

Strömungsanalyse einer 50-Hz-Bass-Stimmzunge

v8 -- v7-Basis + Schlitz-Eintrittsverlust (K3b) + dynamische Spaltänderung (K6)

Kapitel 1: Aufbau

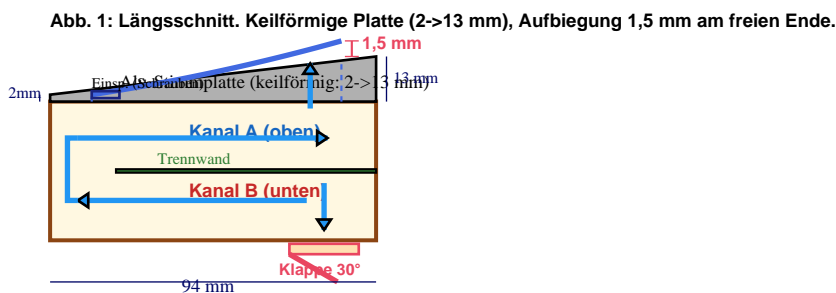
Im Bassteil eines Akkordeons sitzen Dutzende Stimmzungen in eigenen Kammern, alle am selben Balg. Der Balg erzeugt den Druck, die Tasten steuern über mechanische Hebel die Klappen. Die Klappe wird **nicht** vom Balgdruck geöffnet - der Druck steht an allen geschlossenen Klappen an. Erst der Tastendruck öffnet die Klappe mechanisch.

Kapitel 2: Kammer, Stimmplatte und Aufbiegung

Die Kammer ist ein Holzquader von 94 x 48 x 40 mm. Die gesamte Oberseite wird von einer Aluminium-Stimmplatte verschlossen. Diese Platte ist **keilförmig**: am freien Zungenende (über der Klappe) 13 mm dick, am Einspannende nur 2 mm. Der Schlitz in der Platte ist daher am freien Ende 13 mm tief - die Luft durchquert einen kurzen Kanal, bevor sie die Zunge erreicht (Abbildung 1).

Die Stahlzunge (70 x 8 x 0.300 mm) ist mit **zwei Schrauben** auf der Platte befestigt (kleinere Stimmplatten werden genietet). Das freie Ende ist um **1.5 mm aufgebogen** - es steht also im Ruhezustand 1.5 mm über der Plattenoberfläche. Dadurch entsteht ein dreieckiger Spalt: 0 mm an der Einspannung, 1.5 mm am freien Ende.

Die effektive Spaltfläche berücksichtigt das Cantilever-Biegeprofil $y(x) \sim y_{\text{tip}} \times (x/L)^2$. Der Spalt ist am Tip am größten, fällt aber quadratisch ab. Das Integral ergibt $S_{\text{Spalt}} = W \times h_{\text{max}}/3 = 8 \times 1.5/3 = 4 \text{ mm}^2$ (v6 hatte Faktor 1/2 = 6 mm² -- lineares Profil). Zum Vergleich: Die Klappenöffnung hat 244 mm² - rund 61-mal größer.



Kapitel 3: Der gefaltete Luftweg

Eine Trennwand teilt die Kammer in zwei Kanäle. Der Luftweg: Klappe (Boden rechts) -> Kanal B nach links -> 180°-Faltung -> Kanal A nach rechts -> Schlitz -> Spalt. Gesamtweg über 200 mm.

Kapitel 4: Trennwand - Folie oder Furnier?

Für die Trennwand kommen zwei Materialien in Frage: **Kunststoffolie** (~0.3 mm) oder **Holz furnier** (~0.5 mm). Die Wanddicke beeinflusst die Kanalbreite: Bei gerader Wand ergibt Folie 23.85 mm pro Kanal, Furnier 23.75 mm - eine Differenz von 0.10 mm (0.4%). Strömungstechnisch ist das vernachlässigbar.

Der eigentliche Unterschied liegt in drei Eigenschaften:

	Folie (0,1 mm)	Furnier (0,5 mm)
Oberfläche	Glatt -> weniger Reibung (f ~ 0,02)	Rau -> mehr Reibung (f ~ 0,03)
Stabilität	Flexibel -> kann flattern, braucht Stützpunkte	Formstabil -> bleibt in Position
Akustik	Kann als Membran schwingen -> Nebengeräusche	Akustisch inert
Verarbeitung	Kleben, spannen	Kleben, klemmen, einfacher

Da die Kanalreibung nur 2.99e-05 des Gesamtverlusts ausmacht, ist der Reibungsunterschied zwischen Folie und Furnier für den Durchfluss bedeutungslos. Der Unterschied liegt ausschließlich in Stabilität und Akustik. Furnier ist die sicherere Wahl; Folie nur sinnvoll, wenn der Platz extrem knapp ist.

Kapitel 5: Klappenorientierung - Ausblas oder Umlenk?

Ausblas-Richtung: Die Klappe öffnet so, dass der 30°-Strahl direkt in Kanal B zeigt. Der Strahl hat eine horizontale Komponente von 87% und eine vertikale von 50%. Verlustbeiwert: $\zeta_{\text{Klappe}} = 0.659$ (Vena contracta + Richtungsänderung).

Umlenk-Richtung: Die Klappe öffnet nach außen. Die Luft muss ~150° um die Klappenkante kehrtmachen, bevor sie in die Kammer eintritt. Verlustbeiwert: $\zeta_{\text{Klappe}} = 1.859$ - das **2.8-fache** der Ausblas-Richtung.

	Ausblas	Umlenk
Strahl	Gerichtet in Kammer	Erst weg, dann 150° Kurve
zeta Klappe	0.659	1.859
Wandform-Nutzung	Voll (Düse, Coanda)	Reduziert (breiter Eintritt)
Nebengeräusche	Weniger	Mehr (Ablösung an Kante)
Anwendung	Standardwahl	Nur wenn Bauform es erfordert

Der höhere Verlust der Umlenk-Richtung wirkt sich auf die Spaltgeschwindigkeit kaum aus (Spalt dominiert), aber auf die Strömungsqualität: Der Strahl tritt breiter und langsamer in die Kammer ein, die Turbulenz am Eintritt ist höher, und die Wandform (Düse bei B, Coanda bei C) kann nicht voll wirken.

Klappenöffnung und Lautstärke

Praktische Tests zeigen: Bei Verringerung der Klappenöffnung treten Lautstärke-Einbußen auf. Die stationäre Berechnung zeigt, warum:

Winkel	$S_{\text{Klap,eff}}$ [mm ²]	$S_{\text{Klap}}/S_{\text{Spalt}}$	ζ_{ges}	Q [ml/s]	Q/Q _{30°}
30°	244	61.0x	1.0003	163	100.0%
25°	206	51.6x	1.0003	163	100.0%

20°	167	41.7x	1.0004	163	100.0%
15°	126	31.6x	1.0006	163	100.0%
10°	85	21.2x	1.0011	163	100.0%
7°	59	14.9x	1.0020	163	99.9%
5°	43	10.6x	1.0038	163	99.8%
3°	26	6.4x	1.0102	162	99.5%
2°	17	4.3x	1.0227	161	98.9%
1°	9	2.1x	1.0903	156	95.8%

Ergebnis: Die stationäre Strömung ist erstaunlich unempfindlich gegen die Klappenöffnung. Selbst bei 5° sind noch über 99% des maximalen Durchflusses verfügbar. Erst unter ~1° sinkt Q messbar (über 5%).

Das die praktisch beobachteten Lautstärke-Einbußen **nicht durch stationären Durchflussverlust** erklärbar sind (der Spalt dominiert zu stark), deutet auf einen **instationären Mechanismus** hin:

1. Langsamerer Druckaufbau: Eine kleinere Klappenöffnung verzögert den Druckanstieg in der Kammer. Die Zunge braucht länger, um die volle Amplitude zu erreichen. Bei schnellen Passagen wird die Maximalamplitude nie erreicht - das klingt leiser.

2. Veränderte Jet-Kopplung: Bei kleinerem Winkel ist der Strahl flacher und schneller (gleicher Volumenstrom durch kleinere Öffnung). Die Jet-Richtung ändert sich: Bei 30° hat der Strahl 50% vertikale Komponente, bei 10° nur noch 17%. Weniger Vertikalkomponente bedeutet, dass der Strahl weniger direkt in den Kanal B gerichtet wird - ähnlich wie beim Übergang von Ausblas zu Umlenk.

