

Vom Zylinder zur Trompete

Lokale Perturbationen an einer vollständigen B-Trompete

Einzelne und kombinierte Änderungen von Peakfrequenz, Impedanzmagnitude und Druckknotenabständen

Forschungsstand Release 3 | V0 (kein Ventil gedrückt)
13. Oktober 2026 | Fassung 1.3

Das praktische Ziel ist zu verstehen, an welchen Stellen kleine Querschnittänderungen die akustischen Resonanzen eines Blechblasinstruments verändern und welche Kombinationen später ausgewählte musikalische Eigenschaften verbessern könnten. Ausgangspunkt waren Versuche am einfachen closed-open Zylinder. Dieser Bericht überträgt die Arbeit auf eine vollständige Trompetengeometrie mit Mundstück, Mundrohr und Schallbecher.

Eine vollständige V0-FEM-Serie benötigte nach der Laufzeiterinnerung im Projekt rund sechs Stunden. Das motivierte ein geprüftes Transfervverfahren: zuerst im zylindrischen Bohrungsbereich, dann erweitert auf Mundrohr und Schallbecher und für alle sieben weiteren Ventilkombinationen getestet.

Modes #3 und #8 veranschaulichen Erweiterungen; Mode #4 dient dem detaillierten Vergleich mit Einengungen. Die gemeinsame Optimierung über Ventilkombinationen ist der nächste Schritt und kein bereits erreichtes Ergebnis.

Vorgeschichte: [Brassissima auf YouTube](#). Diese PDF baut auf den Grundlagen aus Videos 1–3 auf. Sie sollten als Einführung vor dieser Dokumentation angesehen werden; Links stehen auf der letzten Seite.

Erstellt im Brassissima-Projekt mit KI-Unterstützung bei Analyse und Dokumentation. Die Ergebnisse sind auf gespeicherte OpenWind-Daten und Prüfdateien zurückführbar.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Thema	Seite
01	Was wird untersucht?	3
02	Referenzgeometrie und Versuchseinstellungen	4
03	Wie die Perturbation definiert ist	5
04	Was die angegebenen Änderungen bedeuten	6
05	Modes #1–#8: Pitchpotential von Zylinder und Trompete	7
06	Modes #1–#8: Magnitudenpotential von Zylinder und Trompete	8
07	Von Stunden FEM zum geprüften Transferverfahren	9
08	Das komplexe referenzbasierte Transfermodell	10
09	Einzelperturbationen: Peakfrequenz	11
10	Einzelperturbationen: Magnitude und Spiralen	12
11	Pitch-Nodes: Die Druckflanke entscheidet	13
12	Mehrere Erweiterungen: ausgewählte Gruppen	14
13	Mode #4: Einengungen kehren die Richtungen um	15
14	Der Staumauer-Effekt: lokale und globale Umverteilung	16
15	Mode #4: tatsächliche Pitch-Nodes und Magnitudenextrema	17
16	Was geprüft ist - und was offen bleibt	18
17	Nächster Schritt: Optimierung des gemeinsamen Instruments	19

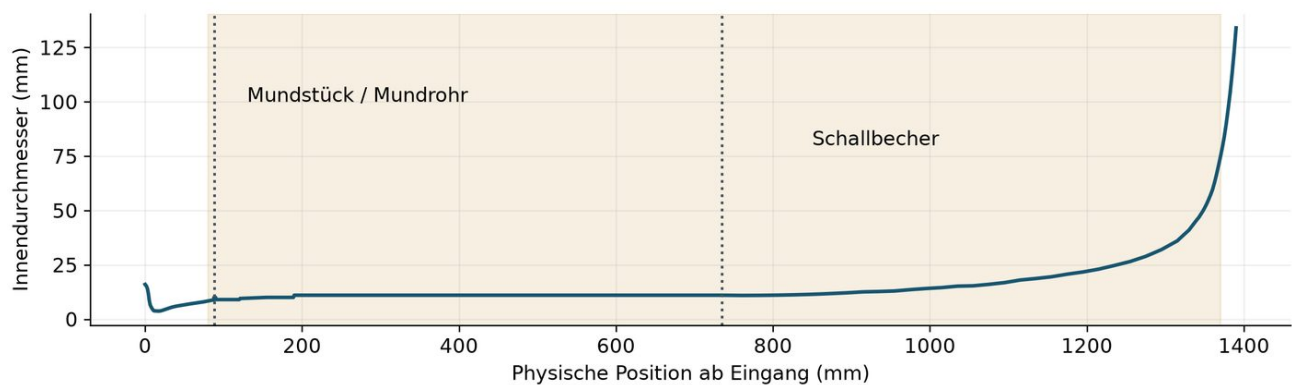
01 Was wird untersucht?

Die Forschungsfrage lautet: Welche lokale Änderung beeinflusst welche Resonanzen, in welcher Richtung und mit welchen Nebenwirkungen? Die physische Gesamtlänge bleibt unverändert.

Begriff	Bedeutung in diesem Bericht
V0	Vollständige Trompete, kein Ventil gedrückt; der Ventilstock bleibt Teil der Geometrie.
Mode #n / peak	Das n-te geordnete Maximum der Referenz-Eingangsimpedanz; kein gespielter Ton und keine vorausgesetzte harmonische Frequenz.
Druckknoten	Lokales Minimum des komplexen Druckbetrags $ p(x) $ bei einer bestimmten Frequenz. Mit Verlusten muss der Druck nicht null werden.
Druckbauch	Lokales Maximum von $ p(x) $, keine momentane positive Druckauslenkung.
Pitch node (PN)	Zentrum, an dem eine bestimmte endliche Einzelperturbation die Peakfrequenz gegenüber der unperturbierten Referenz nicht ändert.
XM-PN / XM-IN1 / XM-IN2	Brassissima-Bezeichnungen für einen ausgewählten mittelnahen Pitch-Node und benachbarte Nullstellen der Peakmagnitudenänderung davor/danach. Keine standardisierte akustische Terminologie.
RL / PL / q	Physische Rohrlänge / Perturbationslänge / lokales Durchmesser Verhältnis. q ist vom Resonanzgütefaktor Q zu unterscheiden.

Die historische gemeinsame mittlere Pitchreferenz kann einen Grundversatz nach unten enthalten. Sie ist nicht identisch mit einer strengen Nullstelle gegenüber dem unperturbierten Spektrum. „Tatsächlicher PN“ bezeichnet hier diese strenge Nullstelle für die festgelegte Perturbation.

02 Referenzgeometrie und Versuchseinstellungen



Die V0-Kontur ist 1390 mm lang: rund 88 mm Mundstück, kurzes teilweise konisches Mundrohr, zylindrischer Bereich mit 11 mm Bohrung und Schallbecher. Die frühere Mess-/Legacy-Kontur des Bechers wurde leicht geglättet. Sie ist die verwendete Referenz, keine aktuelle Messung eines vorhandenen Instruments.

