mode 7.

Die Modes 5-10 der Trompete weichen vor allem wegen Rest-Inharmonizität ab. Allerdings wird das Bild deutlicher, wenn man die Antiresonanzen - hier als Mittelwerte ihrer Frequenz betrachtet und mit einbezieht:



Mode 4-10: Trp: „Z“-Form gegen Zyl.

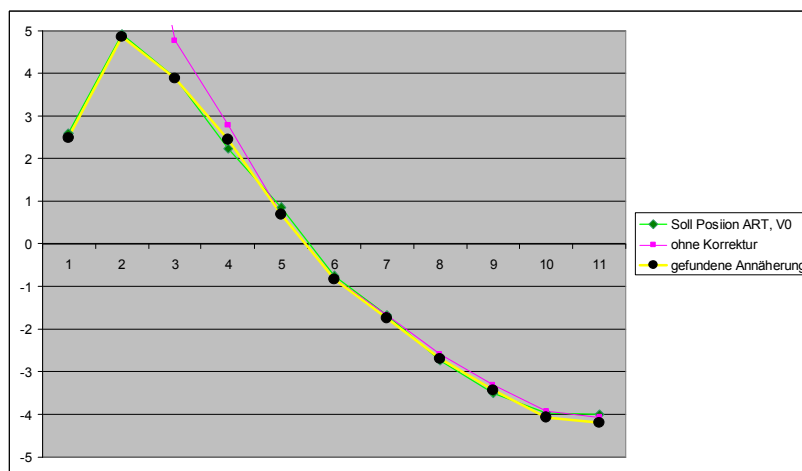
Inharmonizität der Trompeten Resonanzfrequenzen in Hz EFP. Bei Mode 4 und Mode 10 sind große Abweichungen und zeigen den gleichen Kurvenverlauf eines Versatzes zu einer akustischen Mitte – hier Frequenz und nicht Position - bzw. einer „Mpc“-Äquivalenten Längenkurve.

Die Minima liegen an den Randfrequenzen in diesem Bereich jeweils stark versetzt, die arithmetische Mitte der Minima liegt bei Mode 4 noch stark unter den Peak Frequenzen, zwischen Mode 7 und 8 symmetrisch an der Peak Frequenz, darüber dann oberhalb der Peak Frequenzen.

## Startposition Magnituden Nodes, Druckbäuche

= phys. Position akustische Mitte Instrument - ( {(Mode# \* 2) - 1} \* 1/8 Wellenlänge Peakfrequenz )

liefert daher Startpositionen der Magnitudenpositionen – den 1. Druckbauch jeder Resonanzfrequenz.



Grafik #2

1. Druckbauch, Position in cm 0=physischer Mundstückbeginn, Start von Magnituden-Kurven

## Eine grobe Annäherung der Magnituden- -Positionen anhand dieser Tatsache:

### Schritt 1:

Unter der Annahme daß XM-IN1 + 1/8 WL aller Modes > #4 annähernd an einer gleichen Position sind und XM-IN1 von Mode 7 bekannt ist: hier 61,2cm + 1/8 WL Peakfrequenz = 66,45 cm,

*oder anhand der Bell IR-Minima ermittelt werden kann: (IR-Bell Minima / 2) – 2,4cm Mehrlänge MPC*

kann das vorab als globale physische Position der akustische Mitte betrachtet werden.

Der Startwert für Mode #7 liegt hier somit dann bei 66,45 - (13 \* 1/8WL) = -1,67cm. (Rosa Kurve).



Es gibt noch Abweichungen zum Soll Ziel, es ist eine Korrektur Richtung Mundstück notwendig. Die XM – Mitten- Kurve hat ja doch diese gewisse Z-Form und das wurde noch nicht berücksichtigt. Ebenso hat die Kurve der Minima-Mitten diese Z-Form gegenüber einem closed-open Zylinder.

**Schritt 2:**

Nimmt man die gefundene Differenz zum 0 Wert (rosa Kurve) und teilt diese Differenz durch die Anzahl der 1/8 Wellenlängen zur Position akustische Mitte, erhält man einen Korrekturwert, der anhand der geringen Anzahl 1/8 WL sowie der Wellenlänge selbst für tiefe Modes somit viel stärker ausfällt als für hohe Modes.

Dieser Korrekturwert muss

*bei plane Wave Simulation zuerst auf positive Zahlen umgestellt werden,*

*bei FFT-Messungen bleiben negative Werte negativ -*

von der Kurve abgezogen werden, (nicht dargestellt) – dieser Schritt modelliert die Z-Form.

**Schritt 3:**

Daraus ergibt sich aber ein kleiner Kunstfehler, da ja auch der Wert von NT7, der bereits passen sollte somit geringer ausfällt – hier 1,3mm. Nimmt man diesen Fehler und teilt ihn durch 2, = 0,65mm kann man diesen Betrag bei allen Modes zum bisherigen Positionsergebnis wieder hinzurechnen. Der Restfehler von 0,65mm bei NT7 bleibt. Bei einer grob überschlägigen Betrachtung kann dieser Schritt entfallen.

Mode 1 und 2 lassen sich so allerdings aus vorab genannten Gründen noch nicht annähernd korrigieren.

Zudem habe ich bei Simulationen mit dem Druckverlauf festgestellt, daß Magnituden-Nodes bei tiefen Modes etwas früher liegen als Druck- und Flußbäuche. Beim einen Frustum closed-open liegen die ersten Positionen der Druckbäuche der tiefsten Modes näher am geschlossenen kleinen Ende. Da die Differenzen im Vergleich zu den Wellenlängen gering sind, ignoriere ich das hier bei Berechnungen. Eine Ungenauigkeit bei tieferen Modes wirkt sich in der Praxis nicht so gravierend aus als Abweichungen bei hohen Modes.

**Eine simple Annäherung gibt Schritt 4:**

Die ermittelte Abweichung (positiver Start) bei Mode 2 um 1/3 vermindern, diesen 1/3 Positionsbetrag zum Ergebnis von Mode 1 addieren, ergibt die gelbe Start-Positions Kurve.

Werden nun wiederum die notwendige Anzahl \* 1/8 WL der Peak Frequenz zu diesem Startwert addiert, erhält man die finale geratene Position von XM-IN + 1/8 WL.

Sehr wichtig ist bei dieser groben Annäherung allerdings die exakte XM-IN Position der Referenzfrequenz. Kleinste Abweichungen führen dann bei Schritt 2 zu relativ großen Fehlern in die falsche Richtung!

Trotz der unwissenschaftlichen Herangehensweise bei Schritt 2-4 trifft das Ergebnis scheinbar erstaunlich gut! Die Abweichungen betragen zum Versuch mit den ART-Simulationswerten max. 2mm. Der Hauptgrund scheint allerdings in der Tatsache zu liegen (siehe Grafik #1) daß die Positionen sich nicht weit von einem simplen closed-open Zylinder selber Länge entfernen und (siehe Grafik #2) die Minima in eben selber „Z“ Form verschoben werden.

*Dennoch habe ich hier noch in keiner Weise Impedanzminima oder Mittelwerte von Minimas verwendet.*

Ich kann mich damit nicht wirklich zufrieden geben, aber diese Art der Rechnung kann ev. als Gegenprobe bei anderen Berechnungsversuchen dienen.

**Pitch Positionen und Pitch-Versatz:**

Für Pitch Positionen weiß ich, daß die Winkel der Peaks zueinander – und somit Frequenzabstände eine größere Rolle spielen, und diese stärker ausfallen. Die Grenzen von +/- 1,5 cm bei Bb-Trompeten mit einem Kesselmundstück sind evident; nur habe ich bisher keine „simple“ Methode gefunden, dies explizit zu benennen.

Betrachtet man das Gesamtsystem und Vorgänge, dann ist es möglicherweise leichter verständlich, wenn man sich vom Gedanken verabschiedet, daß die „Töne“ am Mundstückbeginn gebildet werden.

Es werden durch die Lippenschwingungen zwar die 1. und alle weiteren Impulse erzeugt und zugeführt und eventuell aufrechterhalten, stehende Wellen anhand Druckknoten- und Druckbäuchen bilden sich allerdings erst nach mehreren Roundtrips dieser fortgesetzten Impulse anhand der Rohrgeometrie aus, und somit

deren physische Lage mit einer daraus resultierenden gemeinsam gebildeten akustischen Mitte. Von dieser Mitte aus bilden sich anhand der Wellenlängen die Positionen, somit auch die Startkurven am Mundstück.

### Ein Erklärungsversuch anhand der Minima-Frequenzen:

XM-IN1 und XM-IN2 sind Peak-Magnituden-Node Positionen. Diese korrelieren mit Minima Pitch-Positionen. XM-IN1 liegt frequenzabhängig immer näher an einer akustischen Mitte des Instruments, umso höher die Frequenz ist, desto XM-IN2. (Die Wellenlängen gehen von dieser Mitte aus.) Diese sind voneinander  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge entfernt, dazwischen  $\underline{\text{XM-PN}} = \pm \frac{1}{8}$  WL der Peak Frequenz, wenn es keinen Versatz gibt.

Hier haben Minima vor und nach der Peak-Frequenz ihr maximales Pitch-Auslenkungspotential. Würde die Peakmagnitude höher z.B. durch eine lokale Constr. odd Mode #, dann würde der Peak insgesamt auch breiter. Die Minima Frequenzen entfernen sich voneinander, das ergibt einen größeren Abstand der Minima durch eine größere Wellenlänge = tiefere Frequenz even/odd MIN, höhere Freq. odd/even MIN. Fällt die Peak Magnitude, dann gesamter Peak schmaler, Minimafrequenzen liegen dann näher beisammen. Daher haben um XM-PN Magnituden max. Peak Potential und Minima Pitch Pot.

Nun hat auch ohne Änderungen jeder Peak seine „Grundgestalt“ – durch die stark perturbierte Geometrie. Geht man beginnend mit tiefen Frequenzen aufwärts, könnte man sagen, **XM-IN1** repräsentiert annähernd die Pitch-Node Position der tieferen Minima vor der beobachteten Resonanzfrequenz, **XM-IN2** die Pitch-Node Position der höheren Minima nach der beobachteten Peak Resonanzfrequenz.

Neigt sich ein Peak in seiner vorliegenden Grundgestalt nicht = | = Symetrie zu Minima davor und danach, dann sind Peak Magnituden- und Peakfrequenzpositionen synchron und an selber Position, bei selber Wellenlänge. Die Abstände zwischen XM-IN1 und XM-IN2 sind praktisch ident:  $\frac{1}{4} \text{ WL} / 2 = \frac{1}{8} \text{ WL}$ .

Hat ein Peak eine Neigung /, bedeutet das eine kürzere Wellenlänge der Peakfrequenz im Vergleich zur Mitte der Minimafrequenzen. Die Entfernung zur tieferen Minima ist größer, zur höheren Minima kleiner.

Die beiden Abstände zu XM-IN1 und XM-IN2 sind dann nicht mehr gleich, sondern der Abstand zu XM-IN1 (Minima davor) ist länger, zu XM-IN2 (Minima danach) im Gegenzug kürzer. In Summe bleiben es  $\frac{1}{4} \text{ WL}$ . Peak Pitch Positionen liegen anhand einer kürzeren Wellenlänge (gegenüber den Minima Mitten) näher zur Position XM-IN2 und somit weiter vom Mundstück und  $> \frac{1}{8} \text{ WL}$  Peak von XM-IN1 entfernt.

Hat ein Peak eine Neigung \, bedeutet das eine längere Wellenlänge der Peakfrequenz im Vergleich zu der Minimafrequenzen-Mitte. Die einzelnen Abstände zu XM-IN1 und XM-IN2 sind wieder unterschiedlich, der Abstand zu XM-IN1 (Minima davor) ist nun kürzer, zu XM-IN2 (Minima danach) länger, in Summe aber  $\frac{1}{4} \text{ WL}$ . Peak Pitch Positionen liegen dann anhand einer größeren Wellenlänge (gegenüber den Minima) weiter in Richtung XM-IN1 (Abstand  $< \frac{1}{8} \text{ WL}$  Peak) und somit näher am Mundstück.

Es ist dies die einfachste Erklärung die ich für mich finden kann, es fehlen aber noch realistische Winkel / Frequenzverhältnisse anhand der Impedanzkurven für eine möglichst treffsichere Positionsfindung bei realen Instrumenten und FFT-Messungen.

Bei Berechnungsversuchen mit Zielreferenzen anhand der Simulation bin ich auf Frequenzfaktoren und Formeln gestossen, die ein vordefiniertes „Goal“ anhand der Auswertungen der ART-Simulation V0 sehr gut treffen. Diese werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

*Bei FFT-Messungen fehlt dieses „Goal“ vorerst noch – speziell für Pitch-Nodes, da unbekannt mit Ausnahme der Symetrie-Frequenz. Es müssen daher noch Anpassungen gegenüber der Vorgangsweise mit Simulationsdaten vorgenommen werden, speziell weil Frequenz Crossings hier stärker von Wave-Impedanz Crossings abweichen. Das Goal zeigt sich hier dann erst anhand gezielt durchgeführter Perturbationen und Auswertung der Ergebnisse an Instrumenten.*

### These: Magnituden- & Pitch-Positionen anhand Impedanzkurve (ART-Simulation)

Geht man davon aus, das es bei einer bestimmten Frequenz keinen Versatz durch eine äquivalente Länge des Mundstücks gäbe, so könnten die Positionen von XM-IN1 = jeweils Magnituden-Nodes, an welchen

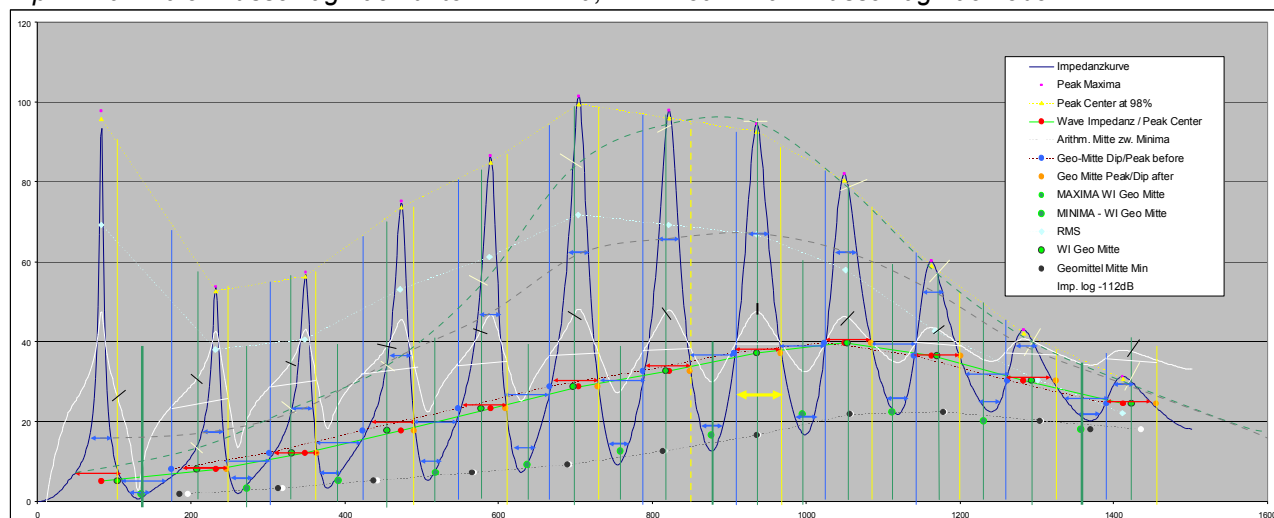
- \* gerade Naturtöne Druckknoten haben (wäre hier auch max. Pitch Pot down mit Constr.)
- \* ungerade Naturtöne einen Druckbauch (wäre hier auch max. Pitch Pot up –,-)

hätten so errechnet werden, indem man die Nr. des Naturtones abzüglich der Zahl 1 mit  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge der Peak-Frequenz Maxima multipliziert. **(NT#-1) \* (WL Peak/4)**

Äquivalente Längenabweichungen anderer Frequenzen dazu können mit Hilfe der Wave-Impedanz und daraus ermittelten Frequenzfaktoren = Längenfaktoren bestimmt werden.