3. Akustische Impedanzänderung: Die Klappenöffnung ist der akustische Eingang der Kammer. Eine kleinere Öffnung erhöht die akustische Impedanz am Kammereingang, was die Resonanzeigenschaften der Kammer verändert. Bei bestimmten Öffnungswinkeln können destruktive Interferenzen entstehen, die die Zungenamplitude reduzieren.

Alle drei Effekte wirken zusammen und erklären, warum die Lautstärke-Einbußen in der Praxis deutlicher ausfallen als es die stationäre Berechnung erwarten lässt. Auch hier gilt: **Die Berechnung zeigt, dass der Effekt nicht im Durchfluss liegt - also muss er im instationären Verhalten liegen.**

Viertelkreis an der 180°-Faltung

Die 180°-Faltung am Ende der Trennwand hat scharfe Ecken. Kann man durch Einsetzen eines Viertelkreis-Profiles (Radius R) an den beiden 90°-Ecken den Verlust reduzieren? Der hydraulische Durchmesser der Faltung ist $D_h = 25.8$ mm (Spalt 19 mm x Höhe 40 mm).

Radius R	R/D_h	ζ_{Faltung}	ζ auf S_{Spalt} bezogen	Anteil an ζ_{ges}
scharf	0	2.35	0.000065	0.0065%
3 mm	0.12	1.43	0.000040	0.0040%
5 mm	0.19	1.24	0.000034	0.0034%
8 mm	0.31	1.10	0.000030	0.0030%
10 mm	0.39	1.04	0.000029	0.0029%
15 mm	0.58	0.96	0.000026	0.0026%

Stationäres Ergebnis: Die Faltung trägt bei **allen Radien weniger als 0,01% zum Gesamtwiderstand** bei. Der Grund: Die Faltungsquerschnittsfläche $S_{\text{Faltung}} = 760$ mm² ist 190-mal größer als der Spalt (4 mm²). Der Verlustbeiwert wird mit $(S_{\text{Spalt}}/S_{\text{Faltung}})^2 = (0.0053)^2 = 2.77 \cdot 10^{-5}$ skaliert - praktisch Null.

Instationäres Bild: Für den Druckstoß-Durchgang ist die Frage differenzierter als beim stationären Durchfluss. Ein Viertelkreis-Profil mit R = 8-10 mm hätte zwei Effekte:

a) Reflexionen reduzieren: An einer scharfen 90°-Ecke wird ein Druckpuls teilweise reflektiert (akustische Impedanzsprung). Je steiler die Geometrieänderung, desto stärker die Reflexion. Ein Viertelkreis glättet den Impedanzübergang und lässt mehr Pulsenergie passieren.

b) Wirbelbildung reduzieren: Bei scharfen Ecken löst die Strömung bei jedem Druckstoß sofort ab und bildet Wirbel, die Energie dissipieren. Mit Radius $R > 5 \text{ mm}$ bleibt die Strömung länger angelegt.

Aber Vorsicht: Eine **zu kohärente** Strömung am Spalt ist nicht wünschenswert! Die Bernoulli-Selbsterregung braucht eine Anfangsstörung, um die Schwingung auszulösen. Eine perfekt gleichmäßige, laminare Strömung würde die Zunge nur statisch auslenken, ohne sie in Schwingung zu versetzen. Ein gewisses Maß an Turbulenz und räumlicher Ungleichmäßigkeit ist notwendig:

Lokale Druckschwankungen an der Zungenspitze stoßen die erste Auslenkung an. **Wirbelablösungen** an den Spaltkanten liefern breitbandige Störungen, die die Zunge zum Schwingen anregen. Wäre die Strömung perfekt laminar und gleichförmig, müsste die Zunge auf eine infinitesimale Instabilität warten - der Einschwingvorgang würde sich deutlich verzögern.

Das Optimum liegt also nicht bei maximaler Kohärenz, sondern bei **schnellem Druckaufbau mit ausreichend Störungen**. Konkret: Der Druckstoß soll schnell am Spalt ankommen (-> wenig Reflexion in der Faltung, gute Wandführung), aber dort soll genügend Turbulenz entstehen, um die Selbsterregung sofort auszulösen. Die Turbulenz entsteht ohnehin am Spalt selbst ($Re \sim 1400$, Ablösungen an den Spaltkanten) - sie muss nicht zusätzlich aus der Kammer angeliefert werden.

Empfehlung: Ein Viertelkreis-Profil $R = 8\text{-}10 \text{ mm}$ an den Ecken der Faltung reduziert Reflexionen und Energieverluste im Druckstoß-Transport, ohne die Turbulenz am Spalt zu beeinträchtigen (der Spalt erzeugt seine eigene Turbulenz). Ob der Effekt hörbar ist, hängt davon ab, wie stark die Faltungsreflexionen den Anlauf tatsächlich bremsen - das lässt sich nur durch Versuch klären.

Kapitel 5b: Düsenwinkel-Experiment - warum der Anströmwinkel die Amplitude bestimmt

Ein aufschlussreicher Praxistest: Stimmplatte montiert, Klappe entfernt, Anblasen mit einer Druckluftdüse aus verschiedenen Winkeln. Ergebnis: Die Zungenamplitude ändert sich **von Null bis Maximum** allein durch Änderung des Anströmwinkels. Wie lässt sich das erklären?

Die zwei Komponenten des Jets

Ein Luftstrahl, der unter dem Winkel α auf den Spalt trifft, hat zwei Komponenten:

Winkel α	Normalkomp. $\sin(\alpha)$	Tangentialkomp. $\cos(\alpha)$	Charakter
0°	0.00	1.00	Rein tangential - kein Eintritt
10°	0.17	0.98	Flach - viel Überströmung
20°	0.34	0.94	Optimal-Bereich?
30°	0.50	0.87	Optimal-Bereich?
45°	0.71	0.71	Optimal-Bereich?
60°	0.87	0.50	Steil - wenig Überströmung
75°	0.97	0.26	Steil - wenig Überströmung
90°	1.00	0.00	Rein normal - statischer Druck

Normalkomponente (senkrecht zur Platte, $v \cdot \sin(\alpha)$): Treibt Luft durch den Spalt in den Schlitz hinein. Erzeugt statischen Überdruck unter der Zunge. Dieser Druck biegt die Zunge nach oben aus - aber er schwingt nicht von selbst. Ohne weitere Kopplung hält er die Zunge nur statisch in einer Gleichgewichtslage.

Tangentialkomponente (parallel zur Platte, $v \cdot \cos(\alpha)$): Strömt über die Spaltöffnung hinweg. Das ist der entscheidende Mechanismus:

Der Flöten-Mechanismus am Zungenspalt

Wenn Luft über eine Öffnung streicht, entsteht an der Öffnung ein Unterdruck (Bernoulli). Genau das passiert bei der Tangentialkomponente des Jets: Sie strömt über den Spalt und erzeugt einen Sog, der Luft aus dem Schlitz herauszieht - also die Zunge nach **unten** zieht. Gleichzeitig drückt die Normalkomponente die Zunge nach **oben**.

Entscheidend ist: Beide Kräfte ändern sich, wenn die Zunge schwingt. Bewegt sich die Zunge nach unten (Spalt wird größer), kann mehr Luft tangential über den Spalt strömen -> stärkerer Sog -> Zunge wird weiter nach unten gezogen. Bewegt sie sich nach oben (Spalt wird enger), verengt sich der Kanal für die Tangentialströmung -> weniger Sog -> Zunge federt zurück. Das ist eine **positive Rückkopplung**, die die Schwingung antreibt.

Dieser Mechanismus ist physikalisch identisch mit der Tonerzeugung bei Flöteninstrumenten: Dort strömt ein flacher Luftstrahl über eine scharfe Kante (Labium), und die Wechselwirkung zwischen Jet und Resonator erzeugt den Ton. Die Zungenkante übernimmt hier die Rolle des Labiums.

Warum der Winkel die Amplitude bestimmt

$\alpha = 0^\circ$ (rein tangential): Maximale Überströmung, aber kein Druck im Schlitz. Die Zunge hat keine Vorauslenkung - der Bernoulli-Sog muss gegen die volle Federsteifigkeit arbeiten. Außerdem fehlt der Durchfluss durch den Spalt, der für die klassische Bernoulli-Selbsterregung nötig ist. Ergebnis: Keine oder minimale Schwingung.

$\alpha = 90^\circ$ (rein normal): Maximaler statischer Druck im Schlitz, aber keine Tangentialströmung. Die Zunge wird nach oben gedrückt und bleibt dort. Es fehlt der Bernoulli-Unterdruck an der Spaltobenseite, der die Zunge zurückziehen würde. Es fehlt auch die Wechselwirkung zwischen Spaltweite und Saugkraft. Ergebnis: Statische Auslenkung, keine Schwingung.