Parameter	Wert
Referenzfrequenzen	#3: 350.58 Hz #4: 475.86 Hz #8: 937.80 Hz
Temperatur / rel. Feuchte / CO ₂	23 °C / 50 % / 0.0004
OpenWind / FEM	0.12.4 / 20 mm Elementlänge, Ordnung 4
Verluste / Abstrahlung	Thermoviskose Verluste aktiv; unflanged-Abstrahlung; Sprungmassen aktiv; sphärische Wellen aus.
Frequenzraster	20–2000 Hz; 1/3 Hz
Zentren der Einzelserie	90–1360 mm, Schritt 10 mm; 128 Zentren × 2 Arten = 256 Fälle.
Lokale Intervalle	20 mm; erstes 80–100 mm, letztes 1350–1370 mm. Austrittsdurchmesser unverändert.

Der erste Fall der Einzelserie kann den letzten Backbore-Abschnitt einschließen. Detaillierte Mehrfachbeispiele lassen Zentren im Mundstück (<88 mm) weg. Alle Positionen werden ab dem physischen Eingang x=0 angegeben.

03 Wie die Perturbation definiert ist

Eine konstante additive Durchmesseränderung folgt der ursprünglichen Kontur. q ist nicht überall gleich. In konischen Teilen wird der Versatz auf das vollständige 20-mm-Intervall einschließlich Zwischenpunkten angewendet. Sprünge am Beginn und Ende bleiben erhalten.

$$d'(x) = d(x) + \Delta d, \quad x_c - \frac{PL}{2} \leq x \leq x_c + \frac{PL}{2}$$

$$q(x) = \frac{d'(x)}{d(x)} = 1 + \frac{\Delta d}{d(x)}$$

Änderung	Durchmesserversatz	Bei 11 mm Referenzbohrung
Erweiterung	+1.1 mm	12.1 mm; q = 1.1; Flächenverhältnis = 1.21
Einengung	-1.0 mm	10.0 mm; q = 1/1.1; Flächenverhältnis = 1/1.21

Bei kleinerem Referenzdurchmesser ergibt dieselbe Erweiterung ein größeres q; im Becher nähert sich q dem Wert 1. Reziproke Durchmesserverhältnisse gelten exakt nur bei d=11 mm. Andernorts sind die festen Versätze +1,1/-1,0 mm nicht reziprok.

Diese Standardwerte sind eine praktische Forschungskonvention ohne besondere wissenschaftliche Stellung. Position, Länge und Durchmesserversatz bleiben Variablen für künftige Tests.

Die Referenz enthält bereits Konen, Gaps und Bohrungsänderungen. Kombinationen verwenden feste Referenzpositionen; Extrema werden nach Einsetzen der ersten Änderung nicht neu als Platzierungsziele bestimmt. Überlappende Intervalle sind ausgeschlossen.

04 Was die angegebenen Änderungen bedeuten

$$Z_{\text{in}}(f) = \frac{p(0, f)}{U(0, f)}$$

p ist der komplexe akustische Druck, U der komplexe Volumenstrom. Die Eingangsimpedanz hat die Einheit $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$. Betrag und Phase stammen aus demselben komplexen Spektrum. Das unperturbierete Instrument ist immer die Referenz.

$$\Delta c_n = 1200 \log_2 \left(\frac{f'_n}{f_n} \right)$$

$$\Delta M_n = 100 \left[\frac{|Z'(f'_n)|}{|Z(f_n)|} - 1 \right]$$

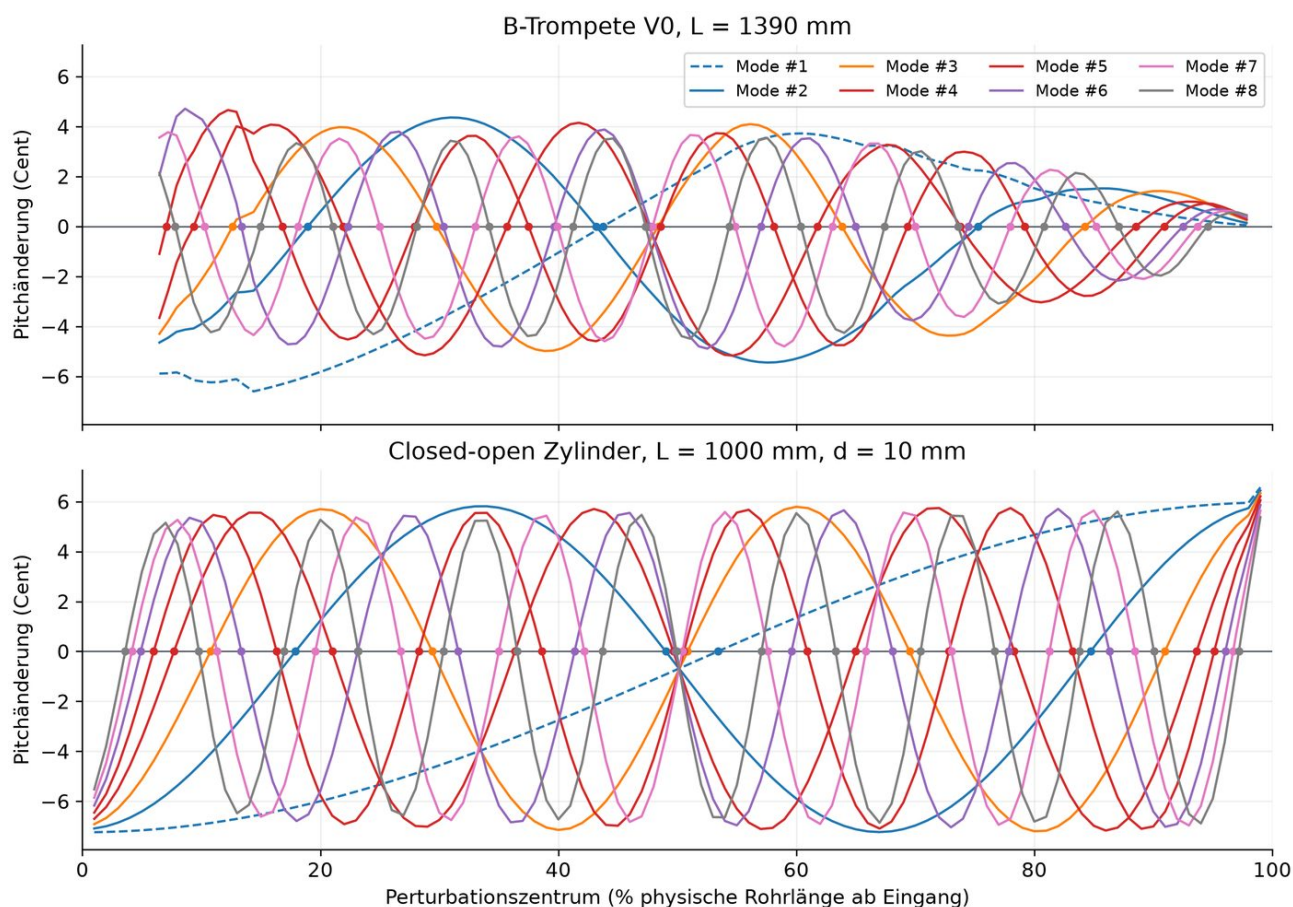
$$r_{M,n} = 1 + \frac{\Delta M_n}{100}; \quad \Delta L_n = 20 \log_{10} (r_{M,n}) \text{ dB}$$

f_n und f'_n sind zugeordnete Referenz- und perturbierete Peakfrequenzen. Die Magnitude wird am jeweiligen eigenen Peak verglichen. Das 1/3-Hz-Raster wird lokal mit drei Punkten quadratisch verfeinert; die Zuordnung bleibt in Fenstern um die Referenzpeaks.