### Der entscheidende Einfluß der Wave Impedanz – mit Daten aus ART Simulation\*:

WI = Wave Impedanz = das geometrische Mittel aus Magnituden Peak Maxima und Magnituden Minima.  
Dip = maximaler Ausschlag nach unten = Minima; Peak: max. Ausschlag nach oben



#### NT8 hat hier den geringsten Versatz – WI Mitte der WI Crossings = ~ Peak Maxima

Grün/Weis: Crossing WI-Geo Mitte Crossings, Blau & Orange=WI- Geo Crossings, Gelb=Peak-Center-Frequ., Gelb strichliert: simulierte MPC Popp. Frequ. bei 850 Hz (nur MPC)

Schwarze Punkte: Geometrische Mitte Dips = Peak/WI Mitte  $^2$ , Weiß: Arithm. Mitte Dips

rote Pfeile: WI Abstand NT8, blaue Pfeile kurz:  $\frac{1}{2}$  Abstand. Hellgrün = Wave Impedanz

Weiß: überlagert: Logarithmische Impedanzkurve und WI Crossings, (Geometr. Mittelwerte, -112 dB)

(Die Höhe aller WI-Crossings before/after Peak = blau/orange Punkte sind in der Grafik auf Höhe der WI-Mitte eingetragen, liegen tatsächlich aber auf der hellgrünen Kurve)

**\*Simulation mit Plane Wave: Die jeweilige „Frequenz-Mitte“ zwischen Impedanz Peak „Bergspitze“ und Impedanzminima=Dip=„Talsohle“ entspricht hier auch der aus Magnituden ermittelten Wave-Impedanz!**

Hier kreuzt = „crossing“ die Impedanzkurve jeweils den Wert der Wave Impedanz Hüllkurve.

Es sind die Punkte / WI- geo Crossings vor und nach der Peak Maxima, an denen

- A: sowohl der skalare (geom.) Frequenz-Faktor zum vorigen oder jew. nächsten Minima gleich ist
- B: auch der skalare Faktor, um welchen die Hüllkurven der Impedanzminima kleiner und die der Impedanz Maxima an diesem Punkt größer sind.

*\*Hinweis: Bei realen FFT Messungen liegen die Frequenzmitten (Crossings) before und after Peak **nicht** mehr an den Geo-Mitten der Magnitudenwerte = Wave-Impedanz, **sondern** aufgrund breiteren und abgeflachten Peaks immer **bei höheren** Magnitudenwerten! Die **Bezeichnung** WI-Crossings bzw. **WI-Mitte** trifft nur in der Simulation zu, wird von mir folgend aber zum einfacheren Verständnis weiter so verwendet! Bei realen FFT-Messungen sind die beiden Frequenz-Crossings näher an den Peakspitzen.*

Wiederum die Mitte dieser beiden gefundenen Punkte before und after Peak = „Crossings-Mitte“ kann vereinfacht als eine „fiktive“ Naturton Mitte ohne Peak Magnitudenversatz betrachtet werden. Eine aus WI-Crossings-Mitten gebildete Hüllkurve folgt ~ der Mundstück-Impedanzkurve. Unter NT8 sind die Peak Frequenzen dazu wesentlich höher, darüber tiefer, somit auch die Wellenlängen kürzer bzw. länger als die Längen an dieser „WI-Mitte“ mit Magnituden-Nullversatz.

*Alle Peak Maxima haben zu dieser Wave-Impedanz Frequenzmitte selbst immer einen höheren Wave-Impedanz-Magnituden-Betrag, an einem idealen Symetripunkt wäre dieser nahezu gleich.*

## Grundsätzliche Überlegungen – Definition von Mitteln:

### Das arithmetische Mittel MW (= herkömmlicher Mittelwert bzw. Durchschnittswert):

z.B. Peak + Minima Frequenz before  
 Wert A + Wert B =  $(A+B) / \text{Anzahl Werte (hier 2)}$  = Durchschnitt  
 am Beispiel NT4: 473Hz + 442 Hz =  $916 / 2$  = 458,0 Hz

Faktoren sind dann 473/458 = 1,03 mal mehr als Durchschnitt  
 unterschiedlich 458/442 = 1,04 mal weniger als Durchschnitt  
 (= in / auf 100 gerechnet)

### Das geometrische Mittel GM (Geomittel):

$$\frac{A}{B} = q^2$$

$$\sqrt{A/B} = \sqrt{A} / \sqrt{B} = q \text{ Faktor zu Geomittel}$$

Beispiel NT4:  $\sqrt{473 / 442}$  (A Peak Hz / B Minima before Hz)  
 bzw.  $\sqrt{1,0701} = \sqrt{q^2} = \text{selber Faktor } q \text{ } 1,0344$   
 mal mehr oder weniger als Geomitte below peak (GM fc bp)

Faktoren daraus: Peak Maxima 473,00 /  $q_0 \text{ } 1,0344 = 457,23 \text{ Hz Geo-Mitte before}$   
 Geo.Mitte before 457,23 /  $q_0 \text{ } 1,0344 = 442,00 \text{ Hz Minima before}$

Das bedeutet, ein geometrisches Mittel fällt immer etwas kleiner als das arithmetische Mittel aus, dafür bleiben die Faktoren bei Multiplikation und Division exakt gleich. Die Positionsabweichungen zwischen geometrischem Mittel und arithmetischem Durchschnitt sind bei hohen Frequ. gering, werden aber mit abnehmender Frequenz (=längerer Wellenlänge) zunehmend wesentlich größer!

### Die dazugehörigen Frequenzpositionen der Wave Impedanz Werte können wie folgt umgewandelt werden: (am Beispiel NT4, Crossing below)

Wurzel aus	Maxima/Minima below= 1,0344	GM Frequ.-Faktor below peak
Maxima Hz	/ q-Faktor = 457,23	GM Frequ. crossing below peak = GM fc bp
Minima Hz	* q-Faktor = 457,23	GM fc bp
Maxima Hz	/ GM fc bp = 1,0344	q Faktor bp
(Maxima Hz	/ Geo fc bp) ^2 = 1,0701	Faktor Peak Maxima / Minima bp = $q^2$

$$A \cdot B = \text{Geomittel}^2: \sqrt{A \cdot B} = \sqrt{473 \cdot 442} = \text{Geomittel} = 457,23 \text{ Hz (GM fc bp)}$$

es folgt:

Wurzel aus (Minima below \* Minima above) = GM Minima Hz  
 Wurzel aus (GM fc below p \* GM fc after p) = GM fc = Geomittel beider Geomitten in Hz

Geometrische Mittel liefern Brüche, die gekürzt werden können:

GM=Geomittel MW=Mittelwert fc=frequenz crossing b=below a=above p=peak

GM fc = Geomitte Frequenz der beiden Geomitten vor und nach dem Peak

	<u>Peak</u>	/	GM fc		
below	GM fc bp		GM fc bp		
Peak					
= bp =	<u>Peak</u>	*	GM fc bp	=	<u>Peak</u>
	GM fc bp		GM fc		GM fc
					= >1,0
			Symmetriefrequenz		~ 1,0
	<u>Peak</u>	/	GM fc		
above	GM fc ap		GM fc ap		
Peak					
= ap =	<u>Peak</u>	*	GM fc ap	=	<u>Peak</u>
	GM fc ap		GM fc		GM fc
					= <1,0

Der Faktor  $[(\text{Peak} / \text{GM fc})^2]$  entspricht wiederum der geometrischen Mitte der Impedanz-Minima vor und nach dem Peak und ergibt einen etwas kleineren Frequenzwert als der Faktor (Peak Hz / arithmetische Mitte der Minima Hz).

Die GeoMitte beider Freq. Crossings = GM fc liefert Faktoren für Magnituden-Nodes:

<u>Peak</u>		<u>Peak</u>		
GM fc bp	*	GM fc ap		= Frequenzfaktor für
-> =		$(\text{Peak} / \text{GM fc})^2$		Peak Magnituden-Positionen
				Kriterium sind Minima Mitten

\* -> aber im Bereich V0 NT2-4 näher:  $= (\text{Peak} / \text{arithm. Mitte Minima})^1$

GM fc bp = Geo Mitte Freq. Crossings below Peak liefern Faktoren für Pitch Kurven:

<u>Peak</u>		<u>GM fc bp</u>		<u>Peak</u>
GM fc	*	GM fc	$^2$	GM fc bp
-> =		$[(\text{Peak} / \text{GM fc})^4]$	/	<u>Peak</u>
				GM fc bp
				= Frequ. Fakt. für Pitchkurven

\* -> aber im Bereich V0 NT2-4 näher:  $= (\text{Peak} / \text{arithm. MW fc bp})^1$

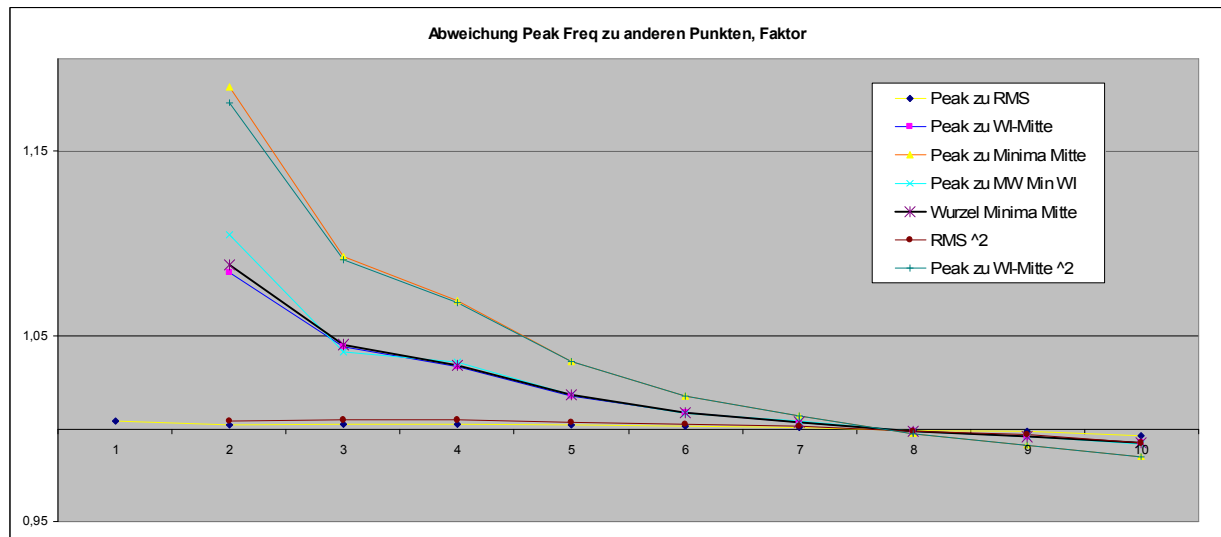
GM fc ap liefern ebenfalls Faktoren für Pitch Kurven:

-> erst ab V0 NT5 aufwärts verwertbar, dafür näher am Ziel!

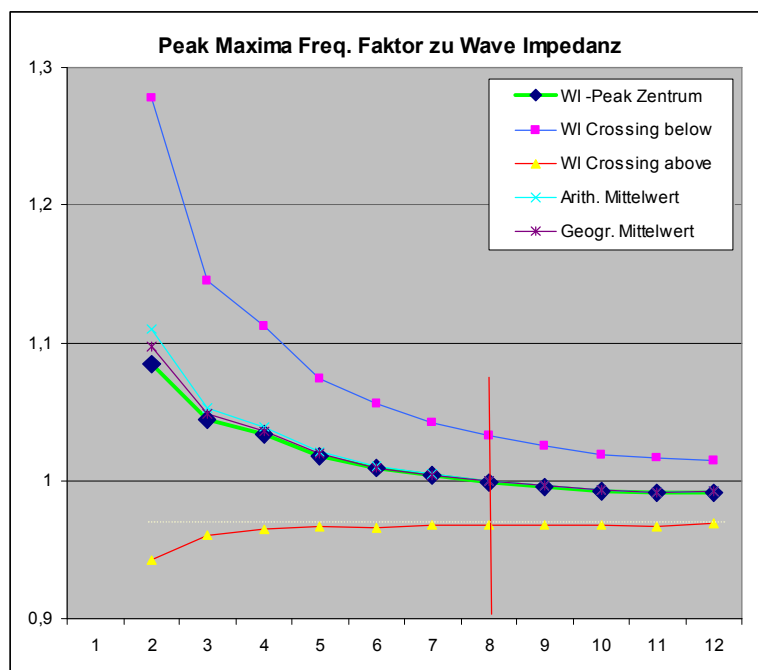
<u>Peak</u>		<u>GM fc ap</u>		<u>GM fc ap</u>	$^2$
GM fc	*	GM fc	/	Peak	
-> =		$(\text{Peak} / \text{GM fc})^4$			= Frequ. Fakt. für Pitchkurven

\* -> unter Berücksichtigung eines weiteren Korrekturschrittes (-> Diff.  $\frac{1}{4}$  WL).

Peak NT 2-4 bzw. NT5 hier bezogen auf Bb-Stimmung V0;  
tatsächlich relevant sollte ca. die  $\frac{1}{2}$  Wellenlänge der MPC Popp. Freq. sein.



Versatz der Peak Resonanzen zu weiteren ermittelten Punkten als Faktor der Peak Frequenz.  
*Der Unterschied von Geo-Mitten zu arithm. Mitten wird ab V0 Mode 5 verschwindend klein!*



Peak Maxima = Faktor 1,0

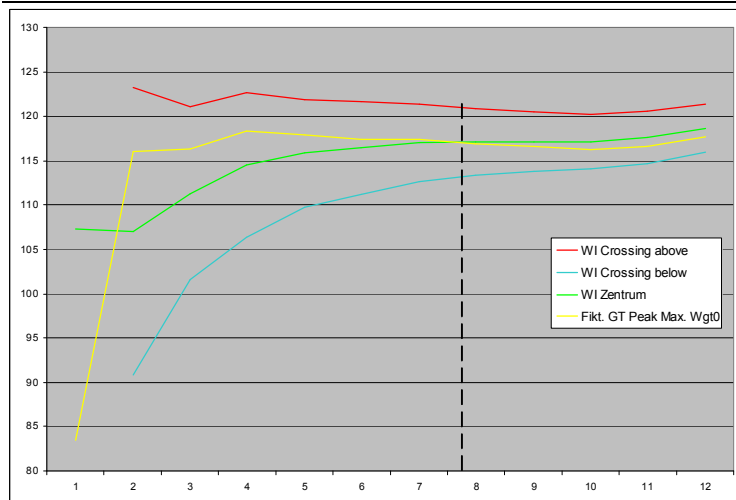
Die Frequenz Faktoren  
Peak-Maxima Freq. zu  
Frequ. Crossing-above  
ändern sich erstaunlich wenig,

Ausnahme unterhalb V0 NT5, hier  
kreuzt auch ~ die WI-Mitte mit der  
Halbwertsbreite der Peaks = RMS  
Wert. (Hier dann nicht mehr  
anwendbar).

WI Zentrum arithm.: **Magnitudenwert**  
aus arithm. Mittelwert Magnituden  
Peak/Dip  
auf Frequ. Höhe der arithm. Mitte der  
Minima.