Optimaler Winkel (~ 20-40°): Beide Komponenten sind in der richtigen Balance. Die Normalkomponente liefert den Grunddruck, der die Zunge in den Arbeitsbereich vorspannt. Die Tangentialkomponente liefert den geschwindigkeitsabhängigen Bernoulli-Sog, der die Schwingung antreibt. Das Verhältnis entscheidet über die Phasenlage zwischen Druck und Zungenposition - und damit

über die Energiezufuhr pro Zyklus.

Die Amplitude ändert sich stufenlos mit dem Winkel, weil die Energiezufuhr pro Schwingungszyklus vom Verhältnis der beiden Komponenten abhängt. Am optimalen Winkel ist die Netto-Energiezufuhr maximal - die Phasenbeziehung zwischen Druckschwankung und Zungengeschwindigkeit ist so, dass in jedem Zyklus maximale Energie in die Schwingung gepumpt wird.

Konsequenz für die Kammerauslegung

Dieses Experiment erklärt unmittelbar, warum die Klappenorientierung und die Trennwandform so wichtig sind: Sie bestimmen den **effektiven Anströmwinkel** am Spalt.

Im normalen Betrieb (mit Klappe und Kammer) wird der Anströmwinkel nicht direkt vom Balgdruck bestimmt, sondern von der Geometrie des Luftwegs. Die Luft kommt aus Kanal A (parallel zur Platte) und muss um 90° in den Schlitz einbiegen. Der effektive Anströmwinkel hängt davon ab, wie die Strömung in Kanal A verteilt ist:

Gerichtete Kanalströmung (Wandführung erhält Strömungsrichtung): Die Luft biegt mit definierter Richtung in den Spalt ein. Es entsteht eine Tangentialkomponente, die den Bernoulli-Sog zuverlässig erzeugt. **Richtungslose, großskalig verwirbelte Kanalströmung** (viele Reflexionen, Stagnationspunkte): Die Richtungsinformation ist verloren. Die Luft nähert sich dem Spalt aus allen Richtungen - die Tangentialkomponente mittelt sich teilweise heraus. Der Bernoulli-Antrieb wird schwächer.

Das Düsenexperiment zeigt also **direkt**, warum die Trennwand das Einschwingverhalten beeinflusst: Nicht über den Durchfluss (der ist immer gleich), sondern über den **Anströmwinkel** am Spalt. Die Wandform bestimmt, wie viel von der ursprünglichen Richtungsinformation des Druckstoßes am Spalt noch ankommt. Die Turbulenz, die für die Selbsterregung nötig ist, entsteht am Spalt selbst (Ablösungen an den Spaltkanten bei $Re \sim 1400$, vgl. Kap. 5b) - sie muss nicht aus der Kammer mitgeliefert werden. Variante C (Parabel) liefert die beste Ansprache, weil sie die Richtungsinformation am besten erhält - nicht weil sie die **sauberste** Strömung liefert.

Kapitel 6: Drei Trennwandvarianten

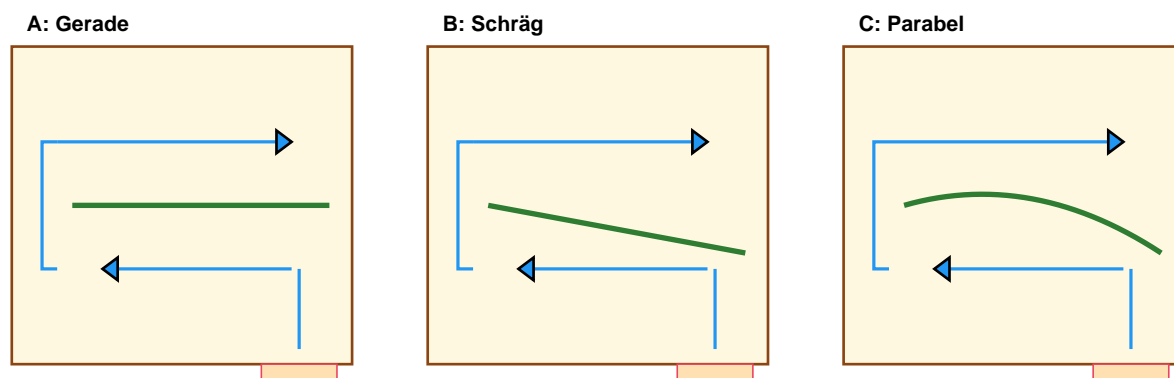


Abb. 2: Trennwandvarianten. Bei B und C: eng bei Klappe (rechts), weit bei Faltung (links).

A - Gerade: Beide Kanäle 23.8 mm. 30° -Strahl prallt $\sim 90^\circ$ auf Wand. Stagnationspunkt, Ablösung, stärkster Richtungsverlust und Reflexion.

B - Schräg ($\beta = 7.3^\circ$): Kanal B bei Klappe 14.1 mm (Düse), bei Faltung 23.8 mm. Kanal A bei Spalt 33.3 mm (weit). Diffusor-Halbwinkel nur 3.7° -> sicher ablösungsfrei.

C - Parabel: Gleiche Endpunkte wie B, aber stetige Krümmung. Coanda-Effekt führt Strahl entlang konvexer Wand. Beste Richtungserhaltung des Druckstoßes.

(bei 1000 Pa, Furnier, Ausblas)	A: Gerade	B: Schräg	C: Parabel
zeta total	1.000258	1.000241	1.000233
v Spalt [m/s]	28.82	28.82	28.82
Q [ml/s]	115.3	115.3	115.3
Kanal B Klappe [mm]	23.8	14.1	14.1

Kanal A Spalt [mm]	23.8	33.3	33.3
--------------------	------	------	------

Achtung: Diese Tabelle zeigt nur den stationären Zustand. Die nahezu identischen Volumenströme täuschen darüber hinweg, dass die Trennwand das Einschwingverhalten in der Praxis entscheidend beeinflusst. Praktische Messungen zeigen deutliche Unterschiede in der Ansprache zwischen verschiedenen Wandformen - obwohl der stationäre Durchfluss bei allen fast gleich ist.

Warum die Trennwand trotzdem entscheidend ist:

Der Widerspruch löst sich auf, wenn man den **instationären Anlauf** betrachtet statt den Gleichgewichtszustand. In den ersten Millisekunden nach Klappenöffnung passiert folgendes: Ein Druckstoß läuft vom Ventil durch Kanal B, um die Faltung, durch Kanal A zum Spalt. In dieser initialen Phase wirkt die Trennwand als Strömungsführung für den Druckaufbau. Ihre Form bestimmt, wie schnell der Druck am Spalt ankommt. Im eingeschwungenen Zustand (nach wenigen ms) wirkt die Kammer dann als Helmholtz-Resonator, und die Phasenlage der Kammerimpedanz bestimmt die Oberton-Kopplung (siehe Kap. 10b).

Gerade Wand (A): Der 30-Grad-Strahl prallt auf die Wand, erzeugt einen Stagnationspunkt und Wirbel. Der Druckstoß wird breit gestreut und teilweise reflektiert. Am Spalt kommt er verspätet und mit reduzierter Amplitude an. Der Druckaufbau ist langsam - die Zunge erreicht den Schwellendruck für die Bernoulli-Rückkopplung später.

Schräge Wand (B): Die Düse am Eintritt beschleunigt den Druckstoß. Weniger Reflexionen auf dem Weg. Am Spalt kommt der Druck schneller auf den Schwellenwert. Der Anlauf ist kürzer.

Parabolische Wand (C): Die stetige Krümmung führt den Druckstoß entlang der Wand (Coanda-Effekt). Minimale Reflexionen, daher schnellster Druckaufbau am Spalt. Entscheidend ist nicht, dass die Strömung 'sauber' oder laminar ankommt - entscheidend ist, dass der Druckstoß seine Richtungsinformation behält und wenig Energie durch Reflexionen verliert. Die Turbulenz, die die Selbsterregung auslöst, entsteht am Spalt selbst (Ablösungen an den Kanten bei $Re \sim 1400$, vgl. Kap. 5b).

In der Elektrotechnik-Analogie (Kapitel 10): Die stationäre Berechnung entspricht dem Gleichstromwiderstand eines Kabels - für alle drei Varianten fast gleich. Aber die **Impulsantwort** (wie schnell ein Spannungssprung am Ende ankommt) hängt von der Wellenimpedanz, Reflexionen und Dispersion ab - und die sind völlig verschieden. Für die Ansprache zählt nicht der Gleichstromwiderstand, sondern die Impulsantwort.