Druckfelder werden auf denselben Eingangsvolumenstrom normiert. Größeres $|Z_{\text{in}}|$ bedeutet dann einen größeren Eingangsdruckbetrag. Ohne diese Normierung ist „der Druck am Eingang steigt“ mehrdeutig.

Die Peakmagnitude ist keine direkte Bewertung von Ansprache oder musikalischer Qualität. Minima, Phase, Impulsantwort und Halbwertsbreite bleiben wichtige zusätzliche Größen, werden hier aber nicht neu ausgewertet.

05 Modes #1–#8: Pitchpotential von Zylinder und Trompete

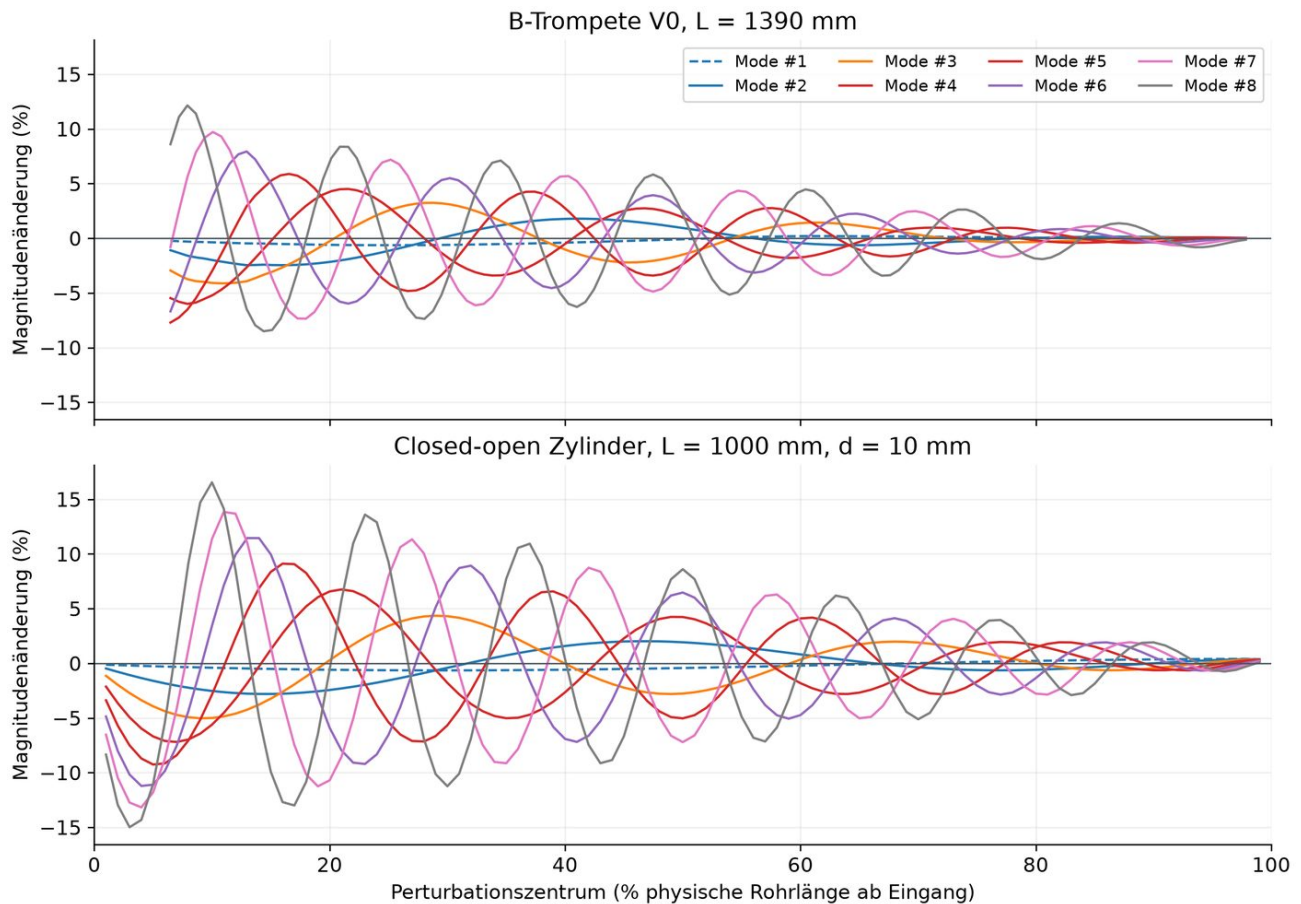


Oben: vollständige Trompete V0. Unten: closed-open Zylinder. Alle Kurven zeigen einzelne Erweiterungen; Punkte markieren linear interpolierte Nulldurchgänge der abgetasteten Pitchkurve. Es sind tatsächliche Nullstellen zur jeweiligen unperturbierten Referenz, nicht die historische gemeinsame Referenz mit Grundversatz.

Die Zylindermodes besitzen annähernd vergleichbares Pitchpotential: beobachtete Minima von $-7,24$ bis $-6,89$ Cent, Maxima von $+5,60$ bis $+6,57$ Cent. Sie sind nicht exakt gleich. In der Trompete hängen Potential und physische Nodepositionen stärker von Mode und lokaler Kontur ab; Mode #1 bleibt hier nur als Vergleich enthalten.

Beide Tests: PL=20 mm, 23 °C, 50% rel. Feuchte, Verluste und unflanged-Abstrahlung. Zylinder: d=10 mm, überall $q=1,1$, $\Delta d=+1$ mm, PL/RL=2%. Trompete: $\Delta d=+1,1$ mm, $q=1,1$ nur bei d=11 mm, PL/RL $\approx 1,44\%$. Modezahlen stehen zwischen den Geometrien nicht für gleiche Frequenzen; der Vergleich ist beschreibend, kein isolierter Schallbechertest.

06 Modes #1–#8: Magnitudenpotential von Zylinder und Trompete



Oben: Trompete; unten: Zylinder, bei gleichen Skalen. Anders als das Pitchpotential hängt schon das Magnitudenpotential des Zylinders stark vom Mode ab. In beiden Fällen oszillieren Änderungen mit der Position und werden zum offenen Ende im Allgemeinen schwächer. Die Trompete verändert Amplitude, Asymmetrie und räumliche Lage der Extrema.

Beispiele beobachteter Magnitudenspannen einzelner Änderungen: Mode #3, Zylinder $-5,03 \dots +4,35\%$, Trompete $-4,12 \dots +3,24\%$; Mode #8, Zylinder $-14,98 \dots +16,55\%$, Trompete $-8,50 \dots +12,14\%$. Das sind Extrema auf dem vorhandenen Positionsraster, keine mathematisch nachgewiesenen kontinuierlichen Maxima.