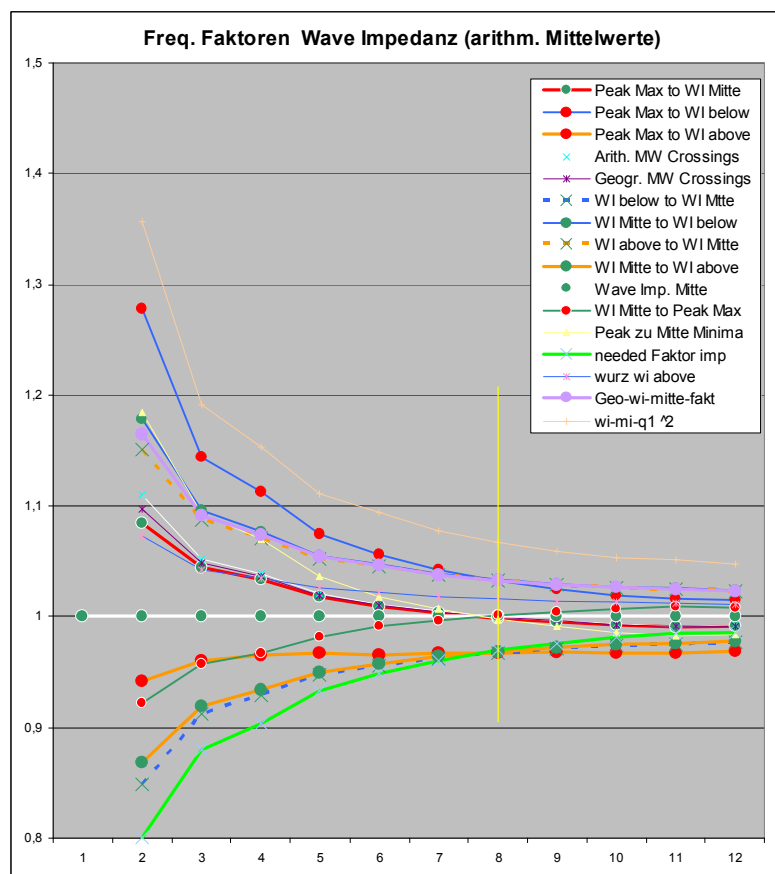
*Tippfehler: geogr. = geom. Mittelwert.*

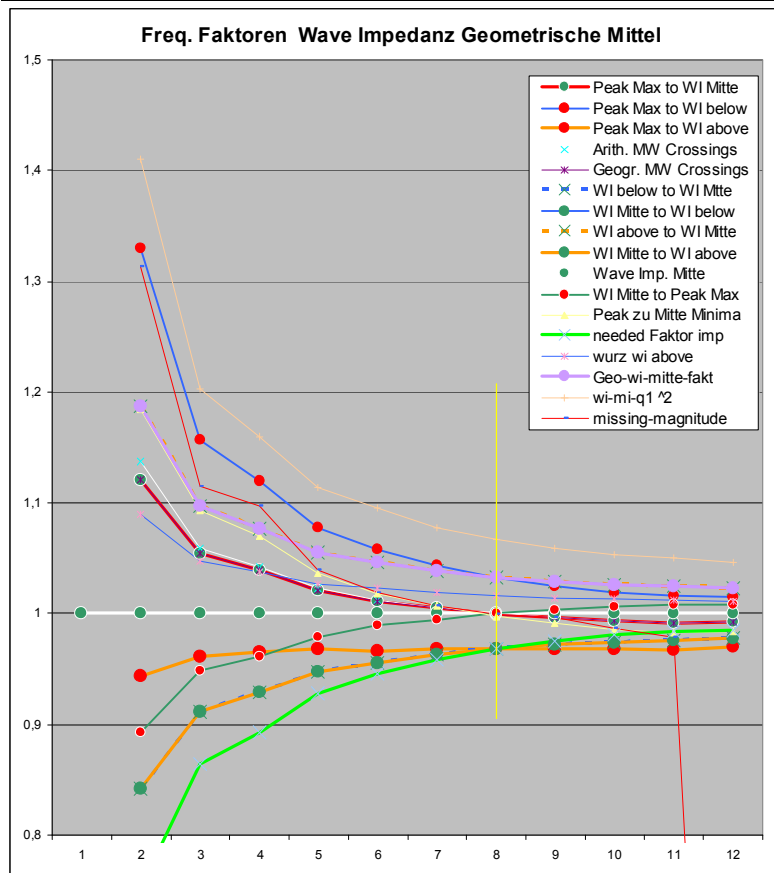




EFP = fiktive Grundton Frequenzen in Hz, hier die arithmetischen Mittelwerte dargestellt.

**Frequenzfaktoren sind reziprok Faktoren für die Wellenlänge:**





### Bestimmung Position für Magnitudenkurven am Beispiel ART V0, Plane Wave:

Beispiel NT 4, ART-Simulation, V0, 22 Grad C:

$\frac{1}{4}$ WL = Speed of Sound m/Sek	/Frequenz in Hz	in cm	= $\frac{1}{4}$ WL
344,48	/GM fc bp	422,73	$\frac{1}{4}$ = 20,37cm
344,48	/MW fc bp	425,44	$\frac{1}{4}$ = 20,25cm
344,48	/GM Minima	437,93	$\frac{1}{4}$ = 19,75cm
344,48	/MW Minima	442,0	$\frac{1}{4}$ = 19,50cm
344,48	/ GM fc	455,22	$\frac{1}{4}$ = 18,92cm
344,48	/ MW fc	458,0	$\frac{1}{4}$ = 18,80cm
344,48	/ Peak	473,4	$\frac{1}{4}$ = 18,19cm
344,48	/ GM fc ap	490,25	$\frac{1}{4}$ = 17,56cm
344,48	/ MW fc ap	490,55	$\frac{1}{4}$ = 17,56cm

Var. A für höhere Frequenzen NT5-NT12 bzw. ab 500 Hz Peak Frequ.:

(Peak/ GM fc)<sup>2</sup>

GM fc aus GM fc bp und GM fc ap = 455,2 Hz

Frequenzfaktor Peakfrequenz zu GM fc <sup>2</sup> =  $\frac{473,4}{455,2} = 1,03^2 = 1,081$

(entspricht resultierendem Faktor Peakfrequenz zur Geomitte der Impedanz Minima)

Var. B für tiefe Frequenzen NT2-4 bzw. bis 500 Hz Peak Frequ.:

arithm. Mittelwert Frequenz der Minima bevor und nach Peak = 442 Hz

Frequenzfaktor Peakfrequenz zu arithm. Mittelwert Minima =  $\frac{473,4}{442} = 1,069$  Faktor

1. Pos XM-IN1: Peak:NT#4-1 =  $3 \cdot \frac{1}{4}$ WL Peak 18,19 (wäre = 54,57 cm)\*

\* wäre die XM-IN1 Position eines closed-open Zyl. ohne MPC + Bell equiv. Längenänderungen

Anzahl  $\frac{1}{4}$  WL = NT#-1 3 \*  $\frac{1}{4}$  WL Mitte fc  
 (Var A = GM fc; hier aber Var. B = MW fc): 3 \* 18,8 cm = 56,4 cm

2. mit Frequenzfaktor multipliziert, (hier Var B): = 56,4cm \* 1,069 = 60,29 cm

3. Genereller Grundversatz anhand Schnittpunkt hier NT8 Peak, und ermittelter XM-IN1 Position anhand Messung/Simulation = akustische Mehrlänge Mundstück:

Der Grundversatz Referenzfrequenz ergibt sich unterschiedlich, je nach Freq. Fakt. / Variante!  
 Wie der generelle Grundversatz ermittelt wird zeigen die nachfolgenden Grafiken.

**Wichtig erst jetzt abziehen wegen Multiplikation Freq. Fakt!** **-2,40 cm**  
 mit WL GM fc nun = 57,89 cm

4. Unter NT5 sind Frequenz Faktoren trotz Var B sichtbar zu hoch, darüber ist der Versatz klein.  
 Die in Summe notwendigen Frequenzen liegen oberhalb vom MW Minima.

*Diese Korrektur wirkt Richtung Mundstück und wurde vorerst empirisch gefunden.*

Zusatzkorrektur  $-\frac{1}{4}$  WL Differenz (Erst am Ende)

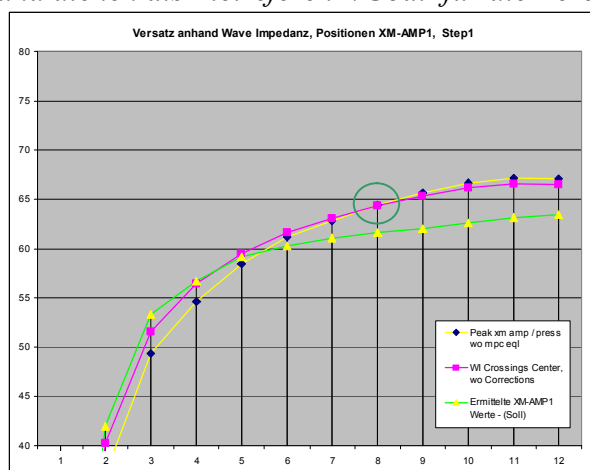
Diese wird nur 1x abgezogen, nicht mit Anzahl  $\frac{1}{4}$  WL multipliziert;  
 daher ist diese Korrektur für tiefe Modes stärker, für hohe Modes aber sehr gering.

Var. A:  $-\frac{1}{4}$  WL Differenz Geo Mitte WI zu Peak Maxima.

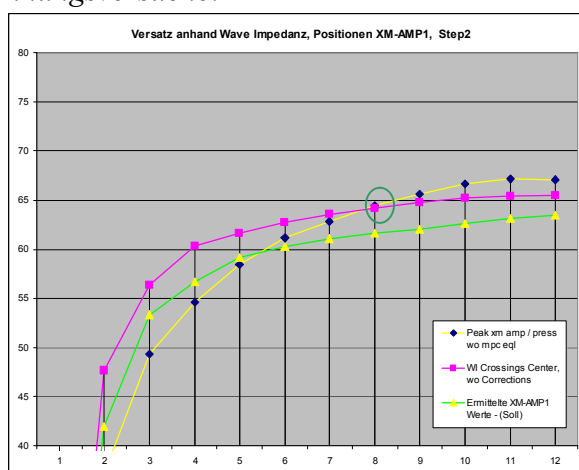
Var. B:  $-\frac{1}{4}$  WL Differenz arithm. MW WI Mitte zu Peak Maxima

Var. B:  $= 18,8 - 18,19 = 0,61\text{cm Differenz } \frac{1}{4} \text{ WL}$  **- 0,61 cm**  
 XM-IN1 geraten = **= 57,28 cm**

Bei der ART Simulation wurden die Soll Positionen bei Plane Wave Approx. gefunden (grün) und dienen als Zielreferenz /Goal für die Berechnungsversuche:



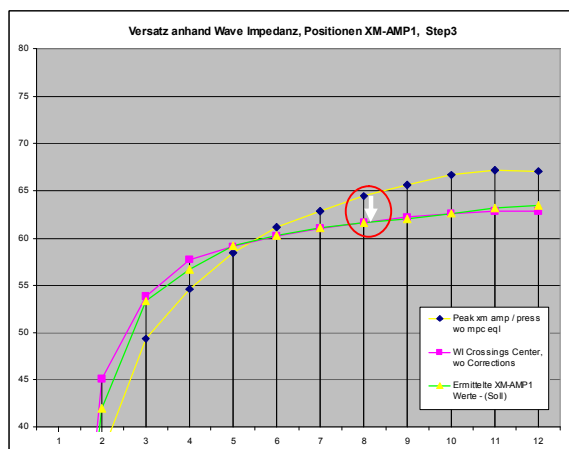
1. Die **unkorrigierten** Positionen XM-IN1 in cm  
 Grün: ART ermittelte XM-IN1 Pos. (Goal)  
 gelb: WL Peak Maxima, **rosa**: WL GM fc



2. Frequenz Faktor auf WI-Mitte anwenden  
 Grün: ART ermittelte XM-IN1 Pos. (Goal)  
**Rosa**: GM fc \* Freq.-Faktor, **hier Var. B**.

Am Schnittpunkt dieser Kurven, hier 64,3cm ist der Versatz gegen Null. Es genügt **eine einzige ermittelte** phys. Referenz-Position die diesen „Grundversatz“ vorgibt (hier NT8), welchen alle Naturtöne haben. Diese Position kann z.B. mit vergleichenden FFT und IR Messungen herausgefunden werden. NT8 hat hier einen Druckknoten. NT7 einen Druckbauch mit **weniger Abweichungen!** Vergleichende IR Messungen mit Hülse geben hier A: die kleinste positiv/negativ Abweichung und B: die kleinste Betragsdifferenz des folgenden negativen Echos zum positiven Ausschlag. Die ermittelte XM-IN1 Soll-Position von Mode 8 ist in der Plane Wave Sim. 61,9cm.

3. Der **Grundversatz** liegt in diesem Fall daher bei **-2,4cm**. (ART Simulation, 23,5°, V0)  
Um diesen Betrag wird die ganze WI-Imp.-Mittenkurve (rosa) nun Richtung Mundstück abgesenkt.

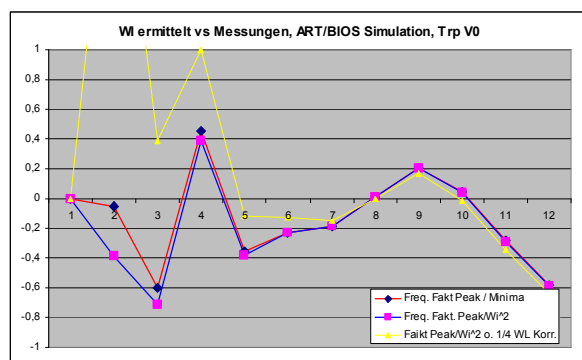


3.

Rosa = GM fc Werte,  
nun um den Grundversatz abgesenkt,

Grün=Goal XM-IN1 aus Daten der Simulation.

spez. unter NT5 sind die  
Frequ.-Faktoren trotz Var. B sichtbar zu groß,  
(hier arithm. Mittelwerte)



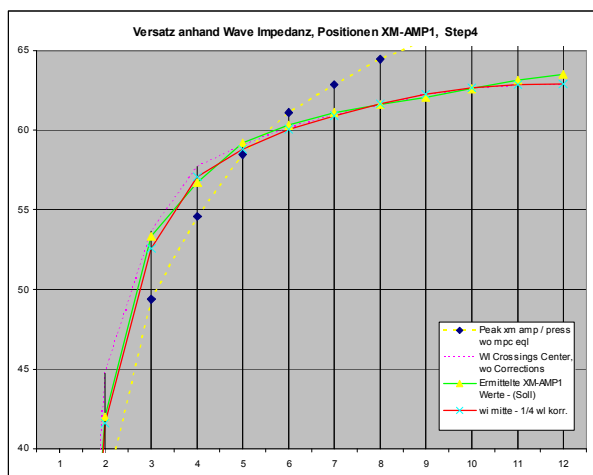
4. Gelb: ohne zusätzliche Korrektur 1/4 WL Diff. cm

blau / rot: Var. A bzw. B mit zusätzlich 1/4 WL  
Diff. WI Mitte zu Peak Frequ. abgezogen in cm,  
0 = XM-IN1 Soll/Goal

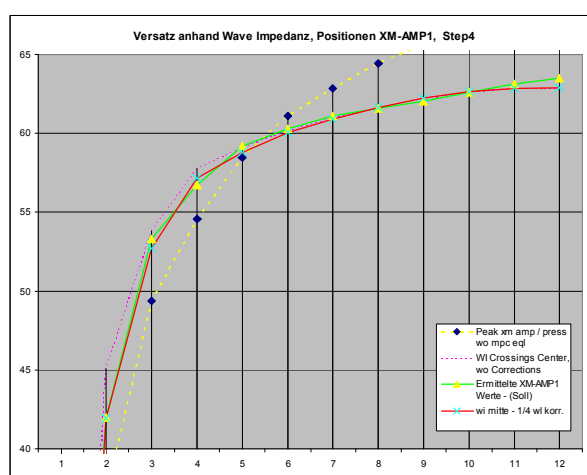
Variente B liegt im tiefen Bereich etwas näher  
(=arithm. Mittelwerte Minima, diese sind höher)

Ungerade NT haben hier einen Druckbauch,  
Gerade NT einen Druckknoten.