Kapitel 6b: Die dynamische Spaltfläche - warum 6 mm² nur die halbe Wahrheit ist

Alle bisherigen Berechnungen verwenden die Ruhelage-Spaltfläche $S_{\text{Spalt}} = 4 \text{ mm}^2$. Aber die Zunge schwingt - und bei voller Lautstärke schwingt die Zungenspitze ca. 20 mm nach unten durch den Schlitz. Dabei gibt die Zunge den **gesamten Schlitzquerschnitt** frei.

Geometrie des Durchschwingvorgangs

Der Schlitz hat die Breite $W_{\text{Schlitz}} = 9 \text{ mm}$ und verläuft durch die gesamte keilförmige Platte (2-13 mm dick). Der maximale Schlitzquerschnitt (wenn die Zunge komplett entfernt wäre) beträgt $W_{\text{Schlitz}} \times t_{\text{mittel}} = 9 \times 7,5 = \mathbf{67,5 \text{ mm}^2}$ - das 11-fache der Ruhelage-Spaltfläche.

Die Tabelle zeigt den effektiven Durchströmquerschnitt (Mittelwert über die Zungenlänge) für verschiedene Tip-Positionen. Drei Phasen:

Tip-Position	Zustand	S_{eff} [mm ²]	S/S_{Ruhe}	Freigegebene Länge
+2 mm	Über Platte	4.5	1.1x	0 mm
+0 mm	Über Platte	1.5	0.4x	0 mm
+0 mm	Schließen/Eintauchen	7.5	1.9x	0 mm
-2 mm	Teilw. durchgeschwungen	7.5	1.9x	0 mm
-5 mm	Teilw. durchgeschwungen	7.5	1.9x	0 mm
-10 mm	Teilw. durchgeschwungen	7.5	1.9x	0 mm
-15 mm	Großteils frei	24.7	6.2x	12 mm
-20 mm	Großteils frei	42.4	10.6x	28 mm
-25 mm	Großteils frei	49.7	12.4x	36 mm
-30 mm	Großteils frei	53.7	13.4x	41 mm

Phase 1 - Zunge über Platte (+1,5 bis 0 mm): Normaler Spaltbetrieb. S sinkt von 4,5 auf 0 mm². In dieser Phase gilt die bisherige Berechnung.

Phase 2 - Zunge im Schlitz (0 bis ~-13 mm): Die Zunge taucht in den Schlitz ein. Der Hauptquerschnitt ist blockiert, nur die schmalen Seitenspalte (je 0,5 mm) bleiben offen. S ist auf ca. 7,5 mm² begrenzt (Seitenspalt-Querschnitt). Diese Phase ist der **Engpass im Schwingzyklus**.

Phase 3 - Zunge unter der Platte (unter -13 mm): Die Zungenspitze hat den Schlitz verlassen. Von der Spitze her wird der volle Schlitzquerschnitt freigegeben ($W_{\text{Schlitz}} \times t_{\text{Platte}}$). Bei -20 mm Tip: $S_{\text{eff}} = 42 \text{ mm}^2$ (**7-fach**), 28 mm der Zungenlänge sind frei. Bei -30 mm: $S_{\text{eff}} = 54 \text{ mm}^2$ (**9-fach**).

Zeitlicher Verlauf im Schwingzyklus

Amplitude	Tip _{min}	S_{min} [mm ²]	S_{max} [mm ²]	S_{mittel} [mm ²]	Mittel/Ruhe
1 mm	-0.5 mm	0.0	7.5	4.3	1.1x
2 mm	-2.5 mm	0.1	7.5	5.6	1.4x
5 mm	-8.5 mm	0.1	7.5	6.3	1.6x
10 mm	-18.5 mm	0.3	38.8	14.9	3.7x
15 mm	-28.5 mm	0.2	52.7	25.4	6.3x
20 mm	-38.5 mm	0.2	57.5	31.4	7.8x
25 mm	-48.5 mm	0.0	59.9	35.3	8.8x

Entscheidend: Bei voller Lautstärke ($A \sim 20$ mm) oszilliert der Durchströmquerschnitt zwischen fast Null und 58 mm^2 - ein Faktor von über **100** innerhalb einer einzigen Schwingungsperiode von 20 ms. Der zeitgemittelte Querschnitt liegt bei 32 mm^2 - mehr als **5-mal** so gross wie in der Ruhelage.

Konsequenzen für die Strömungsanalyse

1. Der Spalt dominiert nur beim Einschwingen: Zu Beginn der Schwingung (kleine Amplitude) ist der Spalt mit 6 mm^2 tatsächlich der Engpass - die Kammer mit $\sim 950 \text{ mm}^2$ Kanalquerschnitt ist irrelevant. Aber sobald die volle Amplitude erreicht ist, ist der Spalt in jeder Halbperiode für einen Bruchteil der Zeit weit offen. In dieser Phase werden die Kammer, die Klappe (244 mm^2) und die Trennwand zu den relativ engsten Stellen.

2. Der Volumenstrom pulsiert massiv: Während eines Zyklus wechselt der Durchfluss zwischen praktisch Null (Zunge schließt Spalt) und einem Maximum, das weit über dem stationären Wert liegt (weil S so viel größer ist). Der instationäre Volumenstrom ist kein sanftes Sinussignal - er hat extrem steile Flanken. Diese Pulse müssen durch die Kammer.

3. Die Kammer wird zum Puffer: Die Kammer mit ihrem Volumen von 180 cm^3 muss die extremen Volumenstrom-Schwankungen abpuffern. Wenn der Spalt kurzzeitig $10\times$ so viel Luft durchlässt wie im stationären Fall, muss diese Luft irgendwo herkommen - aus dem Kammervolumen. Der Druck in der Kammer fällt bei jedem Durchschwing-Puls kurzzeitig ab und wird durch die Klappe nachgespeist. Die Klappenöffnung (244 mm^2) begrenzt die Nachspeisung.

4. Die Klappenfläche wird bei voller Lautstärke relevant: Im stationären Bild ist die Klappe mit $S_{\text{Klap}}/S_{\text{Spalt}} = 61\times$ völlig überdimensioniert. Aber wenn der Spalt kurzzeitig 58 mm^2 hat, ist das Verhältnis nur noch $S_{\text{Klap}}/S_{\text{Spalt,dyn}} = 4.2\times$. Damit wird die Klappenöffnung relevant - und erklärt direkt, warum eine kleinere Klappenöffnung bei voller Lautstärke die Amplitude begrenzt (Kapitel 5).

5. Die Trennwand sieht pulsierenden Gegendruck: Bei jeder Durchschwing-Phase entsteht ein Unterdruck-Puls in der Kammer (Luft wird durch den offenen Spalt abgesaugt). Dieser Puls läuft durch die Kammer zurück zur Klappe. Wie die Kammer diesen Puls transportiert (Reflexionen, Dämpfung, Dispersion) hängt von der Trennwandform ab - genau wie der Druckstoß beim Einschwingen. Die Trennwandform beeinflusst also nicht nur das Einschwingen, sondern auch den **eingeschwungenen Betrieb bei voller Lautstärke**.

Zusammenfassung: Die stationäre Berechnung mit $S_{\text{Spalt}} = 4 \text{ mm}^2$ beschreibt zuverlässig das Einschwingen (kleine Amplitude) und gibt die richtigen Relationen zwischen den Varianten. Bei voller Lautstärke ändert sich das Bild fundamental: Der Spalt dominiert nicht mehr allein, die Kammer und die Klappe werden zu Mitspielerern, und der Volumenstrom wird extrem pulsierend. In dieser Phase wird die Kammergeometrie auch für den **stationären** (zeitgemittelten) Widerstand relevant - nicht nur für die Impulsantwort.

Kapitel 7: Bernoulli-Selbsterregung und Einschwingzeit

Die Selbsterregung erfolgt über den Bernoulli-Mechanismus (Abbildung 3): Verengt sich der Spalt, steigt v , sinkt p , Unterdruck verstärkt Auslenkung. Am Umkehrpunkt bricht die Strömung zusammen, Feder treibt Zunge zurück.