Der Zylinder ist bei 1–99% physischer Länge abgetastet; die Trompete bei 90–1360 mm (etwa 6,47–97,84%). Ein eingangsnahes Trompetenmaximum kann daher außerhalb des dargestellten Bereichs liegen. Geometrie, Frequenzen, lokales q und relative Perturbationslänge tragen gemeinsam zu den Unterschieden bei.

07 Von Stunden FEM zum geprüften Transferverfahren

Der ursprüngliche Ansatz berechnete für jede Perturbationsposition und beide Änderungsarten separat ein vollständiges OpenWind-Spektrum. Der V0-Lauf dauerte nach der Projekterinnerung rund sechs Stunden; dies ist kein neu gemessener Zeitbenchmark. Eine volle Wiederholung für jede Ventilkombination hätte erheblichen zusätzlichen Rechenaufwand bedeutet.

Gespeicherte Serie	Nachprüfbarer Umfang
Closed-open cylinder	199 Fälle: eine Referenz plus 99 Erweiterungen und 99 Einengungen.
Trumpet V0	276 Perturbationen (138 Zentren × 2 Arten), plus separate unperturbierete Referenz.
Erweiterte V0-Auswahl	256 dieser Perturbationen: 128 Zentren bei 90–1360 mm, beide Arten.

Entwicklung in drei Schritten. Zuerst wurde die referenzbasierte Methode im zylindrischen 11-mm-Bohrungsbereich geprüft. Danach wurde der lokale Abschnittstransfer auf nichtzylindrische Mundrohr- und Becherkonturen erweitert, einschließlich Verlusten und Sprungmassen. Schließlich wurde jede weitere Ventilkombination mit ihrer eigenen unperturbierten komplexen Referenz und passenden Geometrie berechnet; V0-Kurven wurden nicht bloß verschoben.

Für V2, V1, V3, V12, V23, V13 und V123 ist keine vollständige wandernde FEM-Perturbationsserie mehr nötig. Nach Bestimmung des gemeinsamen vorgelagerten Transfers benötigt jede Kombination ihr Referenzspektrum und ihre bekannte Geometrie. Lokale Änderungen werden dann mathematisch berechnet; OpenWind-FEM liefert unabhängige Stichproben.

Bereits abgeschlossen: 2232 Prognosen über die sieben Kombinationen; acht FEM-Prüfungen je Kombination (56 insgesamt), mit 504 Peakvergleichen für Modes #2–#10. Alle gewählten Prüfschwellen wurden erfüllt. Reine Prognosezeit je Kombination: etwa 42–50 Sekunden, ohne Referenzvorbereitung und FEM-Prüfungen. Das ist ein großer Zeit-/Rechenvorteil, kein hardwareunabhängiger Beschleunigungsfaktor.

Damit ist die Simulationmethode auf die anderen Rohrlängen übertragen. Ihre musikalischen Ziele und gemeinsamen physischen Wege in einer Optimierung zusammenzuführen bleibt die nächste Forschungsaufgabe.

08 Das komplexe referenzbasierte Transfermodell

Die schnellere Rechnung verwendet bekannte Referenzgeometrie und ihr komplexes OpenWind-Spektrum. Ein Abschnitt wird mathematisch ersetzt, statt jede wandernde Perturbation vollständig mit FEM neu zu berechnen. Dies ist keine empirische Pitchformel und keine eindeutige Rekonstruktion unbekannter Geometrie allein aus Impedanz.

$$p_{\text{in}} = Ap_{\text{out}} + BU_{\text{out}}; \quad U_{\text{in}} = Cp_{\text{out}} + DU_{\text{out}}$$

$$F_T(Z) = \frac{AZ+B}{CZ+D}$$

$$F_T^{-1}(Z) = \frac{B-DZ}{CZ-A}$$

Für physisches p und U sind A und D dimensionslos, B besitzt Impedanzeinheiten und C inverse Impedanzeinheiten. Alle sind frequenzabhängig und können komplex sein. Z_{load} ist der akustische Abschluss eines Abschnitts, kein separater Amplitudenkoeffizient.

$$Z_{\text{down}} = F_{T_{\text{local}}}^{-1}(F_{T_{\text{up}}}^{-1}(Z_{\text{ref}}))$$

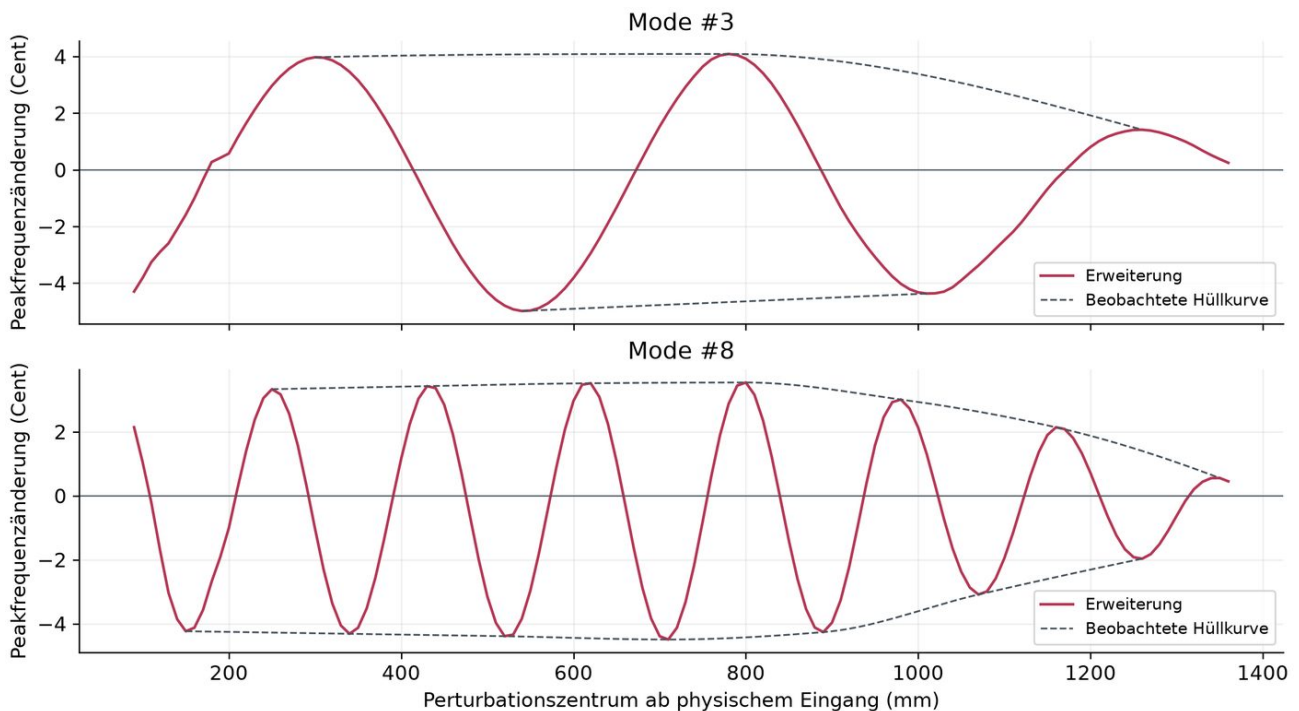
$$Z'_{\text{in}} = F_{T_{\text{up}}}(F_{T'_{\text{local}}}(Z_{\text{down}}))$$

Die vorgelagerte Transferrechnung ist bei 190 mm verankert. Der Mundstück-/Mundrohrtransfer wurde aus drei berechneten Abschlüssen bestimmt: perfectly open, closed und unflanged. Bekannte Konturstücke werden mit verlustbehafteten, auf OpenWind basierenden Matrizen fortgesetzt; Konen unterteilt und Sprungmassen berücksichtigt.