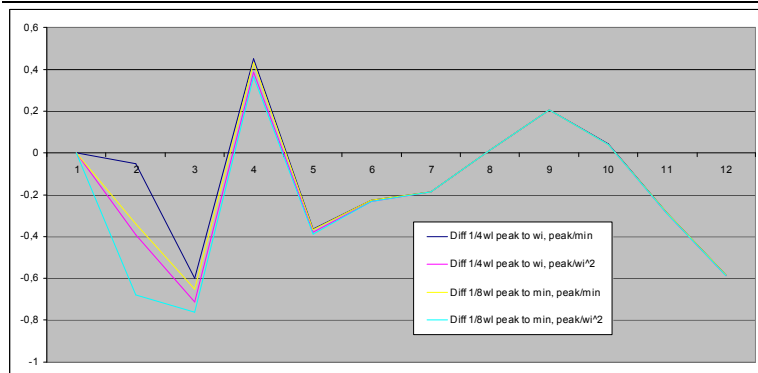
4. beide Varianten: zusätzlich Diff. -1/4 WL fc-Mitte zu Peak Frequenz berücksichtigt:



Var. A (Freq. Peak / **GM** fc) ^2

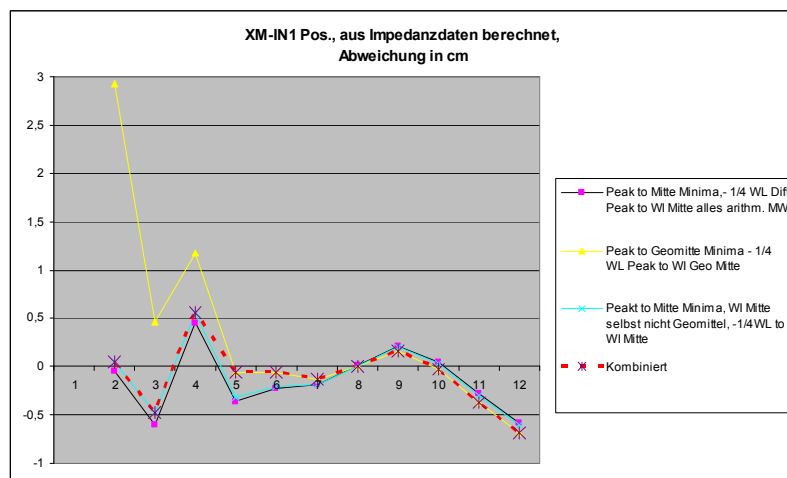


Var. B (Freq. Peak / Minima-Mitte arithm.)^1



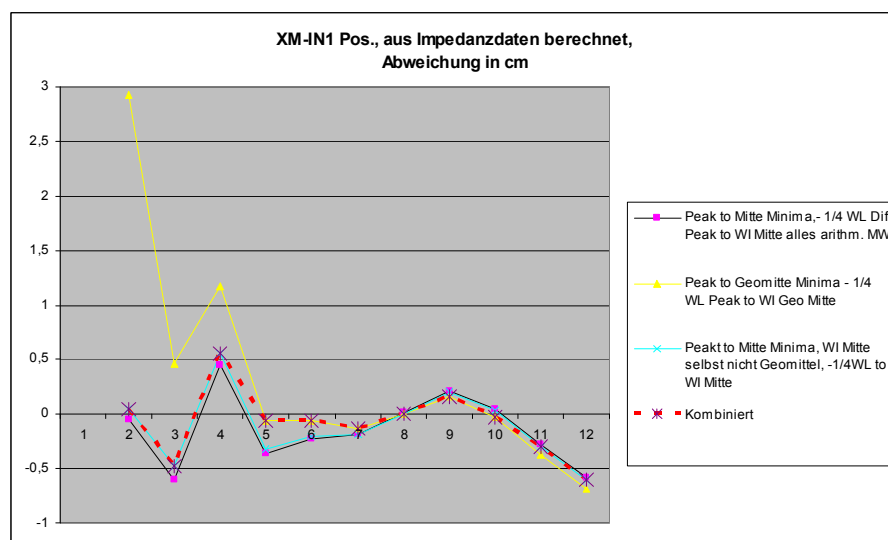
Vergleich Differenz zu Sollposition in cm.  $1/4WL + MW = \text{Blau Var. B.}; \text{Rosa GMfc} = \text{Var. A}$

Versuche mit Korrekturen  $1/8 WL$  Diff Peak zu Minima drücken NT 2+3 etwas zu weit nach unten. Versuche mit anderen Faktoren der Impedanzkurve liefern vorerst nur schlechtere Treffer, es scheint die Diff.  $1/4WL$  zu WI Mitte der beste Ansatz zu sein, welche die Abweichungen im unteren Frequenzbereich kompensieren kann. (Diagramm = arithmetische Mittelwerte)



Gelb = Variante A: hier  $1/4 WL$  Diff. zu Mitte WI (Geo Mittel).

$1/4 WL$  Diff. zu MW **Minima** würde unten besser passen als hier die Diff. zu GM fc, aber nicht annähernd gute Werte wie Var. B; die besten Treffer für NT5-NT 8 wären dann weiter entfernt; NT2-NT4 und (ev) NT11-NT12 werden daher durch Variante B: (hellblau) **wie folgt ersetzt**: ->



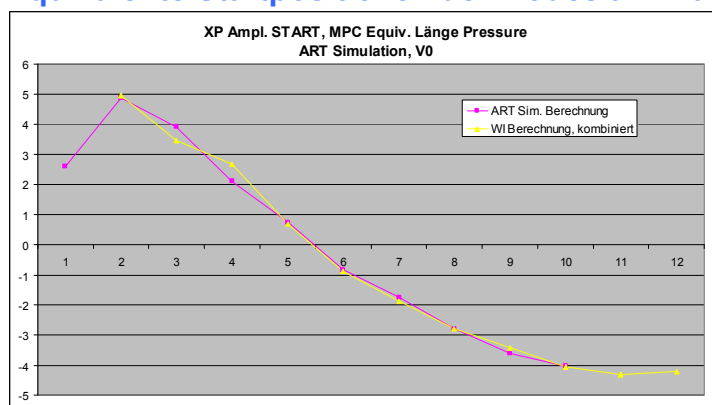
**Strichliert: Final kombinierte Varianten A+B für geratene Magnitudennode-Positionen:**

Var. A gelb: **mäßiger/kaum** Versatz zu Mpc Popp. Frequ. = NT5-NT10.

Var. B blau: **sehr starker** Versatz zu Mpc Popp. Frequ. = NT4 (<500 Hz) und NT11-NT12,

**Magnituden Node Start Positionen = XM-IN1 - ((NT #-1) \* 1/4WL) =**

**Äquivalente Startpositionen der Modes am Mundstückende; (Minima Freq.-Domäne)**

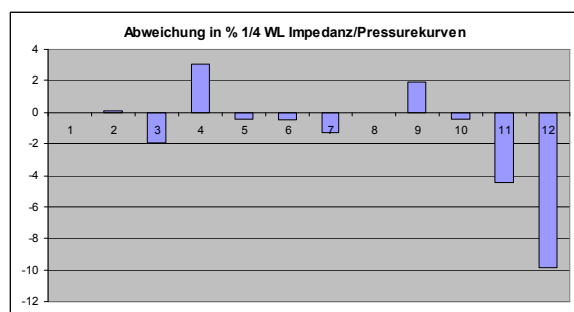


Gelb: Aus Impedanzkurve bzw. GM fc Wellenlängen und Korrekturen ermittelte Startpositionen.

Rosa: ermittelte Equ. Länge aus der ART Simulation (hier aber bereits Spline für mehrere Ventile)

Auffallend sind die größten Abweichungen bei NT3+NT4, (diese allerdings auch im Tuning)

**Mit Ausnahme des vorab gemessenen Referenzpunktes (hier V0 NT8), sind alle weiteren Positionen aus der Impedanzkurve & Wave Impedanz nun prognostiziert!**



Die max. Abweichung zu den ART Simulationsdaten bei Magnituden XM-IN1:

Beträgt -10% bei NT12, **nur +3% bei NT4** der ¼ Wellenlängen, bzw. max. +/-0,8mm

**GM fc bp = unterhalb der Peak Maxima liefern den Pitchversatz**

*Schritte 1-4 sind ident mit denen bei Magnituden,  
jedoch mit den Formeln für Frequenzfaktoren der WI-Crossings-below-Peak Maxima*

Beispiel NT 4, ART-Simulation V0, 22 Grad C:				(in cm)	(=1/4 WL)
¼ WL =	Speed of Sound m/Sek	/ Frequenz Hz	*100	/4	
	344,48	/ GM fc bp	<b>422,73</b>	*100	/4 = <b>20,37cm</b>
	344,48	/ MW fc bp	<b>425,44</b>	*100	/4 = <b>20,25cm</b>
	344,48	/ <b>GM fc</b>	<b>455,22</b>	*100	/4 = <b>18,92cm</b>
	344,48	/ <b>MW fc</b>	<b>458,0</b>	*100	/4 = <b>18,80cm</b>
	344,48	/ <b>Peak</b>	<b>473,4</b>	*100	/4 = <b>18,19cm</b>
	344,48	/ GM fc ap	490,25	*100	/4 = 17,56cm
	344,48	/ MW fc ap	490,55	*100	/4 = 17,56cm



**Var. A für höhere Frequenzen NT5-NT12 bzw. ab 500 Hz Peak Frequ.:**

$$\begin{aligned}
 & \text{(Peak / GM fc)} \quad ^4 \quad / \quad \text{(Peak / GM fc bp)} \\
 & [(473,4 \text{ Hz} / 455,22) \quad ^4] \quad / \quad (473,4 / 422,73) \\
 & = 1,169 \quad / \quad = 1,1198 \quad = 1,044
 \end{aligned}$$

(Peak/ arithm. Mitte von Geo-Crossings würde NT2-NT3 stark herunterdrücken)

**Var. B für tiefe Frequenzen NT2-4 bzw. bis ~ 500 Hz Peak Frequ.:**

$$\text{Peak / MW fc bp} = 473,4 / 425,44 = 1,11$$

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Pos XM-PN -1/8 WL: } & \text{WL Peak} = (3 * 18,19 \text{ wäre} = 54,57 \text{ cm}) \\
 \text{NT\#4-1=3} & \text{WL MW fc bp} \quad 3 * 20,25 = 60,75 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$2. \text{ mit Frequenzfaktor multipliziert (hier Var. B)= } 60,75 \text{ cm} * 1,11 = 67,43 \text{ cm}$$

3. Grundversatz anhand Schnittpunkt NT8 **Peak**, und  
ermittelter Position anhand Pressure Messungen:

Wie der generelle Grundversatz ermittelt wird zeigen die nachfolgenden Grafiken.

**Wichtig erst jetzt abziehen wegen Multiplikation Freq. Fakt!** -7 cm  
(Var. B hat einen hohen Grundversatz!) mit WL WI Crossing below = 60,43 cm

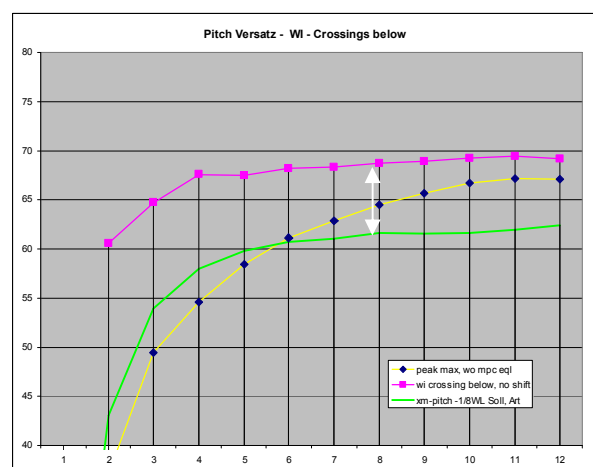
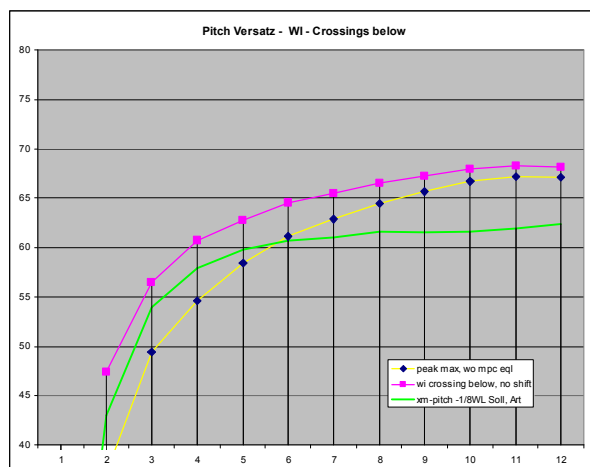
4. Unter NT5 sind die Frequenz Faktoren sichtbar zu hoch, darüber wird der Versatz zwar kleiner, im Gegensatz zu Magnituden hat die Korrektur hier aber Auswirkungen bis NT12, wirkt Richtung Mundstück! (Erst am Ende abziehen)

Var. A: Zusatzkorrektur -1/4 WL Differenz **GM fc bp zu Peak**

Var. B: Zusatzkorrektur -1/4 WL Differenz **MW fc bp zu Peak**

$$\begin{aligned}
 \text{Var. B} &= 20,25 - 18,19 = 2,06 \text{ cm Differenz } 1/4 \text{ WL} \quad - 2,06 \text{ cm} = 58,37 \text{ cm} \\
 &\text{ergibt Position max. Pitch Pot near XM-IN1}
 \end{aligned}$$

$$5. \text{ für XM PitchNode Pos: } + 1/8 \text{ WL Peak} = 18,19 \text{ cm} / 2 = + 9,1 \text{ cm} = 67,47 \text{ cm}$$

**Beispiel Pitchkurven anhand Frequenz crossing below Peak, (Variante B für NT 2-NT4):**

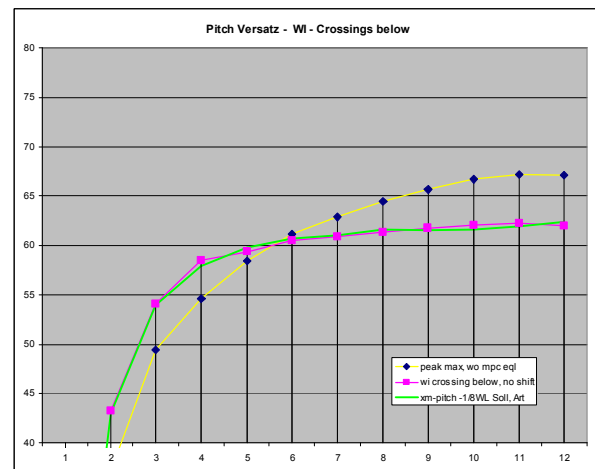
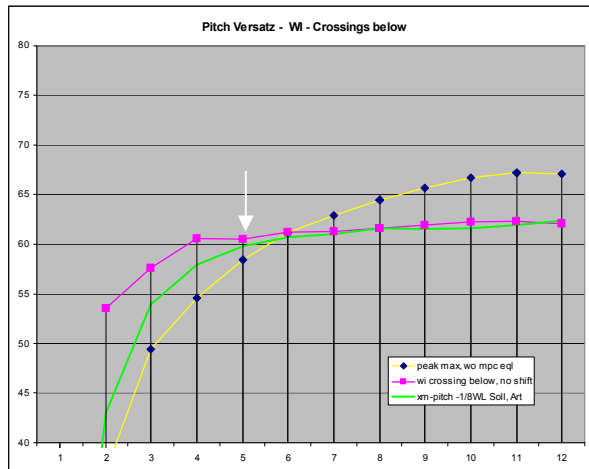
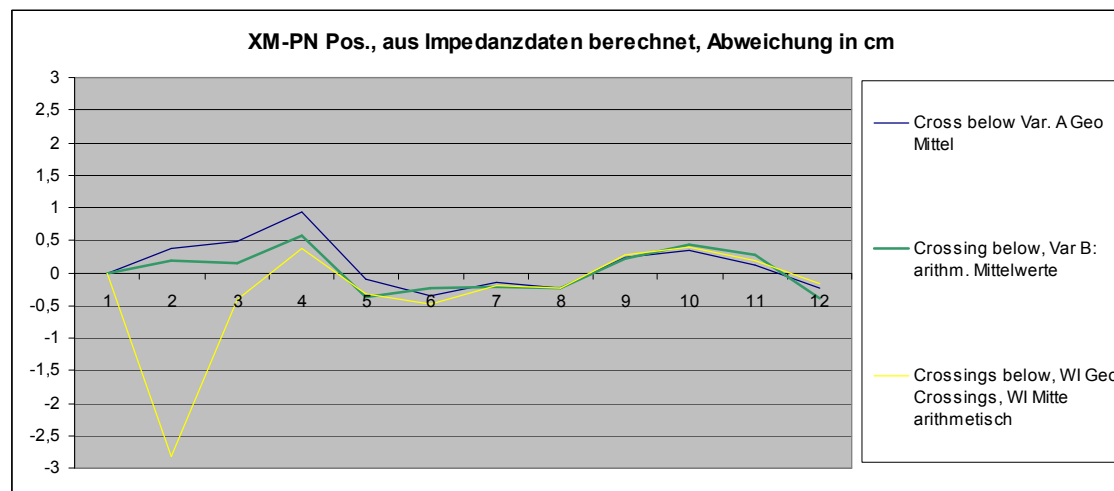
1. Freq. crossing below peak fc bp (Var.B)

rosa = unkorrigiert

2. Freq. Crossing below Peak \* Freq. Fakt

(hier Var. B rosa), Peak/ MW fc bp

Versatz Referenzmode ermitteln Mode 8, -&gt;7cm

3. rosa: Grundversatz ist abgezogen, (hier ~ 7cm)  
Var. B hat hier einen hohen Grundversatz!4. rosa:  $-\frac{1}{4}$  WL Differenz abgezogen,  
MW fc bp zu Peak (hier Var. B)

Freq. Crossings below Peak

Werte aus geometrischen Mitteln sind hier ab NT7 bei der Plane Wave Sim. etwas näher am Ziel.