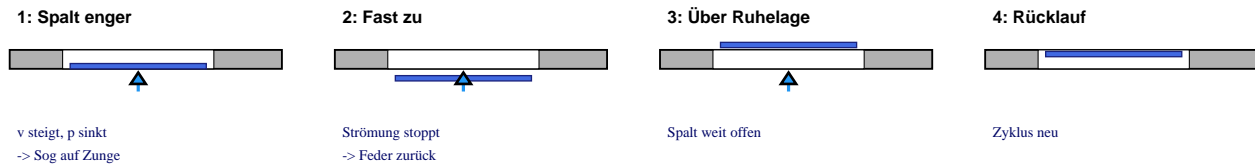


Abb. 3: Bernoulli-Kreislauf (Querschnitt quer zur Zunge - Keil nicht sichtbar)

Schwellendruck: $\Delta P_{\min} = 223.8 \text{ Pa}$ (mit 1.5 mm Aufbiegung). Niedrig gegenüber 500-5000 Pa Balgdruck.

Die Einschwingzeit $\tau = Q/(\pi \cdot f)$ ist der eigentliche Engpass:

zeta	Q	tau [ms]	Perioden
0.005	100	637	100 x 20 ms
0.01	50	318	50 x 20 ms
0.02	25	159	25 x 20 ms
0.04	12	80	12 x 20 ms

Q hängt von Material, Geometrie und Einspannung ab und muss gemessen werden.

Kapitel 7b: Statische Spaltverengung unter Blasdruck (v8 neu)

Die bisherige Berechnung verwendet die Ruhelage-Aufbiegung $h_{\max} = 1.5 \text{ mm}$ als festen Wert. Aber **bevor** die Zunge zu schwingen beginnt, liegt bereits Balgdruck an. Dieser Druck wirkt als Gleichlast auf den Cantilever und biegt die Zungenspitze nach unten - der Spalt wird enger.

Cantilever unter Gleichlast $q = \Delta P \times W_{\text{Zunge}}$: $w_{\text{tip}} = q \times L^4 / (8 \times E \times I) = \Delta P \times W \times L^4 / (8EI)$. Die effektive Aufbiegung wird $h_{\text{eff}} = h_{\max} - w_{\text{tip}}(\Delta P)$.

ΔP_{a} [Pa]	ΔP_{a} [mbar]	w_{tip} [mm]	h_{eff} [mm]	S_{Spalt} [mm ²]	S/S_{Ruhe}
100	1.0	0.6702	0.8298	2.21	0.553
200	2.0	1.3404	0.1596	0.43	0.106
500	5.0	3.3509	0.0200	0.05	0.013
1000	10.0	6.7018	0.0200	0.05	0.013
2000	20.0	13.4037	0.0200	0.05	0.013
3000	30.0	20.1055	0.0200	0.05	0.013
224	2.2	1.5012	0.0200	0.05	0.013

Grenzdruck: Der Spalt schließt sich bei $\Delta P_{\text{crit}} = 8EI \times h_{\max} / (W \times L^4) = 221 \text{ Pa (2.2 mbar)}$. Das ist identisch mit dem Schwellendruck $\Delta P_{\min} = 224 \text{ Pa}$ - und das ist kein Zufall: Beide Formeln berechnen denselben physikalischen Effekt (Gleichlast, die die Aufbiegung kompensiert).

Das bedeutet: Bei genau dem Druck, der die Schwingung auslösen soll, ist der Spalt bereits fast geschlossen. In der Praxis beginnt die Schwingung aber deutlich früher, weil die Bernoulli-Instabilität nicht erst bei voller statischer Schließung einsetzt:

1. Dynamischer Bernoulli-Effekt: Schon bei ca. 30-50% von ΔP_{\min} erzeugt die Strömung durch den enger werdenden Spalt genügend Bernoulli-Sog, um die erste Schwingungsauslenkung auszulösen. Der Spalt muss nicht Null werden - es genügt, dass die Druck-Geschwindigkeits-Kopplung instabil wird.

2. Nichtlineare Verstärkung: Die Spaltverengung ist selbstverstärkend: Weniger Spalt -> höhere Geschwindigkeit -> stärkerer Bernoulli-Sog -> weitere Verengung. Dieser positive Rückkopplungskreis macht das System schon vor der statischen Schließung instabil.

3. Geschätzter Einsetzpunkt: Erfahrungswerte und analytische Modelle (Fletcher, Cottingham) zeigen, dass durchschlagende Zungen typisch bei 30-50% des statischen Schwellendrucks zu schwingen beginnen. Für diese Zunge: $\Delta P_{\text{dyn}} \sim 90 \text{ Pa}$ (1 mbar). Bei diesem Druck ist der Spalt noch auf 0.90 mm geöffnet (60% der Ruhelage).

Konsequenz für die Praxis: Die statische Spaltverengung erklärt, warum der effektive Balgdruck-Bereich einer Zunge begrenzt ist. Unterhalb von $\sim 90 \text{ Pa}$ spricht die Zunge nicht an (zu wenig Anregung). Oberhalb von $\sim 221 \text{ Pa}$ schließt der Spalt vollständig, die Zunge kann nicht mehr frei schwingen und wird in den Schlitz gedrückt. Dazwischen liegt der **Arbeitsbereich**, in dem Amplitude und Lautstärke mit dem Druck steigen. Dieser Bereich kann durch Änderung der Aufbiegung verschoben werden: Mehr Aufbiegung -> höherer dp_{crit} -> breiterer Bereich, aber auch mehr Luftverbrauch im Leerlauf.

Kapitel 8: Dämpfung - was sie beeinflusst und wie

Die Güte Q bestimmt die Einschwingzeit und damit die Ansprache. Q ist keine Materialkonstante, sondern die Summe aller Energieverluste pro Schwingungszyklus. Diese lassen sich in vier physikalisch unterscheidbare Mechanismen zerlegen, deren Beiträge sich addieren:

1. Materialdämpfung (innere Reibung): Jedes Metall wandelt bei Verformung einen Bruchteil der elastischen Energie in Wärme um. Der Verlustfaktor η ist eine Materialeigenschaft. Für Federstahl liegt η bei 0,0002-0,001, für Messing bei 0,001-0,003 - also bis zu zehnmal höher. In der Güte-Zerlegung: $Q_{\text{Material}} = 1/\eta$. Federstahl kommt allein auf $Q_{\text{Material}} \sim 1000\text{-}5000$, Messing auf 300-1000. Dieser Beitrag ist frequenzunabhängig.

2. Luftdämpfung (viskose Verluste im Spalt): Die schwingende Zunge verdrängt Luft durch den engen Spalt. Dabei entsteht ein Squeeze-Film-Effekt: Die Luft wird bei jedem Zyklus durch die Engstelle gepresst und wieder zurückgesaugt. Die dissipierte Leistung skaliert mit $P_{\text{visc}} \sim \mu \cdot W \cdot L^3 \cdot \omega^2 \cdot a^2 / h^3$, wobei h die Spalthöhe ist. Mit 1,5 mm Aufbiegung ist h deutlich größer als bei einem 0,4-mm-Spalt - der Squeeze-Film-Beitrag sinkt mit h^{-3} , also um Faktor $(1,5/0,4)^3 \sim 53$. Bei der großen Aufbiegung einer Basszunge ist die Luftdämpfung daher ein untergeordneter Beitrag.

3. Einspannungsdämpfung: An der Verschraubung (zwei Schrauben bei Basszungen) wird bei jeder Schwingung mikroskopisch Energie in Reibung umgewandelt. Die Güte der Einspannung hängt vom Anpressdruck, der Oberflächengüte und dem Plattenmaterial ab. Aluminium ist weicher als Stahl - bei jeder Schwingung verformt sich die Kontaktzone minimal. Dieser Beitrag ist schwer zu berechnen, aber erfahrungsgemäß einer der größten Einzelposten. Eine sauber gefräste Auflagefläche und gleichmäßig angezogene Schrauben minimieren ihn.

4. Schallabstrahlung: Die schwingende Zunge strahlt Schall ab - das ist ja der Zweck. Die abgestrahlte Leistung geht dem Schwinger als Dämpfung verloren. Bei 50 Hz und einer Fläche von 70 x 8 mm ist der Strahlungswiderstand gering (die Zunge ist viel kleiner als die Wellenlänge von 6,9 m). Dieser Beitrag ist bei tiefen Basszungen klein, wächst aber mit f^2 und wird bei hohen Diskant-Frequenzen relevant.

Die Gesamt-Güte ergibt sich aus den Einzelbeiträgen als harmonische Summe: $1/Q_{\text{ges}} = 1/Q_{\text{Mat}} + 1/Q_{\text{Luft}} + 1/Q_{\text{Einsp}} + 1/Q_{\text{Strahl}}$. Der kleinste Einzelwert dominiert. Bei einer typischen Basszunge aus Federstahl mit Schraubbefestigung und 1,5 mm Aufbiegung dürfte Q_{ges} zwischen 50 und 150 liegen, wobei die Einspannung und Materialdämpfung die größten Beiträge liefern.