Die rekonstruierte Referenzmatrix ist bis auf einen gemeinsamen Skalierungsfaktor bestimmt, der sich in F_T herauskürzt. Druckfeldamplituden werden in diesem Bericht separat mit FEM berechnet.

Mehrere Änderungen werden in physischer Reihenfolge kombiniert, mit veränderten und unveränderten Abschnitten oder einem algebraisch gleichwertigen Referenzoperator. Gemeinsame Ergebnisse entstehen nicht durch Addition von Cent-/Prozentänderungen oder Multiplikation isolierter Gruppenfaktoren.

09 Einzelperturbationen: Peakfrequenz

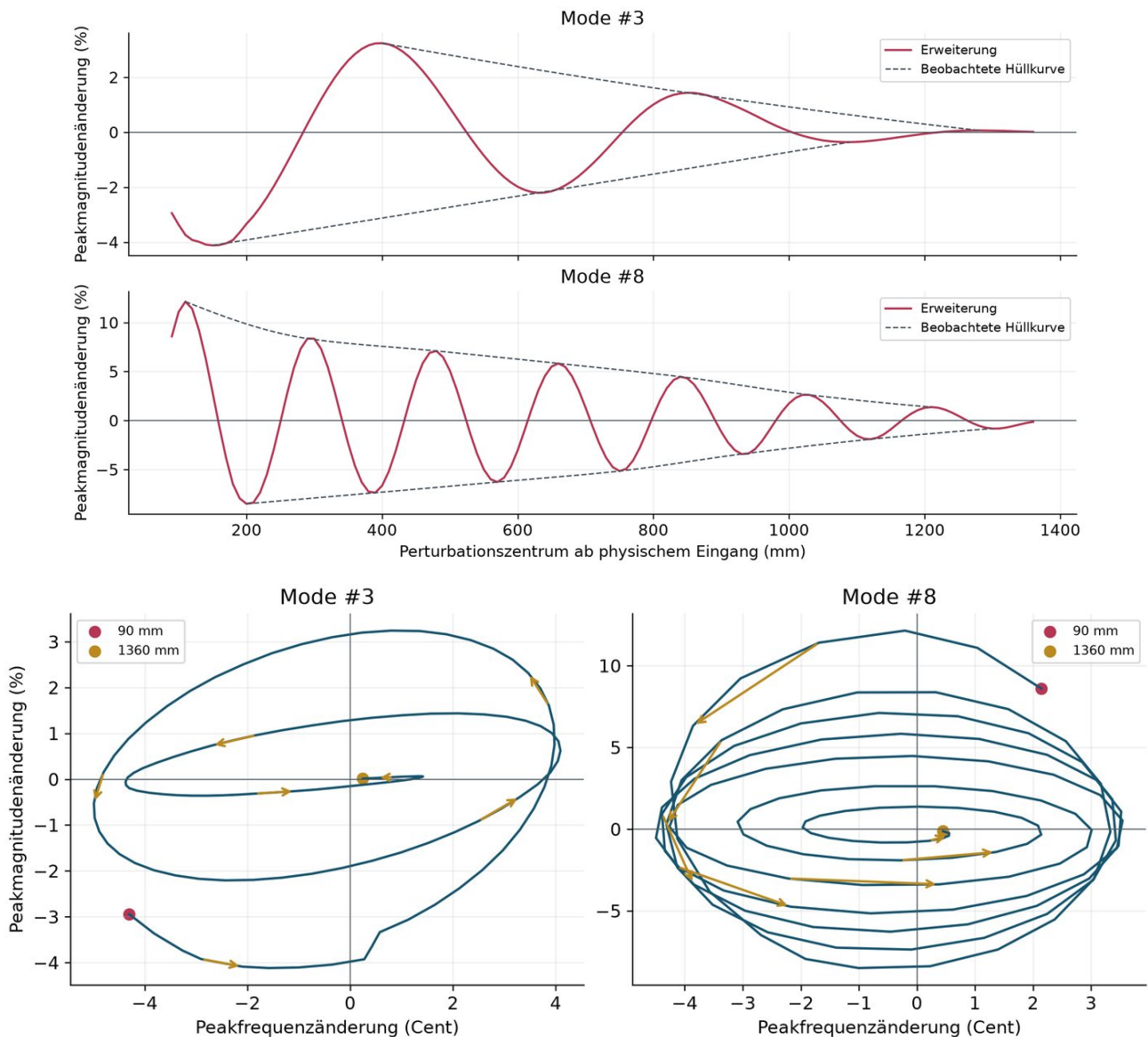


Jede Kurve verfolgt einen Mode, während die 20-mm-Änderung von 90 bis 1360 mm wandert. Diese V0-Einzelfälle stammen aus gespeicherten vollständigen FEM-Simulationen. Gestrichelte Hüllkurven interpolieren beobachtete positive/negative Extrema fornerhaltend, ohne Extrapolation. Es entstehen wechselnde Pitchrichtungen statt eines einfachen monotonen Verlaufs entlang der Trompete.

Ein größeres lokales q garantiert an einer Position keine größere vorzeichenbehaftete Pitchänderung. Die Wirkung hängt auch von Druck-/Flussverteilung und Gesamtwirkung über das endliche Intervall ab. Nahe einem Pitch-Node kann die Änderung klein sein, obwohl benachbarte Extrema deutliches Potential besitzen.

Positive und negative Extrema können als Hüllkurven des beobachteten Potentials verbunden werden. Diese interpolieren abgetastete Extrema; ein 10-mm-Raster beweist kein exaktes kontinuierliches Maximum. Viertelwellenregeln aus dem Zylinder geben Orientierung, aber keine universelle Amplitudenformel für die Trompete.