Aber: das ergibt dann nur ~ 1-2mm Positions-Differenzen bei XM-PN!

**Die fc ap = Freq. Crossings oberhalb der Peaks ergeben auch Pitchversatz,  
sind aber erst ab ~ 500 Hz verwertbar, treffen aber oberhalb 1. Mpc Freq. besser**

Schritte 1-4 sind ident mit denen bei Magnituden,

jedoch mit den Formeln für Frequenzfaktoren der Freq. Crossings-above Peak fc ap

Beispiel NT 4, ART Simulation V0, 22 Grad C,

(in cm)

(= $\frac{1}{4}$ WL)

$\frac{1}{4}$ WL =	Speed of Sound m/Sek	/	Frequenz	*100	/4	
	344,48	/	GM fc bp	422,73 *100	/4	= 20,37cm
	344,48	/	MW fc bp	425,44 *100	/4	= 20,25cm
	344,48	/	GM fc	455,22 *100	/4	= 18,92cm
	344,48	/	MW fc	458,0 *100	/4	= 18,80cm
	344,48	/	Peak	473,4 *100	/4	= 18,19cm
	344,48	/	GM fc ap	490,25 *100	/4	= 17,57cm
	344,48	/	MW fc ap	490,55 *100	/4	= 17,56cm

Hier habe ich nur eine verwertbare Variante gefunden,  
Grund ist der erstaunlich konstant minimale Abstand der Minima above Peaks ab NT5:

$$(\text{Peak} / \text{GM fc})^4 = (473,4/455,22) = \text{Frequenzfaktor } 1,169$$

$$\begin{array}{llll} \text{1. Pos XM-PN -1/8 WL:} & \text{NT\#4-1 =WL Peak} & = 3* & 18,19 & = 54,57 \text{ cm} \\ & \text{WL GM fc ap} & = 3* & 17,57 & = 52,66 \text{ cm} \end{array}$$

$$2. \text{ mit Frequenzfaktor multipliziert} \quad = 52,66 \text{ cm} * 1,169 = 61,61 \text{ cm}$$

3. Grundversatz anhand Schnittpunkt NT8 **Peak**, und  
ermittelter Position anhand Pressure Messungen:

$$\begin{array}{ll} \text{Wichtig erst jetzt abziehen wegen Multiplikation Freq. Fakt!} & -0,71 \text{ cm} \\ \text{mit WL GM fc ap nun} & = 60,9 \text{ cm} \end{array}$$

4. Unter **NT6** sind die Frequenz Faktoren wesentlich zu hoch, darüber ist der Versatz kleiner,  
die Korrektur hat aber hier Auswirkungen bis NT12, wirkt Richtung Mundstück!

Zusatzkorrektur -¼ WL Differenz **GM fc ap zu Peak**  
(Erst am Ende aber hier dazuzählen, nicht abziehen!)

$$= 18,19 - 17,57 = 0,62 \text{ cm Differenz } \frac{1}{4} \text{ WL} \quad - 0,62 \text{ cm} \quad = 60,28 \text{ cm}$$

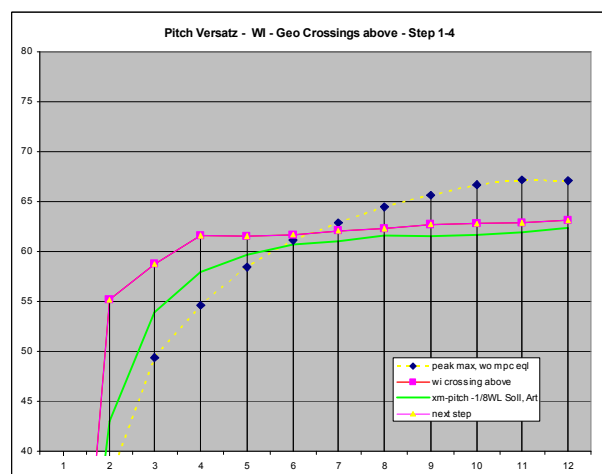
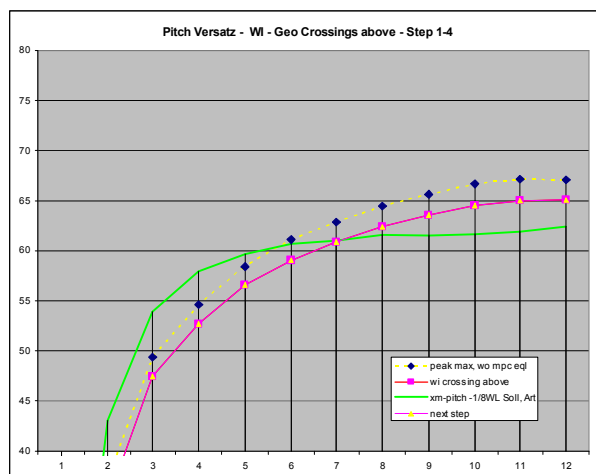
$$5. \text{ für XM PitchNode Pos: } + 1/8 \text{ WL Peak} = \quad = 60,28 \text{ cm} + 9,1 \text{ cm} = 69,38 \text{ cm}$$

**GM fc ap sind erst ab NT 6 brauchbar und liefern bei der Plane Wave Simulation  
Ergebnisse oberhalb der Peakfrequenz, die näher am Ziel liegen.**

**NT4 in diesem Beispiel ist also nicht verwertbar!**

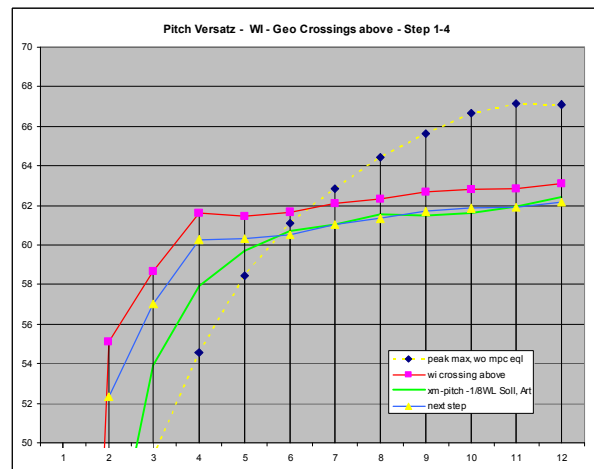
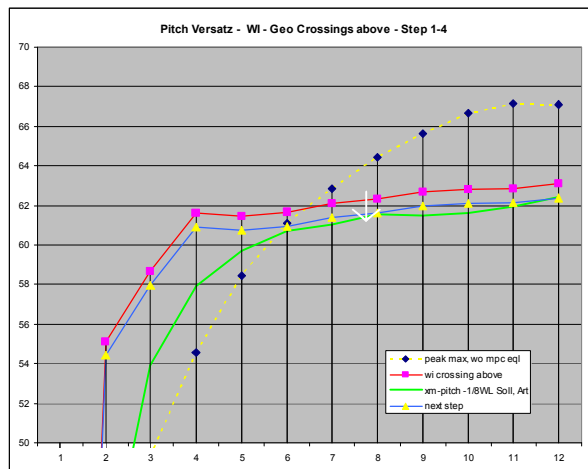
*Je nach gewähltem Punkt als „Mitte“ für die ¼ WL Differenz Korrektur erhält man etwas unterschiedliche Werte. Arithmetische Mittel schneiden in jedem Fall ab NT5 aufwärts schlechter ab. Die Mitte „Peak“ liefert oberhalb der MPC Popp. Freq. die größten Unterschiede / Faktoren, hier liegen die besten Ergebnisse, welche mit GM fc ap ermittelt wurden.*

### Beispiel WI Crossings above, Geo Mittel:



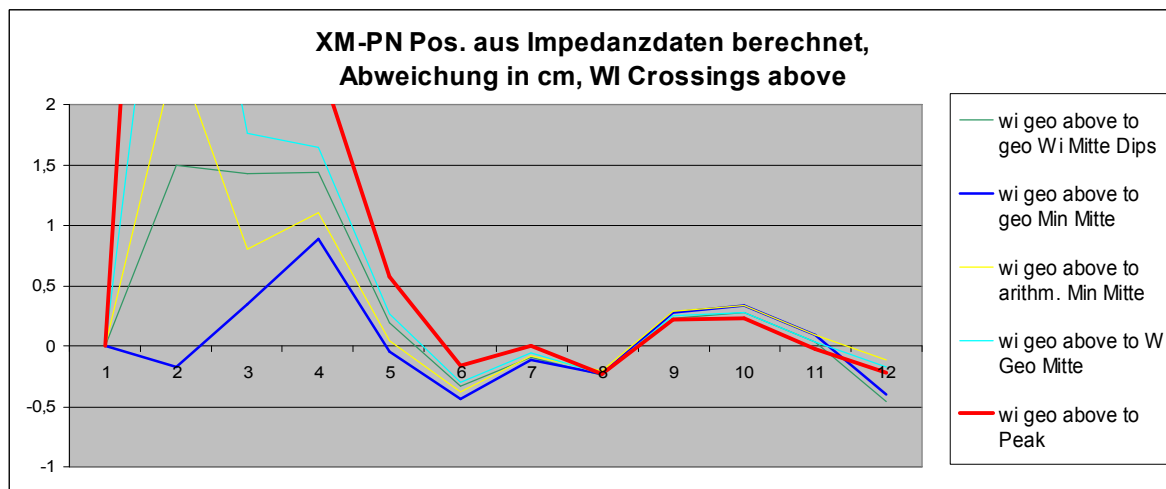
1. WL GM fc ap  
rosa: unkorrigiert

2. GM fc ap \* Frequ. Fakt  
rosa: korrigiert

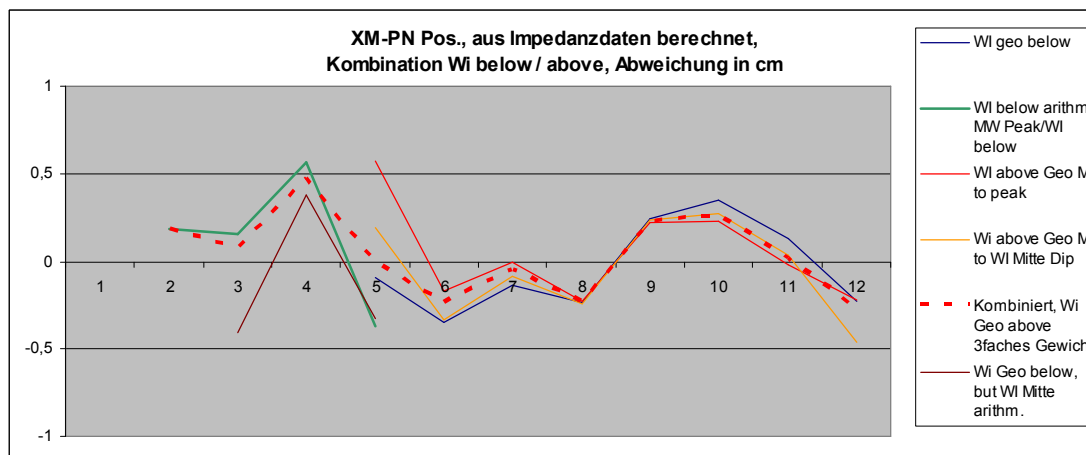


3. blau = Grundversatz abgezogen, hier 0,7cm

4. Korrektur –  $\frac{1}{4}$  WL Differenz zwischen GM fc ap und Peak

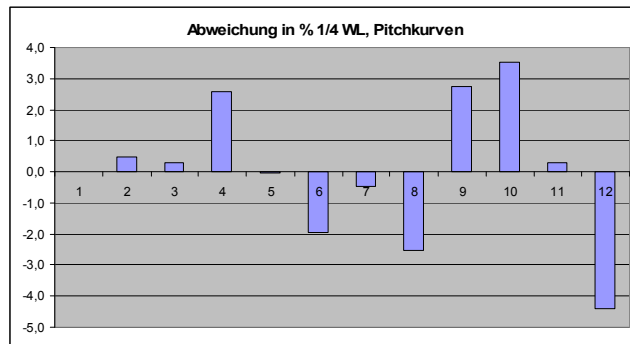


WI Crossings above, verschiedene Varianten -1/4WL Diff. Korrektur der Referenzpunkte



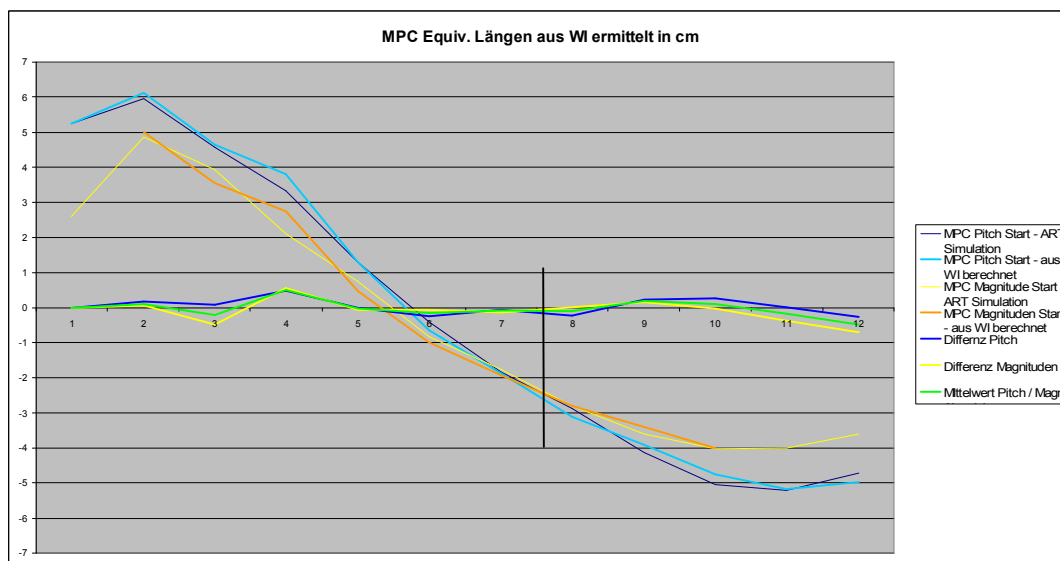
Strichliert: Final kombiniert MW fc und GM fc bp und GM fc ap; GM fc ap to peak hat ab NT6 2faches Gewicht, die restlichen Punkte sollen extreme Ausreisser verhindern.

Die kombinierten Abweichungen sind +0,6mm bei NT4, ansonsten maximal +/- 0,3 mm. NT2 stützt sich alleinig auf die Bewertung Peak / MW fc bp als arithmetischer Mittelwert.



Auffallend sind die Abweichungen vor allem bei NT8 bis NT10, allerdings sind das ebenfalls „nur“ 3,5% Abweichung der jeweiligen 1/4 WL!

**Pitch MPC Equivalent Länge Start =  $XM-PN - ((NT \# * 2) - 1) * 1/8WL$**



Werte für Versatz MPC Start Magnituden und Pitch in cm equivalenter Länge.

### Ergebnis und Zusammenfassung – mit Daten aus der Plane Wave Simulation:

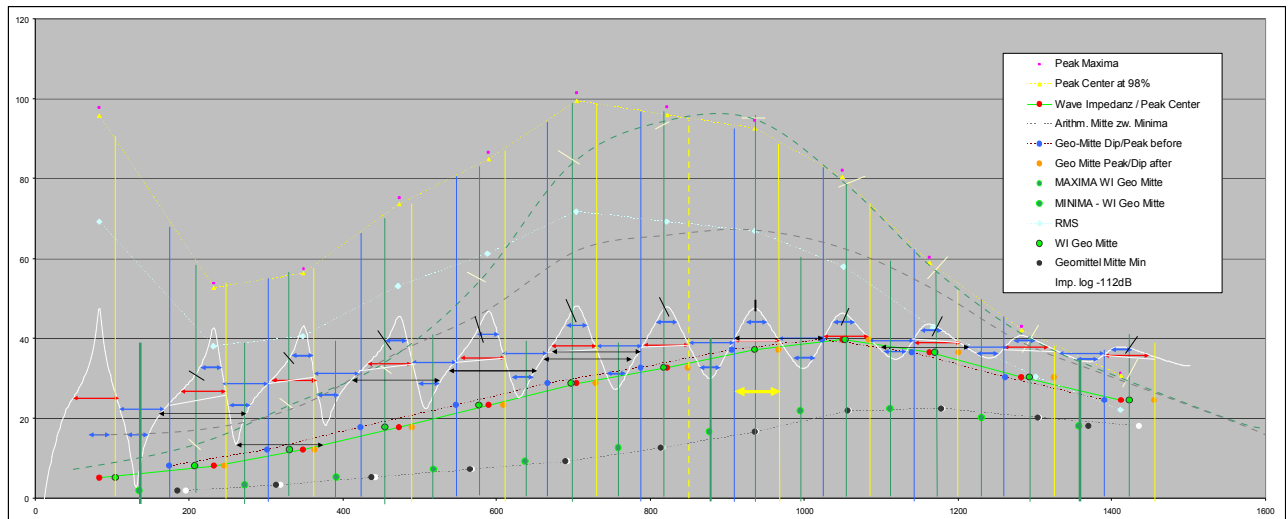
Eine Mitte – ein Zentrum der Frequenz Crossings definiert den vorhandenen Versatz von Pressure/Magnituden anhand Frequenz/Wellenlänge Differenz, vor allem aus der Mitte der Minima berechnet. Minima Frequenzen und Peak Magnituden bilden eine der beiden „Frequenz Domänen.“ (Äquivalente akustische Länge von Zylindern zu physischer Länge.)