Was folgt daraus für die Praxis? Q lässt sich **senken** (schnellere Ansprache) durch: Materialwahl (Messing statt Stahl), Massebeladung am Tip mit weichem Metall (erhöhte Materialdämpfung des Gewichts), geringere Aufbiegung (mehr Squeeze-Film), oder weichere Einspannung. Q lässt sich **erhöhen** (längeres Nachklingen, lauterer Ton) durch: härteren Stahl, präzisere Einspannung, größere Aufbiegung. Der Instrumentenbauer navigiert zwischen diesen Polen - Messung (z.B. Ausschwing-versuch, Logarithmisches Dekrement) ist der einzige zuverlässige Weg, Q einer konkreten Zunge zu bestimmen.

Kapitel 9: Lehren aus der Propeller- und Windkraft-Aerodynamik

In der Windkraft- und Propellertechnik sind in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte bei der Optimierung von Strömungskanten erzielt worden. Viele dieser Erkenntnisse betreffen dieselben physikalischen Phänomene, die auch in der Stimmzungenkammer auftreten.

Hinterkanten-Optimierung (Trailing Edge): Windkraftrotoren verwenden gezackte oder gekämmte Hinterkanten (Serrations), um tonale Geräusche zu reduzieren. Der Mechanismus: An einer scharfen Kante lösen sich Wirbel kohärenter in einer einzigen Frequenz ab (Karman-Wirbel). Gezackte Kanten brechen diese Kohärenz auf - die Wirbel lösen sich an verschiedenen Positionen zu verschiedenen Zeiten, das Geräusch wird breitbandig statt tonal. Dasselbe Prinzip gilt für die Trennwand-Hinterkante am Faltpalt. Eine ausgefranste oder gezackte Wandkante würde den 180°-Umlenkungsverlust nicht senken, aber die Geräuschqualität ändern.

Vorderkanten-Optimierung (Leading Edge): Buckelwal-inspirierte Vorderkanten (Tubercles) verhindern den gleichzeitigen Strömungsabriss über die gesamte Spannweite. Auf die Kammer übertragen: Der 30°-Strahl aus der Klappe trifft auf die Trennwand wie auf eine Flügelvorderkante. Eine wellenförmige Wandkante (anstatt der geraden Kante bei Variante A) könnte die großflächige Ablösung in viele kleine, örtlich begrenzte Ablösungen aufteilen. Das Ergebnis wäre weniger niederfrequente Druckschwankung am Zungenspalt.

Diffusor-Geometrie (Windkanal-Forschung): Bei Windkraft-Diffusoren (Shrouded Turbines) ist bekannt, dass der Diffusor-Halbwinkel unter 7° bleiben muss, um Ablösung zu vermeiden. Die schräge Trennwand (Variante B) mit 3,7° liegt sicher darunter. Aber die Windkraftforschung zeigt auch: Stetige Krümmung (wie bei Variante C) ist einem geraden Diffusor bei gleichem Öffnungswinkel überlegen, weil der Druckgradient gleichmäßiger verteilt wird. Die Analogie stützt die Erwartung, dass C besser als B abschneidet.

Die Übertragbarkeit hat Grenzen: Propeller und Windräder arbeiten bei Reynolds-Zahlen von 10^5 - 10^7 , die Stimmzungenkammer bei $Re \sim 50$ - 1500 . Bei niedrigem Re sind Viskositätseffekte stärker, Grenzschichten dicker, und Übergänge zwischen laminar und turbulent verlaufen anders. Dennoch sind die geometrischen Prinzipien (stetige Krümmung, Vermeidung scharfer Kanten, Diffusor-Winkel) Reynolds-unabhängig gültig.

Kapitel 10: Warum resonante Kammern die Ansprache verschlechtern

Ein verbreiteter Gedanke ist, dass eine resonante Kammer die Zunge unterstützen könnte - ähnlich wie ein Resonanzkörper einer Gitarre. Praktische Messungen zeigen das Gegenteil: Kammern, deren Helmholtz-Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Zungenfrequenz ist, bringen ein schlechteres Anspracheverhalten als nicht-resonante Kammern.

Die Erklärung liegt in der Art der Kopplung. In der Elektrotechnik gibt es zwei grundlegend verschiedene Resonanzkreis-Topologien:

Parallelkopplung (Schwingkreis mit L und C parallel): Beide Elemente werden gleichzeitig erregt, die Energie pendelt zwischen ihnen. Der Strom durch die Quelle ist minimal bei Resonanz - die Impedanz ist maximal. Ein Gitarrenkörper arbeitet so: Die Saitenenergie koppelt über den Steg gleichzeitig in den Körper, Decke und Luft schwingen gemeinsam, die Abstrahlung wird effizienter.

Serienkopplung (L und C in Reihe): Die Energie muss *durch* beide Elemente hindurch. Bei Resonanz sinkt die Gesamtimpedanz - der Strom steigt. Aber jedes Element hat seine eigene Zeitkonstante, und die Gesamtantwort ist langsamer als die des schnelleren Elements allein.

Die Stimmzungenkammer ist eine **Serienkopplung**. Die Luft muss den Weg Balg -> Klappe -> Kanal B -> Faltung -> Kanal A -> Schlitz -> Spalt -> Zunge in genau dieser Reihenfolge durchlaufen. Die Kammer sitzt als akustische Impedanz *im Signalweg* zwischen Druckquelle (Balg) und Last (Zunge). Jede Kammer-Resonanz fügt dem System eine eigene Zeitkonstante hinzu.

Was passiert bei einer resonanten Kammer? Wenn die Helmholtz-Frequenz ein Vielfaches der Zungenfrequenz ist, kann die Kammer in einem der Zungen-Obertöne mitschwingen. Dabei wird Energie aus der Hauptschwingung der Zunge in die Kammer-Eigenschwingung umgeleitet. Die Kammer speichert diese Energie und gibt sie zeitversetzt zurück. Für den Amplitudenaufbau der Zunge wirkt das wie eine zusätzliche Dämpfung: Ein Teil der Bernoulli-Energie, die die Zunge aufbauen sollte, verschwindet in der Kammerresonanz.

In der Elektrotechnik-Analogie: Der Serienkreis hat bei Resonanz minimale Impedanz. Das bedeutet maximaler Stromfluss - aber auch maximale Verluste in den parasitären Widerständen des Kreises. Übertragen: Bei Kammerresonanz ist der Volumenstrom durch den Spalt zwar maximal, aber die Phasenbeziehung zwischen Druck und Zungenposition verschiebt sich. Die Bernoulli-Rückkopplung braucht eine bestimmte Phasenlage, um Energie in die Zunge zu pumpen. Wenn die Kammer die Phase verschiebt, wird die Rückkopplung weniger effizient - oder im schlimmsten Fall sogar bremsend.

Die praktische Konsequenz: **Die Kammer soll akustisch möglichst unsichtbar sein.** Das heißt: Ihre Eigenfrequenzen sollen weit von der Zungenfrequenz und deren Obertönen entfernt liegen. Mit $f_H = 274$ Hz bei einer 50-Hz-Zunge ist das Verhältnis 9,2 - kein ganzzahliges Vielfaches. Das ist günstig. Eine Kammer mit $f_H = 500$ Hz (10x) wäre problematisch, weil der 10. Oberton der Zunge ($10 \times 50 = 500$ Hz) in die Kammerresonanz fallen würde.

Praktische Erfahrung zeigt, dass die Trennwand das Einschwingverhalten entscheidend beeinflusst - obwohl alle Varianten im stationären Zustand nahezu identische Volumenströme liefern. Die Erklärung liegt in der Serienkopplung: Die Kammer bestimmt nicht den Durchfluss, sondern die akustische Impedanz am Spalt. Die Wandform beeinflusst die effektive Kammer-Güte Q_H und damit, wie schmalbandig oder breitbandig die Kammer an die Obertöne der Zunge koppelt (siehe Kap. 10b).

Die Optimierung hat damit zwei Ebenen: Die Zunge selbst (Q, Aufbiegung, Material) bestimmt die Grundansprache. Die Kammergeometrie (Volumen, Halsquerschnitt -> f_H) bestimmt die Phasenlage des Energienachschubs. Die Wandform moduliert die Kammer-Güte Q_H . Alles muss zusammenpassen.