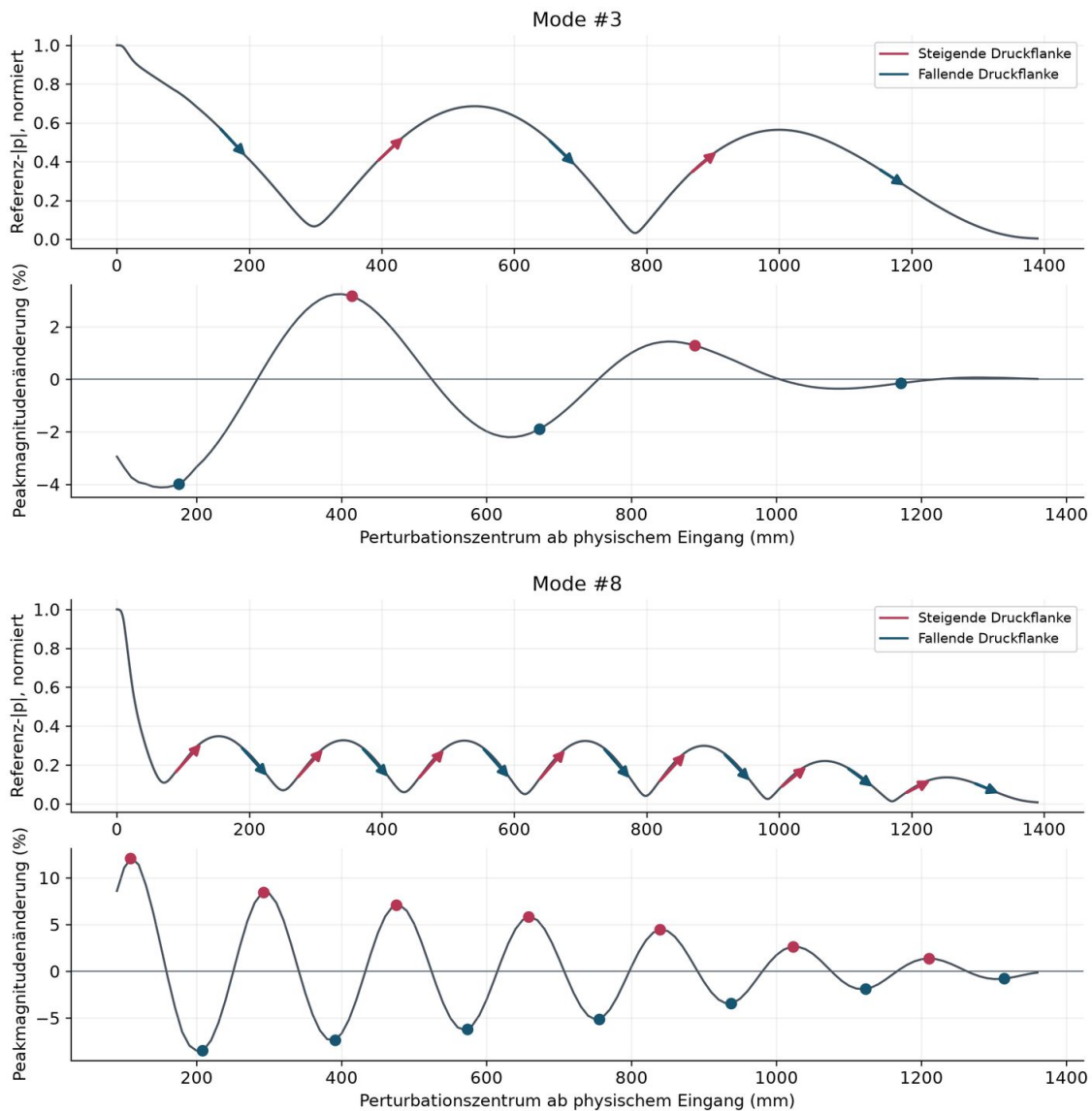
10 Einzelperturbationen: Magnitude und Spiralen



Die unteren Grafiken verbinden Pitch- und Magnitudenänderungen der Erweiterungen. Pfeile folgen zunehmender Zentrumposition. Gewundene Bahnen entstehen durch oszillierenden Pitch und positionsabhängiges Magnitudenpotential; ideale Spiralen werden nicht vorausgesetzt.

In diesen Fällen wird die Magnitudenwirkung zum offenen Ende schwächer. Mundstück, Mundrohr und Schallbecher verändern akustische Positionen; 50 % physische Länge ist deshalb keine universelle Pitch-Node-Vorschrift für eine Trompete.

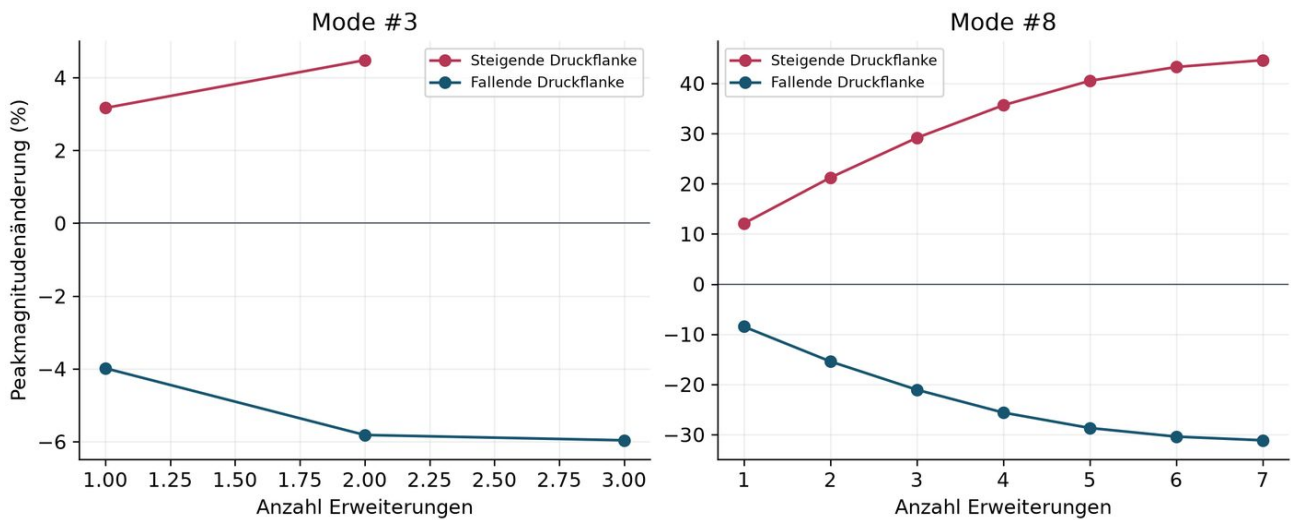
11 Pitch-Nodes: Die Druckflanke entscheidet



Oben je Paar: Referenz- $|p(x)|$ bei der Peakfrequenz des Modes. Rote/blau Pfeile zeigen die räumliche Flankenrichtung um das tatsächliche Einzel-Erweiterungszentrum, bei denselben Zentrumkoordinaten wie die markierten Magnitudenpunkte darunter; keine Druckknotenmarkierungen oder pauschalen Flankenmitten. Darunter: vollständige Magnitudenänderungskurve einzelner Erweiterungen, mit markierten tatsächlichen PNs. Steigend/fallend beschreibt die räumliche Änderung vom Eingang zum Becher, nicht Zeit oder Phase.

Steigende Flanke: Magnitude steigt. Fallende Flanke: Magnitude sinkt. Dieses Vorzeichenmuster trat an allen 92 getesteten einzelnen Enlargement-PNs außerhalb des Mundstücks über Modes #2–#10 auf. Gezeigt werden nur Modes #3 und #8.