In Zusammenhang mit 1/4 WL Diff. Korrektur von Peak zu diesem Zentrum sind Geomittel der Frequenz Crossings unter und über der Peakspitze für diese Mitte die bessere Wahl.

Die geometrische Mitte (aus Geo-Crossings) liefert in Summe geringfügig weniger Abweichungen als der arithm. Mittelwert (aus Geo-Crossings). Bei Peaks um die MPC Popp. Frequenz herum sind die Geom.Mittel der Minima dafür als Quellen für die Faktoren etwas überlegen.

Bei tiefen Frequenzen mit starkem Versatz Peak zu Zentrum ist die arithm. Mitte der Minima zielführender.

Auf Höhe der Wave Impedanz der Magnituden sind (mit arithm. MW der Crossings) alle Peaks annähernd gleich breit. Bei Mode 2 und 4 liegt die Höhe, an der die Peaks die  $\frac{1}{2}$  dieser Breite besitzen höher als die Wave Imp. Mitte, bei allen anderen niedriger. NT3 ist auffallend „schmal“ (und die Intonation sehr tief). NT4 ist auffallend breit (Inton. sehr hoch)



Impedanzkurve ART V0 Simulation, logarithmische Darstellung, -112dB

Es gibt scheinbar einen Zusammenhang mit der Tatsache, dass bis ca. NT4 die WI Mitte noch weiter links liegt als die Positionen mit dem Beginn der  $\frac{1}{2}$  Breite der Peaks. Minima als Referenzpunkte liegen bei NT2 – 4 durch den starken Versatz zu tief. (Die tatsächlich notwendigen Frequenzen liegen höher, bei NT 2 sogar oberhalb der WI-Mitte! Eine  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge Differenz korrigiert bis NT5 aufsteigend und wird dann verschwindend klein, diese wurde empirisch gefunden.

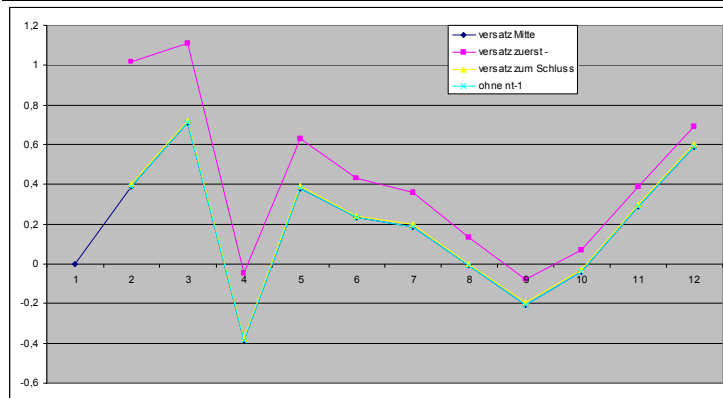
### Geom. Frequ. Crossings below / above Peak liefern den zusätzlichen Pitchversatz

Geometrische Mitten zwischen Minima before und Peak = GM fc bp liefern bis zu einer Frequenz, wo die RMS Magnitudenwerte kreuzen bessere Ergebnisse. Im unterstem Bereich liefern aber arithm. Mittelwerte bessere Ergebnisse. Arithmetische Mittel liefern unterhalb ~ V0 NT5 bessere Ergebnisse, darüber geometrische.

GM fc ap = Geometrische Frequenzmitte zwischen Peak und Minima oberhalb sind erst ab ca. V0 NT6 verwertbar, liefern aber aufgrund der höheren Faktoren ab einer Frequenz, wo RMS Amplitudenwerte schneiden nähere Treffer.

### Grundversatz und $\frac{1}{4}$ WL Differenz Korrektur





Die Reihenfolge ist wichtig:

Der Grundversatz NT7/8 darf in jedem Fall erst nach dem Frequ. Faktor abgezogen werden, die  $\frac{1}{4}$  WL Diff. Korrektur darf erst am Ende berücksichtigt werden! Ohne  $\frac{1}{4}$  WL Diff. Korrektur liegen alle Positionen zu weit in Richtung Schallbecher, speziell tiefe Modes. (Die arithm. Mitte der Minima als Referenzfrequenz liegen zu tief).

### Zielsetzung, Goal mit 1 Referenzpunkt, Treffer- / Fehlerquote:

#### Die Zielsetzung war:

Können aus der gemessenen Impedanzkurve die Positionen von Pitch-Nodes und Magnituden-Nodes abgeleitet werden?

#### Die Rolle der „gemeinsam verwendeten“ Impedanz Minima:

Alle Nachbar Resonanzen teilen sich zwangsweise ihre gemeinsame, dazwischenliegende Minima. Die stärker ausgeprägte Resonanz dominiert die Kurvenform um die Minimas herum etwas mehr als die Schwächere.

Da die Lage der Minima den selben wesentlichen Anteil an der Position der Wave Impedanz Crossings und daraus der WI Mitte haben, muß folglich eine Abweichung eines Nachbarn eine folgende entgegengesetzte Abweichung vom Ziel hervorrufen.

#### Das Goal war:

Vorab ermittelte Resultate aus der ART-Simulation mit V0 und Splines zu anderen Längen

#### Nur 1 Referenzpunkt für XM-IN1 und den Grundversatz:

Dieser Referenzpunkt ist notwendig um den Grundversatz zu definieren.

#### Treffer- / Fehlerquote:

Mit einer Fehlerquote von max. +/- 5 % einer jeweiligen  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge zwischen NT2 und NT10, und nur einem Referenzpunkt (hier NT8, etwas oberhalb der MPC Popp. Frequ.), vorerst mit Impedanzdaten aus der ART-Simulation.

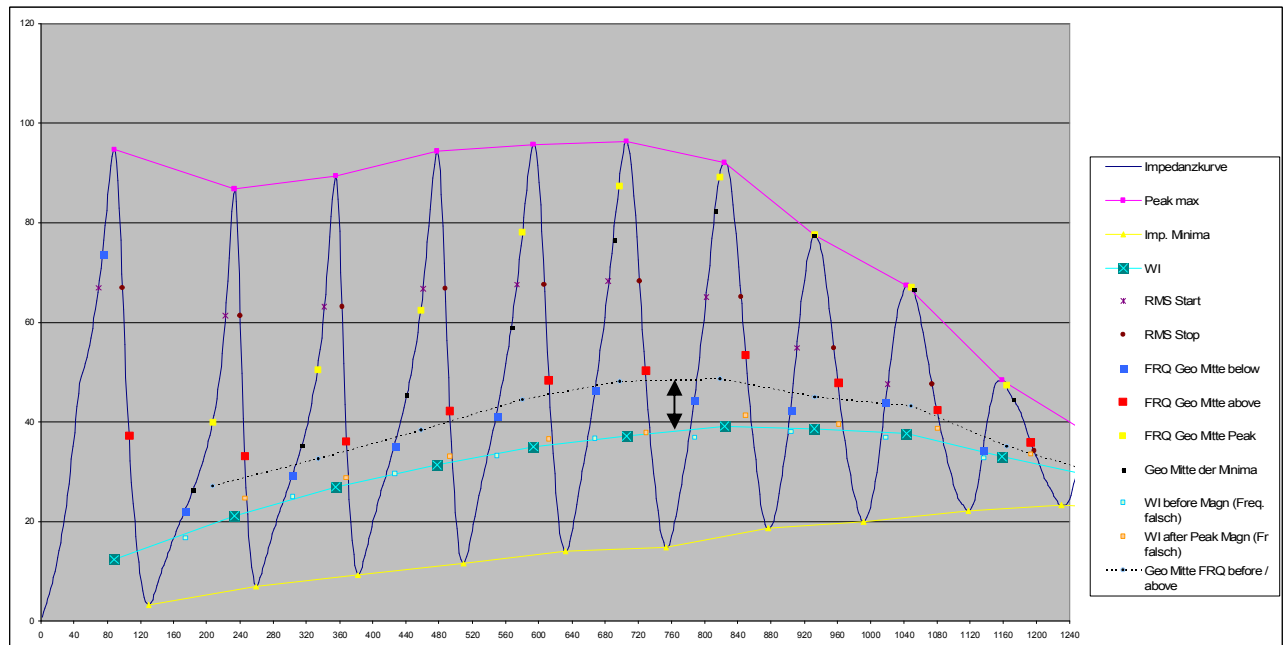
#### Unterschiede Simulation und FFT-Messungen:

Bei FFT-Messungen liegen die ermittelten Frequenz-Crossings immer oberhalb der aus Magnituden ermittelten Wave Impedanz, was ein geändertes Verhältnis der Faktoren zueinander ergibt.

Alle bisherigen Daten und Rückschlüsse sind aus Simulationen, d. h. auf jeden Fall immer überbewertet und beim Plane Wave Modell mit Berücksichtigung von **wenig Verlusten**.

Intonation aber auch ermittelte Wave Impedanz unterscheiden sich erheblich. Die Stimmung von NT3 ist bei der Simulation wesentlich zu tief, NT9 und 10 sind wesentlich höher. Die Wave Impedanzkurve ist bei der Simulation wesentlich geringer als bei der Messung. Die verwendeten kombinierten Faktoren müssen anhand Versuchen mit FFT Messungen noch an real ermittelbare Verhältnisse angepasst werden.

### Umsetzung Impedanzwerte aus FFT Messung zu MPC Equiv. Länge – Praxistest #1:



*Crossings der Flanken – Frequenz Mitten sind bei Impedanzkurven aus FFT Messungen oberhalb der Wave Impedanz Magnitudenwerte. Peak Freq.-Zentrum und Faktoren dazu (Peak zu Peak-Freq.-Mitte) sind allerdings sehr ähnlich.*

Bei den FFT Messungen werden zusätzlich zur Peak-Maxima auch eine Centerfrequenz und ein Mittelwert daraus berechnet. Diese sollen Ausreißer bei Messungen eingrenzen. Das macht eine Auswahl der Varianten notwendig. Nachfolgend habe ich versucht die Unterschiede zu ermitteln.

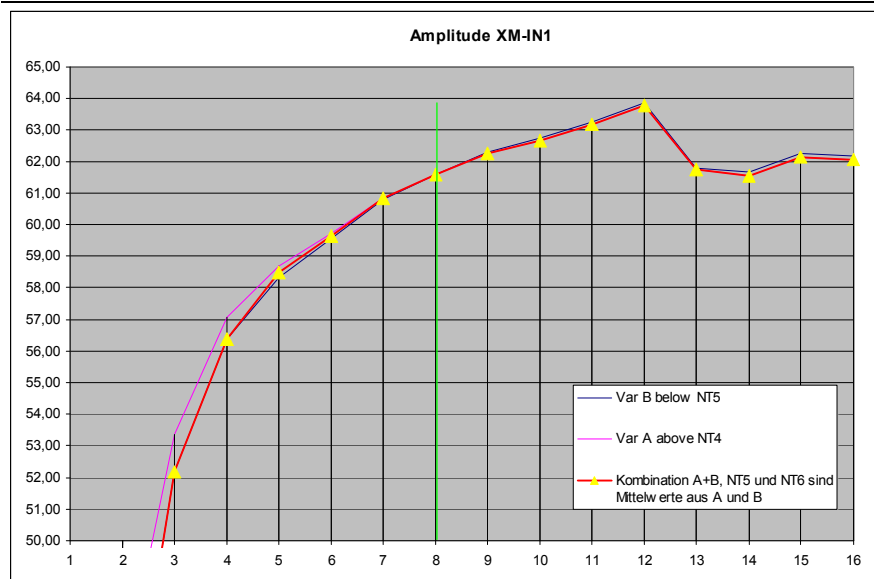
Interne Notiz: IMP – MPC Eqv. Länge Berechnung zur FFT-Messung Tests A-C:

**Positionsvorgabe XM-IN1 für NT8 für Grundversatz = 61,6cm --> dies ist zu gering!**

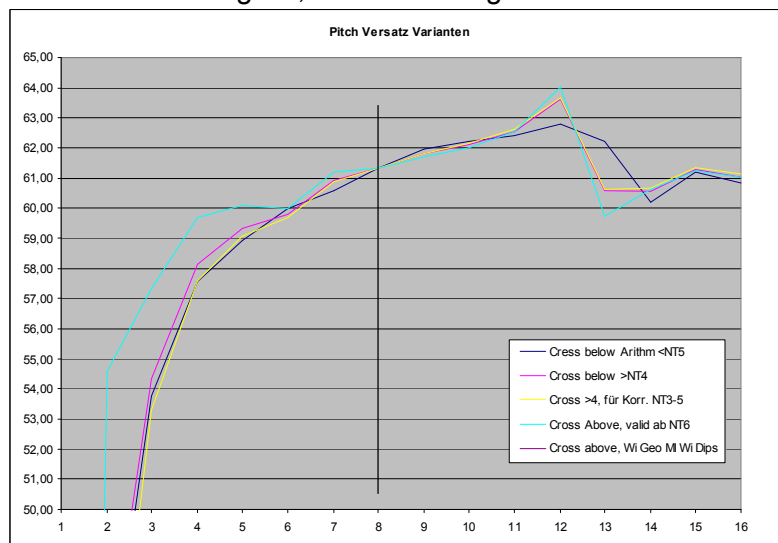
**Bolzen:** Auch Magnituden Nulldurchgänge sind stark nach unten verschoben = NT8 zu früh.

Anhand Bell IR-Reflex 136,4cm /2 – MPC Equiv. Länge = 2,0cm = 134,4cm /2 = 67,2 für XM-PN -4,6 cm 1/8 WL für NT 8 = **62,6cm** für XM-IN1 NT8.