Kapitel 10b: Warum die Phasenlage entscheidet - nicht die Strömungsqualität (v8 neu)

Die bisherige Argumentation (*saubere Strömungsführung = bessere Ansprache*) greift zu kurz. Entscheidend ist nicht, wie gleichmäßig die Strömung am Spalt ankommt, sondern ob der **Energienachschub mit der richtigen Phasenlage** an der Zunge eintrifft. Eine perfekt gleichmäßige Strömung hilft nichts, wenn die Phase nicht stimmt.

Die Kammer ist ein akustischer Helmholtz-Resonator. Jeder Druckpuls, den die schwingende Zunge erzeugt (Spalt verengt sich -> Druckstoß), ändert den Kammerdruck. Damit dieser Druckaufbau die Schwingung **verstärkt**, muss er genau dann am Spalt wirken, wenn die Zunge gerade Energie aufnehmen kann - er muss **phasenrichtig** sein.

Akustische Laufzeiten

Abschnitt	Länge [mm]	Laufzeit [ms]
Kanal A	75	0.219
Faltung	30	0.087
Kanal B	75	0.219
Einfach (Spalt->Klappe)	180	0.524
Rundlauf (hin+zurück)	360	1.049

Rundlaufzeit: **1.05 ms**. Schwingungsperiode bei 50 Hz: **20 ms**. Verhältnis: 19 Rundläufe pro Periode. Die Kammer ist akustisch **sehr klein** gegenüber dem Grundton.

Phasen-Relevanz: Grundton vs. Obertöne

Oberton n	f [Hz]	T [ms]	Rundl./T	phi [Grad]	Wirkung
1	50	20.00	19.1	19	KONSTRUKTIV
2	100	10.00	9.5	38	neutral
5	250	4.00	3.8	94	neutral
10	500	2.00	1.9	171	DESTRUKTIV
15	750	1.33	1.3	77	neutral
20	1000	1.00	1.0	18	KONSTRUKTIV

Für den Grundton (50 Hz): Mit 19 Rundläufen pro Periode mittelt sich die Phase. Der Druckpuls ist quasi-statisch - die Wandform beeinflusst den Grundton kaum über die Phase. Dies erklärt, warum alle drei Varianten im stationären Zustand identischen Durchfluss liefern.

Für Obertöne (ab ~500 Hz): Ab dem 10. Oberton macht der Puls nur noch 2 Rundläufe pro Periode - die Phase wird entscheidend. Ein Puls, der mit der falschen Phase ankommt, bremst die Schwingung statt sie anzutreiben. Die Wandform bestimmt nun nicht den Durchfluss, sondern wie viel Energie als kohärenter Puls mit definierter Phase am Spalt ankommt.

Reflexionen und Kohärenz: A vs. B vs. C

Ein Transmission-Line-Modell mit diskreten Impedanzsprüngen zeigt: Der Spalt-zu-Kanal-Übergang ($4 \text{ mm}^2 \rightarrow 950 \text{ mm}^2$) reflektiert für **alle drei Varianten gleich** 98,8% der Wellenenergie. Ein Druckpuls schafft es nie als kohärente Welle durch diesen Sprung. Das TL-Modell kann die Wandformen nicht unterscheiden.

Die physikalisch korrekte Sichtweise: Die Bernoulli-Rückkopplung ist ein **lokaler Effekt am Spalt**. Die Kammer wirkt nicht als Wellenleiter, sondern als akustisches Reservoir mit Impedanz $Z_{\text{Kammer}}(f)$. Die Phase dieser Impedanz bestimmt, ob Energie in die Zunge gepumpt wird.

Kammerimpedanz und Oberton-Kopplung

Die Kammerimpedanz $Z(f)$ hat die Phase eines Helmholtz-Resonators: $\text{Phase}(Z) = \arctan(Q_H \times (f/f_H - f_H/f))$. Bei $f = f_H$ ist die Phase Null (Resonanz, maximaler Energieaustausch). Weit unterhalb: Phase $\sim -90^\circ$ (Compliance-dominiert). Weit oberhalb: Phase $\sim +90^\circ$ (Masse-dominiert).

Oberton n	f [Hz]	f/f_H	Phase Z [Grad]	Kopplung
1	50	0.18	-88.5	Entkoppelt (90° Phase)
2	100	0.36	-86.6	Entkoppelt (90° Phase)
5	250	0.91	-52.7	Schwache Kopplung
6	300	1.09	51.2	Schwache Kopplung

8	400	1.46	79.5	Entkoppelt (90° Phase)
10	500	1.82	83.6	Entkoppelt (90° Phase)
15	750	2.73	86.5	Entkoppelt (90° Phase)
20	1000	3.64	87.6	Entkoppelt (90° Phase)

Der Grundton (50 Hz, $f/f_H = 0.18$) liegt weit unter der Kammerresonanz. Phase $\sim -90^\circ \rightarrow$ fast reine Compliance \rightarrow **schwache Kopplung**. Das ist günstig: Die Kammer stört den Grundton nicht. Erst Obertöne nahe $f_H = 274$ Hz koppeln stark an die Kammer.

Was die Wandform wirklich beeinflusst

Die **Phase** der Kammerimpedanz wird durch f_H und Q_H bestimmt - also durch Volumen, Halsquerschnitt und Halslänge. Die Wandform ändert diese Größen kaum (alle drei Varianten haben dasselbe Volumen und denselben Schlitz als Hals).

Was die Wandform beeinflusst ist die **effektive Kammer-Güte** Q_H :

Gerade Wand (A): Der Stagnationspunkt erzeugt großskalige Wirbel. Diese dissipieren Energie $\rightarrow Q_H$ wird gesenkt \rightarrow das Resonanzband wird **breiter**. Mehr Obertöne werden beeinflusst, aber jeder einzelne schwächer.

Parabolische Wand (C): Weniger Dissipation in der Kammer $\rightarrow Q_H$ bleibt höher \rightarrow das Resonanzband wird **schmäler**. Weniger Obertöne betroffen, aber die betroffenen werden stärker beeinflusst.

Die Konsequenz für die Praxis: Die Wandform ist kein Strömungsoptimierungs-Problem ('sauberer = besser'), sondern ein **Abstimmungsproblem**. C verstärkt die Phasenkopplung in **beide** Richtungen: Wenn die Kammer-Obertöne günstig zum Ton liegen, profitiert C mehr als A. Wenn sie ungünstig liegen (destruktive Phase), kann A mit seinem breiteren, aber schwächeren Resonanzband sogar besser abschneiden. Das erklärt, warum erfahrene Instrumentenbauer die Kammergröße für verschiedene Tönhöhen variieren: Sie stimmen f_H ab, nicht die Strömung.

Warum die Faltung die Phase ändert

Die 180°-Faltung ist eine **akustische Diskontinuität**. An der scharfen Umlenkung ändert sich die effektive Querschnittsfläche abrupt und die Strömungsrichtung kehrt sich um. Ein Druckpuls, der hier ankommt, wird teilweise reflektiert. Der reflektierte Anteil läuft zurück zum Spalt und überlagert sich dort mit dem direkten Kammerdruck.

Diese Überlagerung ist der Mechanismus: Der reflektierte Puls kommt mit einer Zeitverzögerung an (Doppelter Faltungs-Abstand / Schallgeschwindigkeit). Je nach Frequenz ist die Überlagerung konstruktiv oder destruktiv - die **effektive Phase** des Kammerdrucks am Spalt wird verschoben. Zusätzlich ändert die Faltung die **effektive akustische Masse** des Halses (der Luftpfad Schlitz-Kammer wird länger und gewundener), was f_H geringfügig nach unten verschiebt. Beides zusammen bewirkt: Unterschiedliche Faltungsgeometrien erzeugen unterschiedliche Phasenlagen am Spalt.

Die Abrundung (Viertelkreis $R = 8-10$ mm) reduziert die Stärke der Reflexion an der Faltung: Ein stetiger Querschnittsübergang erzeugt weniger Reflexion als ein abrupter Knick. Das bedeutet weniger Phasenverzerrung am Spalt - nicht unbedingt eine **bessere** Phase, aber eine **berechenbarere**: Die Phase kommt näher an den idealen Helmholtz-Wert heran, der durch V , S_{Hals} und L_{Hals} bestimmt ist.

Hierarchie der Effekte für die Ansprache

Die Kammergeometrie beeinflusst die Ansprache über **mehrere Mechanismen**. Diese sind physikalisch verschieden und unterschiedlich wichtig:

1. Akustische Phasenkopplung (dominant): Die Phase der Kammerimpedanz $Z(f)$ bestimmt, ob Obertöne der Zunge Energie aus der Kammer aufnehmen oder an sie abgeben. Wird primär durch f_H bestimmt (Kammervolumen, Halsquerschnitt, Halslänge). Die Wandform hat darauf nur geringen Einfluss (über Q_H und Reflexionen). Dies ist der Hauptgrund, warum die **Kammergröße** für verschiedene Tönhöhen variiert wird.