12 Mehrere Erweiterungen: ausgewählte Gruppen



Mode	PN-Flankengruppe	Anzahl	Pitch (Cent)	Magnitude (%)
#3	Steigend	2	-0,003	+4,48
#3	Fallend	3	-0,006	-5,96
#3	Beide Gruppen gemeinsam	5	+0,010	-1,66
#8	Steigend	7	+0,126	+44,63
#8	Fallend	7	-0,036	-31,14
#8	Beide Gruppen gemeinsam	14	-0,017	+8,17

Die Kurven fügen gleichgerichtete Flankenstellen vom Eingang zum Becher hinzu. Stellen mit gleicher Magnitudenrichtung verstärken die Wirkung, während der Pitch des ausgewählten Modes fast erhalten bleibt. Es sind feste Referenzpositionen, keine nach jedem Schritt neu optimierte Folge.

Mode #8 ergibt getrennte Faktoren 1,446 und 0,689: rund +3,21 und -3,24 dB trotz ungleicher Prozentwerte. Ihr Produkt wäre -0,40 %, die tatsächliche gemeinsame Geometrie mit 14 Stellen ergibt aber +8,17 %. Nahezu reziproke Gruppenfaktoren sind keine Regel zum Kombinieren.

13 Mode #4: Einengungen kehren die Richtungen um

An denselben Referenzextrema kehren Einengungen die Pitch- und lokalen Abstandsrichtungen der Einzeländerungen um. Ihr Durchmesserversatz ist $-1,0$ mm über 20 mm. Untersucht wurden alle Einzel-, Zweier- und Dreierkombinationen innerhalb der drei Druckbäuche und innerhalb der drei Druckknoten.

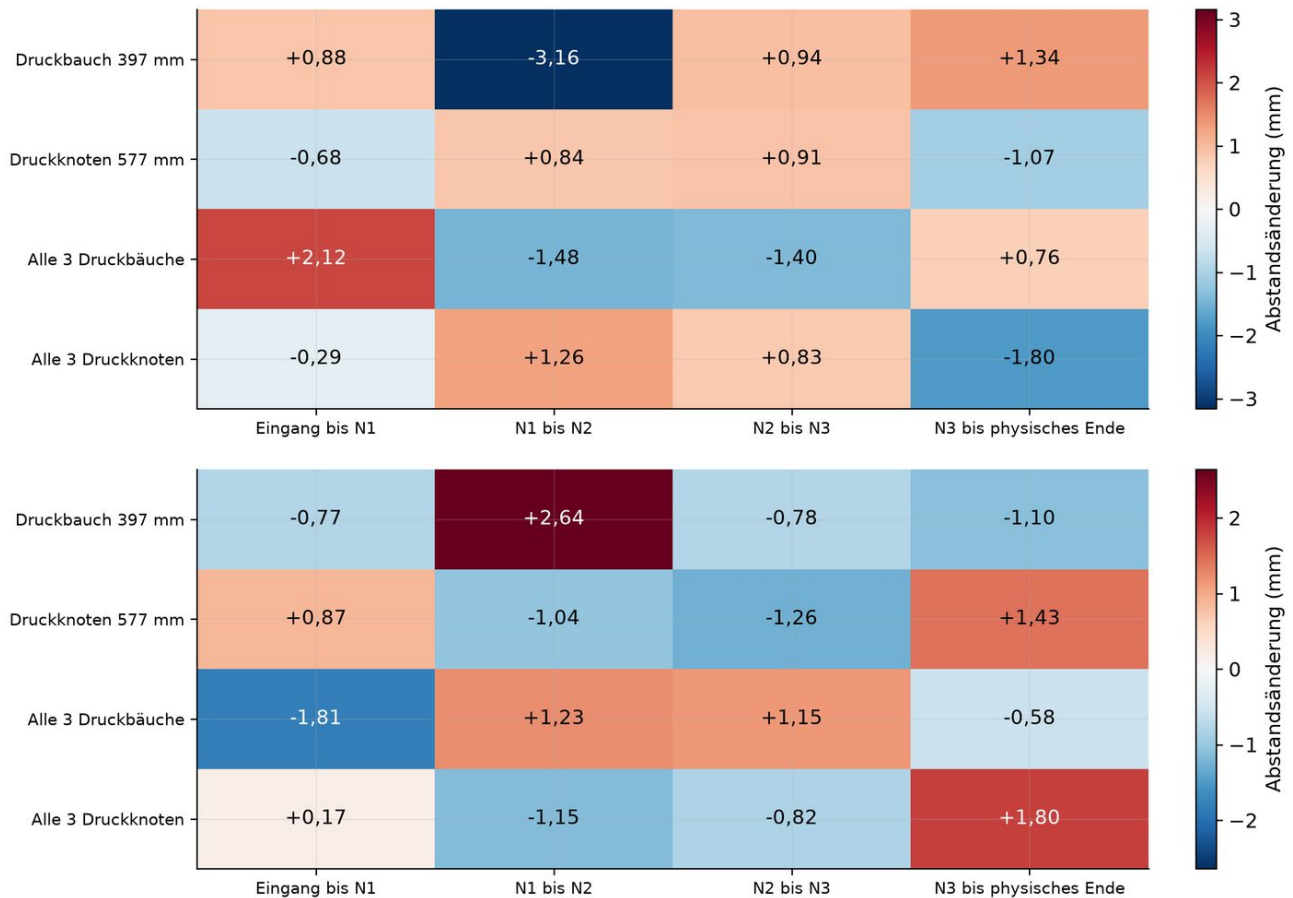
Einzeländerung	Erweiterung	Einengung
Am Druckbauch	Pitch tiefer; umgebendes Intervall kürzer; übrige Abschnitte länger.	Pitch höher; umgebendes Intervall länger; übrige Abschnitte kürzer.
Am Druckknoten	Pitch höher; beide angrenzenden Intervalle länger; entfernte Abschnitte kürzer.	Pitch tiefer; beide angrenzenden Intervalle kürzer; entfernte Abschnitte länger.

Gruppe	Erw. Cent	Eineng. Cent	Erw. Z %	Eineng. Z %
Alle 3 Druckbäuche	-13	+11	-1,00	+0,99
Alle 3 Druckknoten	+11	-15	+1,91	-2,60

Die Richtungen stimmen mit dem lokalen/globalen Gegenmuster überein; die Stärken sind keine exakten Spiegelbilder. Durchmesserversätze, nicht reziproke Verhältnisse außerhalb des 11 -mm-Bereichs, Verluste, Sprünge und endliche Geometrie bleiben im Modell. Dieser Vergleich allein ordnet die Asymmetrie keiner einzelnen Ursache zu.

Die Druckbauch-/Druckknotenauswahl betrifft einen Mode. Dieselbe physische Änderung beeinflusst auch andere; daraus folgt allein noch kein geschützter musikalischer Bereich.

14 Der Staumauer-Effekt: lokale und globale Umverteilung



Oben: Erweiterungen. Unten: Einengungen. Einträge sind Abstandsänderungen in Millimetern. Innere Referenzknoten: 218,07, 576,53, 949,58 mm. Die letzte Spalte endet am physischen Becherrand, nicht an einem angenommenen exakten Drucknullpunkt.