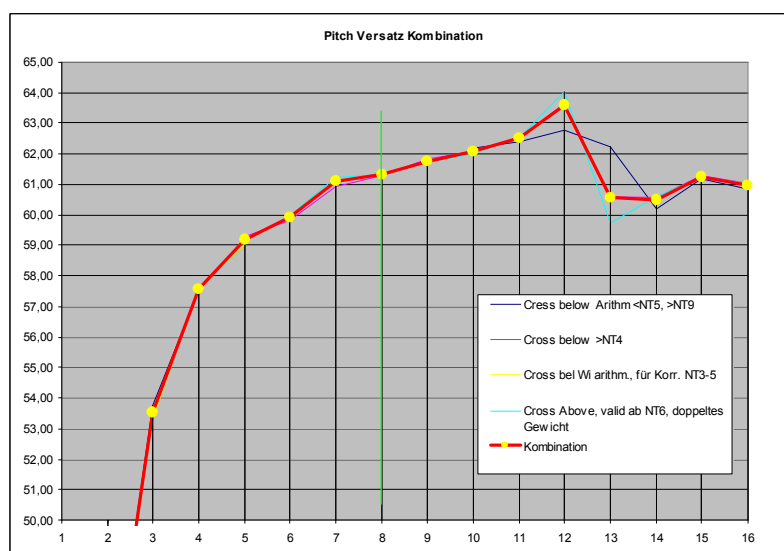
**Test A: Peak-Center Freq. at 98% als “Peak Maxima” gewählt:**



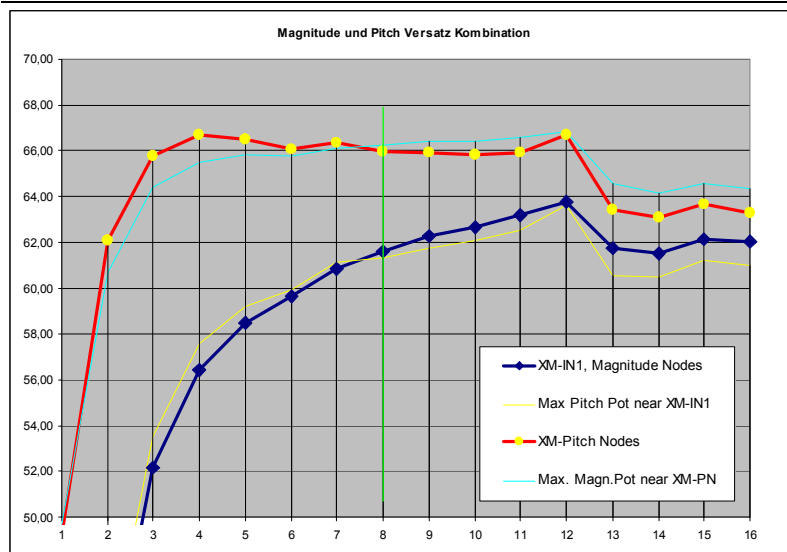
ART FFT Messung V0, XM-IN1 = Magnitude Nodes



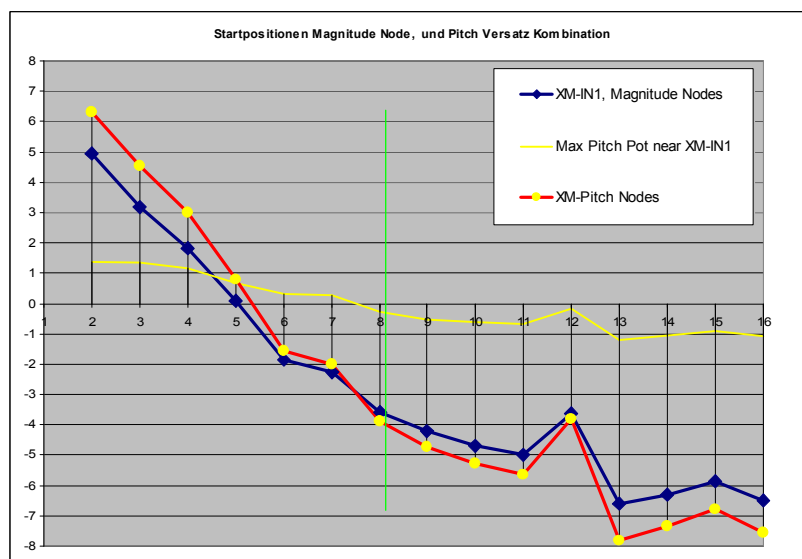
ART FFT Messung V0, Pitch – Versatz zu XM-IN1; (Max. Pitch Pot here)



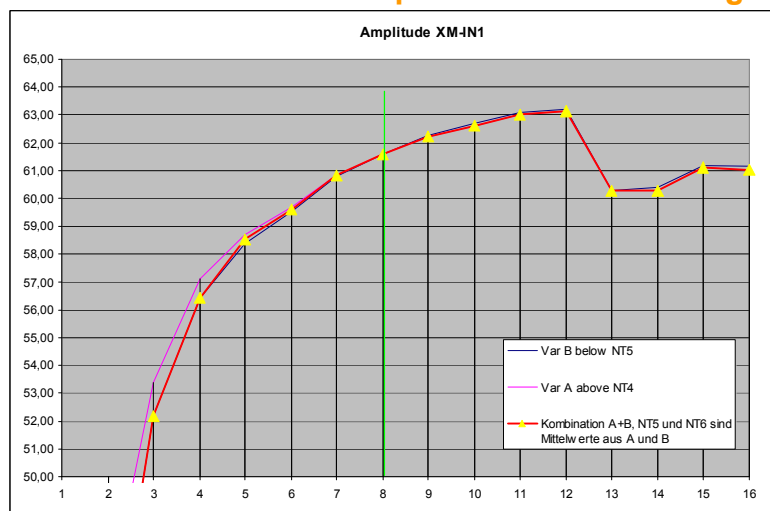
ART FFT Messung V0, Pitch – Versatz zu XM-IN1; (Max. Pitch Pot here)



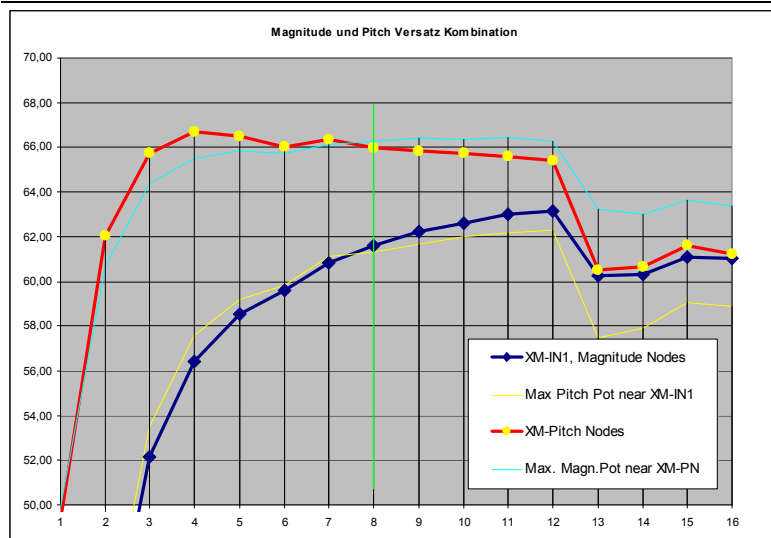
Ermittelte Positionen von XM-IN1 und XM-Pitch Nodes aus der Impedanzkurve, FFT Messung ART Trompete, V0, Messung vom 24.12.2018



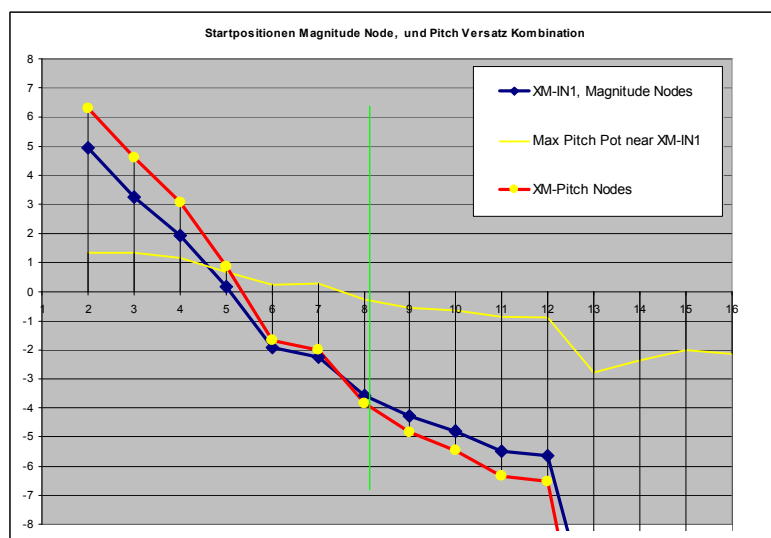
Test B: Peak-Maxima Freq. als "Peak Maxima" gewählt:



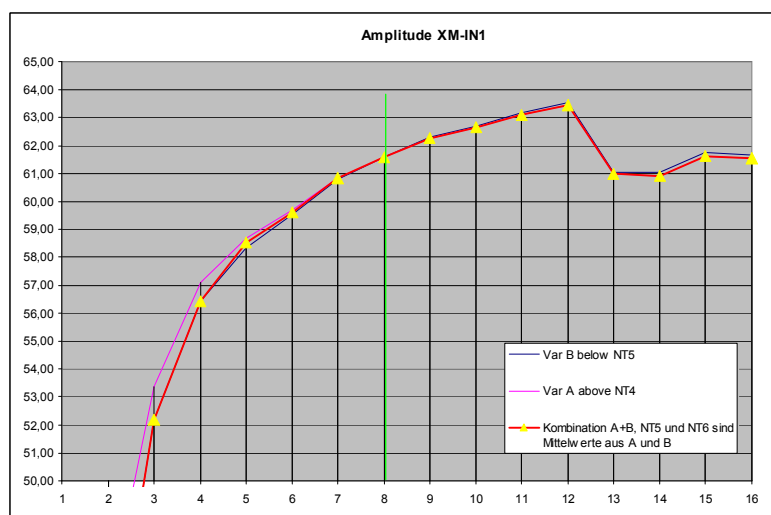
ART FFT Messung V0, XM-IN1 = Magnitude Nodes



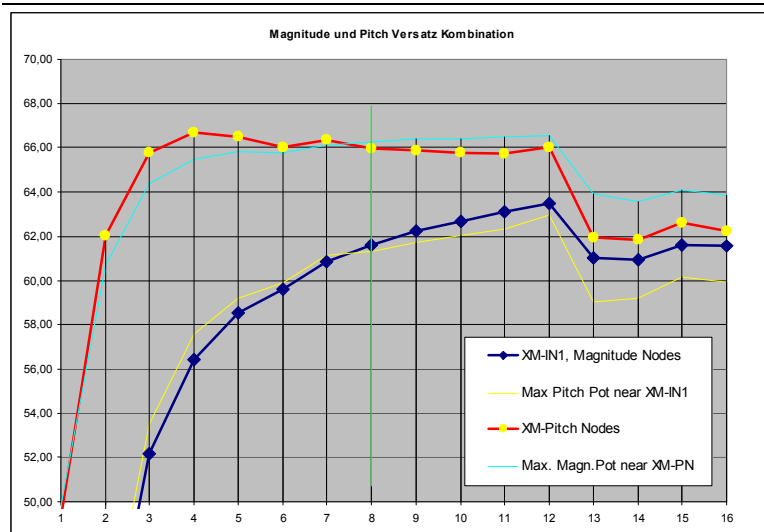
Ermittelte Positionen von XM-IN1 und XM-Pitch Nodes aus der Impedanzkurve



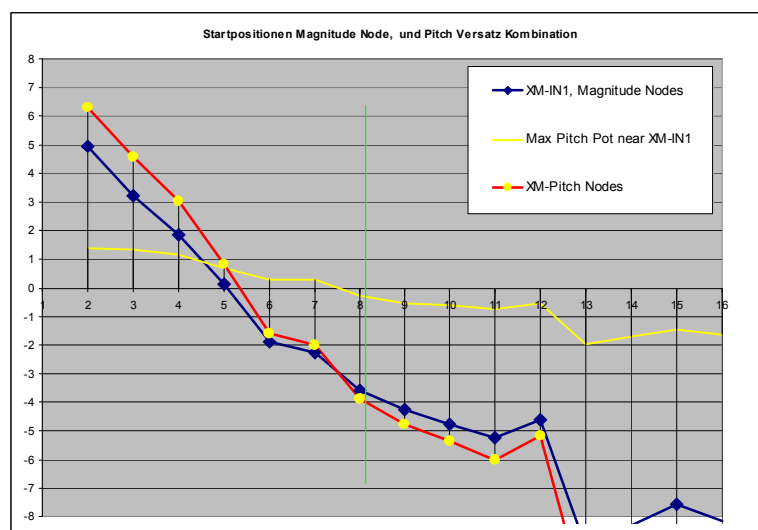
**Test C: Mittelwert Peak-Maxima Freq. u. Peak Center at x% als "Peak Maxima":**



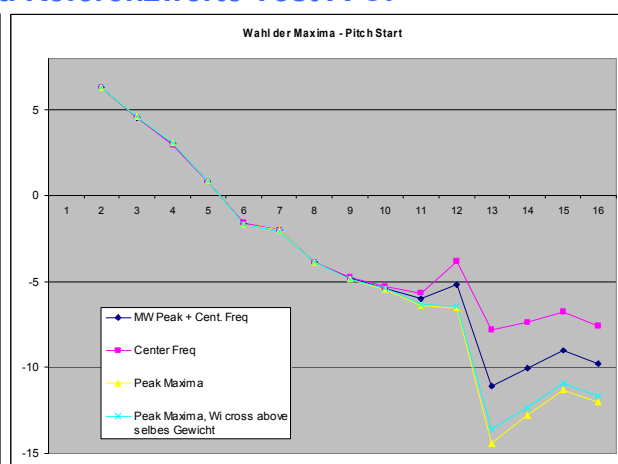
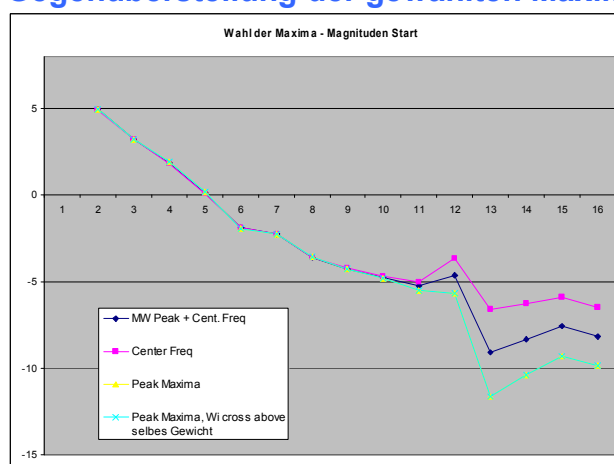
ART FFT Messung V0, XM-IN1 = Magnitude Nodes



Ermittelte Positionen von XM-IN1 und XM-Pitch Nodes aus der Impedanzkurve



### Gegenüberstellung der gewählten Maxima Referenzwerte Test A-C:



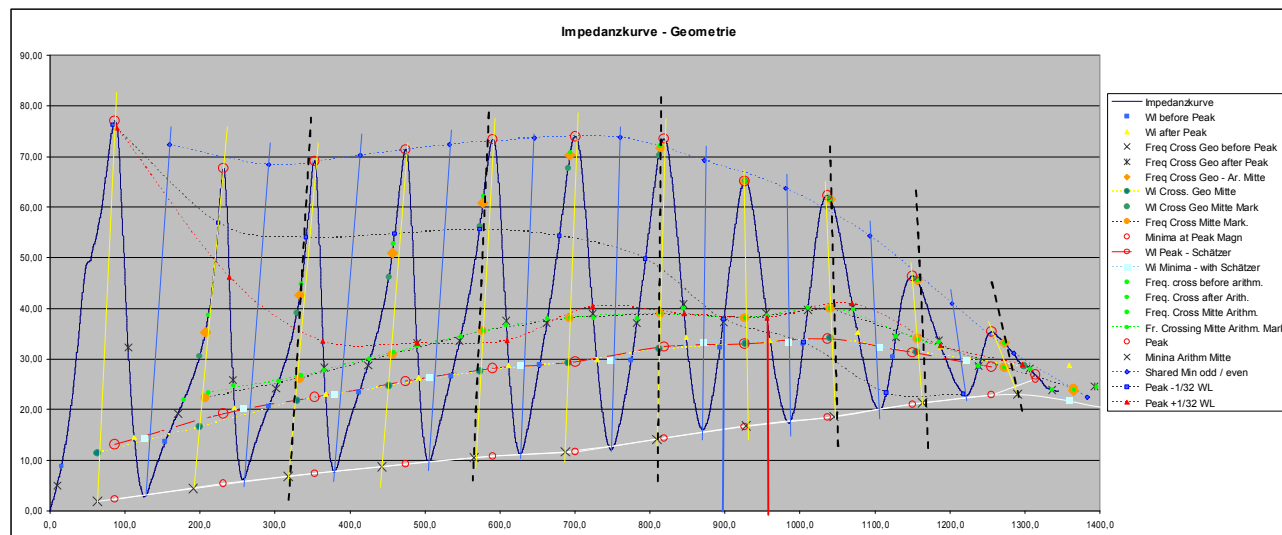
**Hinweis Test #1 A-C: Alle hier gezeigten Positionen liegen ~1cm zu nahe am Mundstückende.**

Unterhalb NT8 sind keine sehr großen Unterschiede, darüber differieren die Ergebnisse bei NT 10 um ca. 0,3cm. Ob die WI-Crossings above Peak in den Kombinationen doppelt gewertet werden, spielt bei den FFT Messungen scheinbar keine besonders große Rolle. Am obersten Ende nahe der Cut-off Frequenz (hier Mode #11) sind Center Werte nicht mehr annähernd richtig ermittelbar, diese liegen aber „out of scope“ und werden nicht verwendet.