Eine Erweiterung am Druckbauch bei 397 mm verkürzt das umgebende Intervall um 3,16 mm, während andere Abschnitte länger werden. Die entsprechende Einengung verlängert es um 2,64 mm. Am mittleren Druckknoten verlängert die Erweiterung beide Nachbarintervalle; die Einengung verkürzt sie.

Bei mehreren Änderungen zeigt jedes Intervall die Nettobilanz. Alle drei Druckbauch-Erweiterungen vertiefen den Pitch, dennoch wird der letzte, ebenfalls perturbierte Abschnitt 0,76 mm länger. Die globale Frequenzverschiebung kann eine lokale Wirkung überwiegen. Der Staumauer-Effekt ist eine anschauliche Beschreibung, kein neues Erhaltungsgesetz und keine vollständige Pitchformel.

15 Mode #4: tatsächliche Pitch-Nodes und Magnitudenextrema

Ein Enlargement-PN ist nicht automatisch ein Constriction-PN. Die Zentren verschieben sich hier etwa 9–24 mm. An den alten Erweiterungs-Nullstellen erzeugen beide Einengungsgruppen zusätzlich eine kleine Pitchvertiefung. Tatsächliche Nullstellen trennen diesen Versatz von der Magnitudenwirkung.

Flanke	Erweiterungs-PN (mm)	Einengungs-PN (mm)
Fallend	130,1	106,4
Steigend	304,5	318,3
Fallend	496,0	482,4
Steigend	661,8	675,3
Fallend	858,8	843,9
Steigend	1025,7	1034,6
Fallend	1230,6	1217,4

Tatsächliche PN-Gruppe	Anzahl	Erweiterung Z %	Einengung Z %
Steigend	3	+8,02	-7,82
Fallend	4	-10,04	+12,47

Alle 127 nicht leeren Teilmengen der sieben Zentren wurden je Art an ihren eigenen Nullstellen geprüft.
 Erweiterungs-Extrema: +8,02 % mit drei steigenden Stellen, -10,04 % mit vier fallenden Stellen.
 Einengungs-Extrema: +12,47 % mit vier fallenden Stellen, -7,82 % mit drei steigenden Stellen.

Keine gleichgerichtete Stelle wurde ausgelassen. Die Extrema sind vollständig innerhalb sieben ausgewählter Nodes, aber keine globalen Optima über beliebige Positionen, Längen oder Stärken. Die ausgewählten vollständigen Flankengruppen halten Mode #4 innerhalb von 0,03 Cent zur Referenz.

16 Was geprüft ist - und was offen bleibt

Die Klammern geben Pitchfehler als Prozent der Frequenz und Magnitudenfehler als Prozent des Referenzpeaks an. Letzteres entspricht numerisch den Prozentpunkten (PP) von ΔM ; es ist kein relativer Fehler bezogen auf ΔM selbst.

Unabhängige FEM-Prüfserie	Fälle	Max. Pitchfehler (Cent)	Max. Magnitudenfehler (PP)
Frühere kombinierte Erweiterungstests	18	1.45e-05 (0,0000008368 % f)	5.90e-05 (0,00005896 % Zref)
Erweiterungs-Flankengruppen #3/#8	4	6.37e-06 (0,0000003679 % f)	4.66e-05 (0,00004661 % Zref)
Tatsächliche Einengungs-PN-Gruppen #4	2	3.70e-06 (0,0000002134 % f)	1.54e-05 (0,00001538 % Zref)

Die erste Serie enthält frühere Mundstückstellen; nicht alle 18 Fälle sind die hier gezeigten mundstückfreien Beispiele. Einengungsprüfungen verwenden zwei vollständig veränderte Geometrien in einem dichten FEM-Frequenzfenster um Mode #4. Knotenabstandsvergleiche nutzen direkte FEM-Felder am jeweiligen zugeordneten Peak.

Numerische Übereinstimmung prüft die Rechnung innerhalb eines Modells; sie ist keine experimentelle Genauigkeit. Beide Methoden teilen Annahmen zu Geometrie, Verlusten, Abstrahlung und Übergängen. Diese Mehrfachänderungen sind noch nicht durch neue kalibrierte Messungen an einer physischen Trompete validiert.

Vorzeichenmuster und Abstandsrichtungen sind für ausgewählte Fälle gestützt, aber keine universellen Gesetze für alle Geometrien und Stärken. Fast unveränderter Pitch verlangt keine feststehenden Druckknoten: Die Mode-4-PN-Gruppen zeigen kleine räumliche Verschiebungen.

Der Bereich lässt den Mundstückbeginn und letzten Becherrand aus. Bekannte Geometrie ist erforderlich; breitbandige Phasen-/IR-Genauigkeit und Inversion unbekannter Geometrien sind eigene Fragen. Halbwertsbreite und Resonanzgüte Q werden hier nicht bewertet.

17 Nächster Schritt: Optimierung des gemeinsamen Instruments

Die Ergebnisse liefern eine Kandidatenauswahl: Druckextrema für starke Pitcheffekte; PN-Flanken für vorwiegende Magnitudenwirkungen; danach gemeinsame komplexe Rechnung aller Wirkungen auf relevante Modes. Die Tests beschreiben Verhalten, noch kein bereits verbessertes Instrument.

1. Musikalische Ziele definieren. Vorhandene Excel-Ton-/Ventilzuordnungen, ET-Abweichungen und Gewichtungen verwenden. Pitchziele von Magnitudengrenzen trennen; das aktuelle Optimierungsinteresse bleibt auf Peaks unter 1500 Hz begrenzt.
2. Physische Wege verknüpfen. Eine gemeinsame Becheränderung muss alle betreffenden Ventilkombinationen beeinflussen. Dieselbe physische Stelle kann vor, innerhalb und nach dem Ventilstock unterschiedliche Pfadkoordinaten besitzen. Gespeicherte Vstart-/Vstop- und Valve-Path-Zuordnungen verwenden, keine pauschale V0-Verschiebung überall.
3. Gemeinsam suchen, dann prüfen. Mehrere kleine Änderungen untersuchen, Mode-/Ventil-Nebenwirkungen berechnen, vielversprechende Kandidaten mit Fertigungsgrenzen abgleichen und vollständige Geometrien mit FEM sowie später kalibrierten Messungen prüfen. V0, V2, V1 und V3 nach musikalischer Bedeutung priorisieren.

Projekt und Vorgeschichte

Diese PDF baut auf den bereits in den Brassissima-Videos vorgestellten Grundlagen auf. Videos 1–3 sollten daher als Einführung vor dieser Dokumentation angesehen werden.

[Brassissima-Projekt](#)

[Brassissima-YouTube-Kanal](#)

[Video 1: akustische Grundlagen](#)

[Video 2: Zylinder-Perturbationen](#)

[Video 3: Trompete und Transfermodell](#)

Datenstand: V0-Referenzgeometrie/-spektrum; erweiterte Einzelserie; Mehrfach-Erweiterungen und FEM-Prüfungen; Pitch-Flankengruppen; Mode-4-Abstände und Einengungsergebnisse. `source_manifest.json` enthält Quellpfade, Größen und SHA-256-Prüfsummen. Gespeicherte Daten haben Vorrang vor gerundeten Darstellungswerten.