## FFT-Auswertung mit neuen Funktionen und Formeln

Neue Analyse der FFT Messung vom Dez. 2018:



Strahlen (gelb) schneiden ab Mode 5 für tiefere Modes  
 von bei arithm. Mitte Hz der Minima Freq. zu Peak Max  
 auch bei arithm. Mitte Hz der WI Magn. Geo Crossings  
 bei arithm. Mitte Hz der Frequenz Crossing arithm. MW  
*braucht es eine andere Berechnung.*

Strahlen von Freq. der Minima zu arithm. Mitten Peak Hz  
 hat den selben Winkelverlauf.

Schwarz strichliert von arithm. Mitte Hz der Minima Freq. zu Freq. Cross. Mitte  
 illustriert in etwa die Steigung für Magnitudenpositionen und Abweichungen zu den Steigungen  
 (gelb) welche für die für Peak-Frequenz relevant sind und für den auftretenden Versatz  
 verantwortlich sind.

Solange ein Peak **besonders symetrisch ist/wäre**, (hier Mode 8), kann festgestellt werden:  
 $+/- 1/8 \text{ WL Peakfrequ} * 1/4 \text{ WL} = 1/32 \text{ WL}$  gibt ~XM „Rand-Frequenzen“,  
 diese liegen dann an selben Positionen wie die arithm. Freq. Mitten zwischen Minima und Peak

## Modifikationen gegenüber einem closed-open Zylinder ändern Funktionspositionen entlang der Instrumentenachse:

Der allgemeine Versatz für die Impedanzmagnituden kann durch die Lage (Winkel) der **Frequenzmitte der WI Crossings** zur Peak Maxima Frequenz bestimmt werden.

**Input Impedanz Maxima = gebildet aus** Pressure Antinodes **und** Pressure Nodes =  
Hier am geschlossenen Ende = Lippen aber immer als Druckbauch ausgebildet.

**Die Peak Magnituden wurden radikal geändert.** Einige sind stark erhöht, z.b. umso näher im Bereich Mundstück Popping Frequenz, andere sind bedämpft. Z.b. NT2 und NT3, die durch den Schallbecher dafür am stärksten aus ihrer ursprünglichen Frequenzlage höher versetzt sind.

Der Schallbecher hebt die Wave Impedanz und sorgt dafür, daß höhere Frequenzen immer weniger zu den Lippen reflektiert werden. Verluste sorgen ebenfalls für einen Anstieg der Impedanzminima und einem Abfall der Maxima. **Die verknüpften Funktionspositionen sind zu den neuen Frequenzen mitgewandert.** Druckbäuche und Knoten bestimmen nach wie vor die Peak Maxima, usw, diese haben aber so teils Einbußen durch Dämpfung.

Entlang der Instrumentenachse (das Rohr ist nach wie vor gleich lang!) sind die Positionen der Antiresonanzen = Impedanz Minima nicht in diesem Ausmaß mitgewandert und daher verzerrt nun an anderen Stellen (Versatz zu Peak Pitch-Positionen).

Instrumentenachse: betrifft Frequ. zu 1. MPC Popp. Fr.	- Versatz unterhalb:	ohne Versatz etwas darüber:	+ Versatz zu oberhalb:
die 1. Druckbäuche am MPC sind die 1. Druckknotenpositionen liegen das Instrument scheint akustisch Peak Frequenzen liegen/wurden <b>Wellenlängen / Knotenabstände</b>	gedehnt -> später + kürzer höher <b>kürzer</b>	<b>Grundversatz</b> (länger) tiefer	gestaucht <- <b>früher -</b> <b>länger</b> <b>tiefer</b> <b>länger</b>

## Der Versatz von Pitch Nodes und Antinodes wird durch das Verhältnis der WI Crossings below / above Peaks zu den Peaks dominiert:

**Ohne jeden Versatz** liegt das maximale Pitch Potential (bei Perturbationen) an den Impedanz Maxima und Minima. Auf Höhe der Wave Impedanz Crossings (**nach 1/8 WL oder 90 Grad**) liegen die Pitch Nodes. Durch die Verzerrungen von Minima und Maxima in Frequenz als auch Magnituden haben sich aber auch die Positionen der WI Crossings (Mitte zwischen Minima und Maxima) geändert. Auf der physikalischen Instrumentenachse wirkt das in einem Ausmaß, das noch stärker in selber Richtung ausfällt als der Magnitudenversatz.

Es kommt somit zu dem Effekt, daß bei Perturbationen Positionen auf der Instrumentenachse nicht entgegengesetztes Potential für Pitch und Magnituden haben. (Nodes wie auch Antinodes), sondern diese zueinander verschoben sind. Sie sind „out of phase“ wie Peaks und Minima auch!

Eine akustische Mitte wird durch die Funktionspositionen XM-IN1 und XM-IN2 gebildet. **Oder anders herum von Peak-Pitch Antinodes (max. Potential) vor und nach dieser Mitte?** Ob nun die Pitch-Nodes von Magnituden-Antinodes abweichen oder umgekehrt ist prinzipiell das selbe. Ebenso welche gebildete Kurve von der anderen abweicht und welche so einen Versatz hat ist die selbe philosophische Frage: War zuerst das Huhn oder das Ei?

Würde man sagen Blechblasinstrumente sind gerade ja deshalb so gebaut um möglichst den Frequenzen einer harmonischen Reihe nahezukommen, könnte man ja argumentieren daß die Peak Pitch-Nodes und Antinodes herum die eigentliche Mitte definieren sollten. Magnituden-Antinode-Positionskurven wären dann eine etwas abgeschwächte Form (und Versatz) anhand der Minima-Pitch Frequenz Domäne.

Egal wie man es betrachtet, der Abstand einer 1/4 Wellenlänge wird unterschiedlich geteilt. 1/8 WL-Abstände werden dadurch 1x gestreckt und 1x gestaucht, mit Ausnahme an der Symmetriefrequenz.

## Was passiert in der akustischen Mitte bei Perturbationen:

Was wir wissen: Die Kurve zeigt alle (~odd oder even Vielfachen einer fiktiven Grundfrequenz):  
 ~Odd= Peak Maxima zeigen die Frequenzen, die am MPC einen Druckbauch haben (~min. Fluß)  
 ~even= Minima zeigen Frequenzen, die am „-“ einen Druckknoten (~max Fluß)

Bei der jeweiligen tatsächlichen physikalischen XM-PEAK Pitch-Node Position werden:

- die betrachteten Peak Frequ. lokal weder einen Druckbauch, noch einen Druckknoten haben.
- Peak Pitch Change hat dann kurz kein Potential = Nodes; Peak Magnituden haben großes Potential.

- alle odd/even shared Minima Frequ. einen „Drang“ zu einem pot. Druckbauch zu werden
- alle even/odd shared Minima Frequ. den „Drang“ zu fast einem pot. Druckknoten zu werden;

- das kann aber nicht gelingen .... wegen der Randbedingung closed/open.

-> shared Minima-Frequenzen beinahe max. Pitch-Pot, aber Minima-Magnituden kaum Potential down  
 eine Minima in der Magnitude zu vertiefen ist offensichtlich extreme Energieverschwendung?

Die XM-Pitchnode Pos. für Peakfrequenzen liegt in Druckverlaufskurven bei 0,71% Druckmagnitude, allerdings nur, wenn Druck- und Flußverhältnisse nicht gegeneinander verschoben sind.  
 (=1/2 Breite oder 1/8 WL) bei even # Peaks vor der Druckbauchmaxima, bei odd # danach.  
 Druckbäuche und Druckknoten haben immer einen Abstand von 1/4 WL.

Die Wave Impedanz Crossings ergeben die Abgrenzung von Peaks zu Minimas und bilden die geometrische Mitte auf der Magnituden-Achse. Gemittelte Frequenzwerte von Crossings below und above ergeben eine WI-Center Frequenz mit entsprechender WI-Magnitude.

Die Peakfrequenzen zeigen einen Versatz zu den jeweiligen ermittelten Punkten. Dieser Versatz ist nur an einer Position gegen Null, wo eine besonders ausgewogene Symmetrie vorherrscht und die WI Center Freq. mit der Peak Freq. übereinstimmt.

## Lokale Druckbäuche & Druckknoten sind globale Magnituden Nodes für Peak Maxima, aber nicht für Impedanz Minima in der Eingangsimpedanzkurve!

Umso mehr Knoten u. Bäuche vor Perturb. sind (Entfernung), umso weniger Magn. Pot. am MPC!  
 aber umso mehr Knoten und (Entfernung) um so stärkeres Pitch Pot. wird am MPC **manifestiert!**

D. h. Einfluß =Potential von geänderten **Druckverhältnissen** fällt mit Entfernung vom Mundstück  
 =Potential von geänderten **Flußverhältnissen** steigt mit Entfernung vom Mundstück

Wo weniger Druckänderungen, da mehr Flussrate  
 = Summe = 1,0 **abzügl. vorhandener + zusätzlicher Verluste.**

**Druckbäuche** sind global Nodes für PEAK Magnituden Pot. und haben dafür PEAK Pitch Pot.  
 =Flußrate-Nodes bei Impedanz Peak Maxima in der Input-Impedanz Kurve.

**Druckknoten** sind globale Nodes für PEAK Magnituden Pot. und haben dafür PEAK Pitch Pot.  
 = Flußrate-Antinodes nahe Impedanz Minima in der Input-Impedanz Kurve

**Druckbäuche** könnten auch als Synonym für Peak-„Berge“ inkl. deren Maxima gesehen werden.  
 Ginge man davon aus, dass höhere Druckschwankungen höheres Pitch Pot haben, würde sich das also widersprechen und das Gegenteil ist der Fall. Umso stärker die Pressure Antinodes = Druckbäuche ausgebildet sind, umso schwächer ist das mögliche Pitch Potential, was bedeutet, dass sich diese in der Frequenz weniger leicht verschieben = manipulieren lassen als schwach ausgebildete Druckbäuche. Die Auswirkungen einer Perturbation gehen dann in eine vermehrte Magnitudenverschiebung der Impedanz-Minima auf- und abwärts, dieses Potential fehlt dann bei den Peak Maxima.

**Druckknoten** könnten auch als Synonym für Peak-„Täler“ (nicht Minima) herhalten. Umso schwächer (unschärfer, höher) die Pressure Nodes ausgebildet sind, umso stärker ist das mögliche Pitch Potential der Peaks. Die Auswirkungen einer Perturbation gehen auch hier in eine vermehrte Magnitudenverschiebung der Impedanz Minima.

Die Globale Position XM-Pitchnode dazwischen liefert dieses Bild abwechselnd für **even/odd Resonanzen**, welche aber alle nun nur umnummeriert immer noch stark **modifizierte ungerade** Vielfache einer nunmehr nur noch fiktiven Grundfrequenz sind **als Peaks**, die **Minima** zeigen alle **nicht resonierenden (beinahe noch geraden)** Vielfachen, und das auf der Ebene der Lippen!

**Das elastische Gesamtsystem wird durch ein „Korsett“ der Wave-Impedanz-Crossings und der Antiresonanzen gestützt, dieses wird wiederum von den vorhandenen Rahmenbedingungen diktiert, und dadurch werden so die möglichen Auswirkungen auf die Peaks vorbestimmt. Die Peaks sind nur Teil eines Ganzen!**

## Quick &amp; dirty - but straight forward! Praktikable Lösungen sind gefragt:

**Positionsfindung mit kleinstmöglichen Positionsfehlern:**

Es braucht dazu idealerweise Referenzen und Equipment (siehe Teil 5, Messkopf).

1. phys. Center-Positionen von Störungen / Perturbationen  
 + Verluste Valvecluster (bei Rotary ~ +3mm )  
 - Minderlänge SZ-Bögen gegenüber Mittellinie mit berücksichtigen ( bei Rotary ~ -3mm)  
 a: sind entweder bekannt, z.B. Stimmzug-Gap, Wasserklappe, etc.,  
 oder können – sofern es eine Referenzmessung ohne die Störung gibt - ermittelt werden, anhand  
 b: der effektiven Reflexe, die sich am „akustisch wirksamen“ IR-Lineal bilden (Nulldurchgang pos/neg.)  
 - akustisch wirksame Mehrlänge Mundstück+ Mundrohr bei Trp. (~20mm)  
 - und Perturbationsart: Hülse, Kugel, Bolzen, .... zusätzliche Länge durch Verluste (2-5mm)  
 Mit Test-Bolzen 7,25mm Durchmesser und Länge 22mm: +5mm durch zusätzliche Verluste (2-3 Samples) =  
 Nulldurchgang der lokalen Reflexe auf der IR-Skala -25mm = ergibt die phys. Center-Position des Bolzen,  
 idealerweise bei vermuteter shared XM-IN1 Position (physisch ~62cm u. shared XM-PN ~ 67cm) ermittelt.
2. ermittelte IR-Reflexe können anhand einer bekannten Position so auch überprüft werden.

*Bei einer Fehlersuche:*

*Gibt es keine Referenz, ist die Störung klein und die Art und Größe/Länge der Störung gar nicht bekannt, oder gibt es gegenteilige Störungen kurz nacheinander, kann auch die Position nicht bestimmt werden! Nachfolgende Reflexe werden durch vorherige stärkere Reflexe verdeckt (zB ausschwingendes Mundstück). Es kann dann nur ein möglicher Bereich und die mögliche Art der Störung geraten und eingegrenzt werden.*

3. Will man die tatsächliche, aktuelle physische Lage des Grundversatzes ermitteln, kann das mit gezielten Perturbationen und den dadurch ausgelösten IR-Reflexen geschehen.  
 Positionen von Druckbäuchen bei XM-IN1 (ungerade Modes) + aller weiteren und  
 Positionen von Druckbäuchen bei XM-IN2 (gerade Modes) + aller weiteren  
 sollten dadurch mit relativ geringen Positionsfehlern bestimmt werden können!

Idealerweise nimmt man denjenigen Peak, der die symetrisch gleichmäßigste Form hat. | Auf Bb Trompeten, Kornetten und Flügelhörnern sollte das im Allgemeinen bei Ventilstellung V0 Mode 7 oder Mode 8 sein.

**Das Problem mit „physischen Einengungs-Proben“:**

Festgestellte Abweichungen durch starke Einengungen sind an Druckbäuchen immer etwas geringer.  
 XM-IN1 von Mode 7 = Druckbauch hat sich daher als geeignetste Stelle zur Positionssuche herausgestellt.  
 XM-IN1 von Mode 8 liegt immer geringfügig nach XM-IN1 von Mode 7, auch wenn Mode 8 eventuell tief liegt. Die XM-Pitch Node Position beider Modes liegt annähernd gleich, jeweils eine 1/8 WL später. 1/8 WL von Mode 7 = ~ 5,3cm und Mode 8 = ~ 4,7cm, d.h. XM-IN1 von Mode 8 ist ~ 5mm weiter vom Mundstück entfernt als XM-IN Mode 7. Eine shared XM-Pitchnode Position liegt 5,3 cm nach XM-IN1 von Mode 7.

Das bedeutet ich kann mit Constrictions ( auch XXL) Impedanz Peak Nodes, vor allem an Druckbäuchen = NT7 bei XM-IN1 oder NT8 bei XM-IN2 recht zuverlässig bestimmen. Die mit Bolzen 725 gefundenen Magnituden-Nulldurchgänge an Druckbäuchen sollten rund 5mm zu nahe am Mundstück liegen. D.h. Ursprungspositionen für schwächere Perturbationen liegen physisch 5mm später als die gefundenen Nulldurchgänge an Druckbäuchen (XM-IN1 Mode 7) mit Bolzen 725.

Pitchnodes sind meßtechnisch kaum korrekt zu erfassen, im allgemeinen Fall gilt aber: Gefundene XM-IN1 Nulldurchgangsposition NT7 + 1/8 WL, bei größerer Perturbation mit Bolzen 725 +5mm Zugabe = shared XM-Pitchnode Ursprungsposition, und diese ist liegen bei Mode 7+8 sehr eng beisammen!

Nach unzähligen Versuchen erscheint es wesentlich einfacher, für die Ermittlung dieser physischen shared XM-PN Position ohne Pitch Versatz die akustische Länge der Bell Minima Position ohne Perturbation zu wählen, durch 2 zu dividieren und davon die (bekannte) akustische Extralänge des Mundstücks = 20mm abzuziehen. XM-IN1 +IN2 Positionen ergeben sich dann anhand der 1/8 Wellenlänge der jeweiligen Modes.