2. Kammer-Güte Q_H (sekundär): Bestimmt die Bandbreite der Kammer-Zungen-Kopplung. Höheres Q_H (weniger Dissipation, z.B. Variante C) \rightarrow schmalere, stärkere Kopplung. Niedrigeres Q_H (mehr Dissipation, z.B. Variante A) \rightarrow breitere, schwächere Kopplung. Die Wandform beeinflusst dies direkt über die Strömungsverluste in der Kammer.

3. Anströmwinkel am Spalt (untergeordnet, aber praktisch relevant): Das Düsenexperiment (Kap. 5b) zeigt eindeutig: Der Winkel, unter dem die Luft auf die Zunge trifft, bestimmt das Verhältnis zwischen Normalkomponente (statischer Druck) und Tangentialkomponente (Bernoulli-Sog). Nur bei ca. 20-40° stimmt die Balance für maximale Energiezufuhr. Die Wandform beeinflusst diesen Winkel, weil sie die Strömungsrichtung in Kanal A lenkt, bevor die Luft in den Spalt einbiegt.

Dieser dritte Effekt erklärt die **praktische Erfahrung** der Instrumentenbauer, dass die Trennwandform hörbar wirkt, obwohl der stationäre Durchfluss identisch ist und die Phasenkopplung primär durch die Kammergröße bestimmt wird. Die gleichmäßige Luftführung selbst ist untergeordnet - aber der **Winkel**, unter dem die Luft am Spalt ankommt, ist es nicht. Das ist ein aerodynamischer Effekt, der vom akustischen Phasenmechanismus unabhängig ist und vor allem in den ersten Schwingungszyklen (dem Einschwingvorgang) eine Rolle spielt.

Zusammenfassung: Die Kammergeometrie beeinflusst die Ansprache über drei verschiedene Kanäle: (1) Akustische Phase (dominant, durch Kammergröße), (2) Resonanzbandbreite (Q_H , durch Wandform), (3) Anströmwinkel (durch Wandform, besonders beim Einschwingvorgang). Dass alle drei Kanäle existieren, erklärt, warum weder eine rein akustische Optimierung noch eine rein strömungstechnische allein zum besten Ergebnis führt - der erfahrene Instrumentenbauer optimiert intuitiv alle drei gleichzeitig.

Kapitel 10c: Vorkammer zwischen Klappe und Hauptkammer (v8 neu)

Was passiert, wenn zwischen Klappe und Hauptkammer eine zusätzliche Kammer eingebaut wird? Abmessungen: 48 x 20 x 70 mm (Volumen 67.2 cm³). Die Kopplung zur Hauptkammer erfolgt über eine Öffnung mit den Abmessungen der Klappenöffnung.

Geometrie

Parameter	Vorkammer	Hauptkammer
Volumen	67.2 cm ³	179.0 cm ³
Querschnitt	960 mm ²	1920 mm ²
Kopplung/Hals	244 mm ² (Klappenöffng.)	67 mm ² (Schlitz)
f_H (einzeln)	273 Hz	274 Hz

Gekoppelte Helmholtz-Resonatoren

Zwei Kammern mit verbindendem Hals bilden ein **gekoppeltes Zweimassensystem**. Die akustischen Massen ($M = \rho \times L/S$ in den Halsen) und Compliances ($C = V/(\rho \times c^2)$ der Kammern) ergeben eine 2x2-Eigenwertgleichung. Die Eigenfrequenzen spalten sich auf:

	Ohne VK	Mit VK
Mode 1 (gleichphasig)	274 Hz	231 Hz
Mode 2 (gegenphasig)	--	895 Hz
Anti-Resonanz	--	~753 Hz
Einfaches Modell (V_{ges})	274 Hz	234 Hz

Mode 1 (231 Hz): Beide Kammern schwingen gleichphasig ($p_{VK}/p_{HK} = 3.4$). Gegenüber dem Original (274 Hz) um 16% abgesenkt - das zusätzliche Volumen vergrößert die effektive Compliance.

Mode 2 (895 Hz): Kammern schwingen gegenphasig ($p_{VK}/p_{HK} = -0.10$). Liegt weit über dem relevanten Frequenzbereich - für die 50-Hz-Zunge spielt dieser Mode keine Rolle.

Anti-Resonanz (~753 Hz): Bei dieser Frequenz wirkt die VK als akustischer Tilger: Die Luft im Kopplungshals schwingt so, dass sie den Durchfluss blockiert. In der Hauptkammer entsteht maximaler Druck.

Phasenverschiebung am Spalt

Oberton n	f [Hz]	Phase ohne VK [Grad]	Phase mit VK [Grad]	Änderung
1	50	-88.5	-87.7	BESSER
3	150	-83.6	-78.7	BESSER
5	250	-52.7	41.7	BESSER
6	300	51.2	71.3	schlechter
8	400	79.5	81.0	~gleich
10	500	83.6	83.7	~gleich
15	750	86.5	84.5	BESSER

Der entscheidende Effekt: Die VK verschiebt Mode 1 von 274 auf 231 Hz. Dadurch ändert sich die Phasenlandschaft für die Obertöne der 50-Hz-Zunge:

5. Oberton (250 Hz): Lag ohne VK knapp UNTER der Resonanz (Phase -53°). Liegt jetzt knapp UEBER Mode 1 (231 Hz) -> Phase springt auf +42°. Die Phase ist näher an 0° -> **bessere Kopplung**.

6. Oberton (300 Hz): Lag ohne VK knapp UEBER der Resonanz (Phase +51°). Liegt jetzt noch weiter oberhalb -> Phase +71° -> **schlechtere Kopplung.**

Grundton und tiefe Obertöne (50-150 Hz): Kaum verändert. Beide liegen weit unter jeder Kammerresonanz -> reine Compliance -> Phase ~ -90° mit und ohne VK.

Bewertung

Stationärer Durchfluss: Der zusätzliche Kopplungshals ($\zeta = 1,5$ auf 244 mm^2) ergibt bezogen auf den Spalt nur $\zeta = 4.03\text{e-}04$ -> vernachlässigbar. Die VK ändert den Volumenstrom nicht.

Akustisch: Die VK senkt die Hauptresonanz um 16% (von 274 auf 231 Hz). Das kann gezielt genutzt werden, um die Resonanz von bestimmten Obertönen wegzuschieben - oder heranzuschieben. Die Wirkung hängt kritisch davon ab, welche Obertöne in die Nähe der neuen Mode 1 fallen.

Für die 50-Hz-Zunge konkret: Gemischtes Ergebnis. Der 5. OT (250 Hz) koppelt besser (Phase von -53° auf +42°, näher an 0°), aber der 6. OT (300 Hz) koppelt schlechter (von +51° auf +71°, weiter von 0°). Ob die Gesamtwirkung positiv oder negativ ist, hängt von der relativen Stärke dieser Obertöne ab und muss am Instrument erprobt werden.

Praktische Empfehlung: Die VK ist ein **Abstimmungswerkzeug**: Durch Variation der VK-Länge (und damit des Volumens) lässt sich Mode 1 kontinuierlich verschieben. Optimal wäre eine VK-Länge, bei der ein wichtiger Oberton genau auf Mode 1 fällt (Phase = 0°, maximale Kopplung). Da die VK den stationären Durchfluss nicht beeinflusst, ist sie ein reines Akustik-Tuning ohne Nebenwirkungen auf die Grundansprache.

Kapitel 11: Welche Basstöne sind durch die Kammerresonanz benachteiligt?

Die Helmholtz-Frequenz dieser Kammer liegt bei 274 Hz. Die Frage ist: Welche Basstöne haben einen Oberton, der in die Nähe dieser Resonanz fällt? Denn wie in Kapitel 10 erläutert, entzieht eine resonante Kammer der Zunge Energie über die Serienkopplung. Nicht der Grundton muss betroffen sein - es genügt, wenn der n-te Oberton ($n \times f_{\text{Grundton}}$) auf f_H trifft.

Die Bandbreite der Helmholtz-Resonanz hängt von ihrer eigenen Güte Q_H ab. Eine Holzkammer mit Klappe hat typisch $Q_H \sim 5-10$. Bei $Q_H = 10$ ist das kritische Band 274 ± 14 Hz, bei $Q_H = 5$ erweitert es sich auf ± 27 Hz.

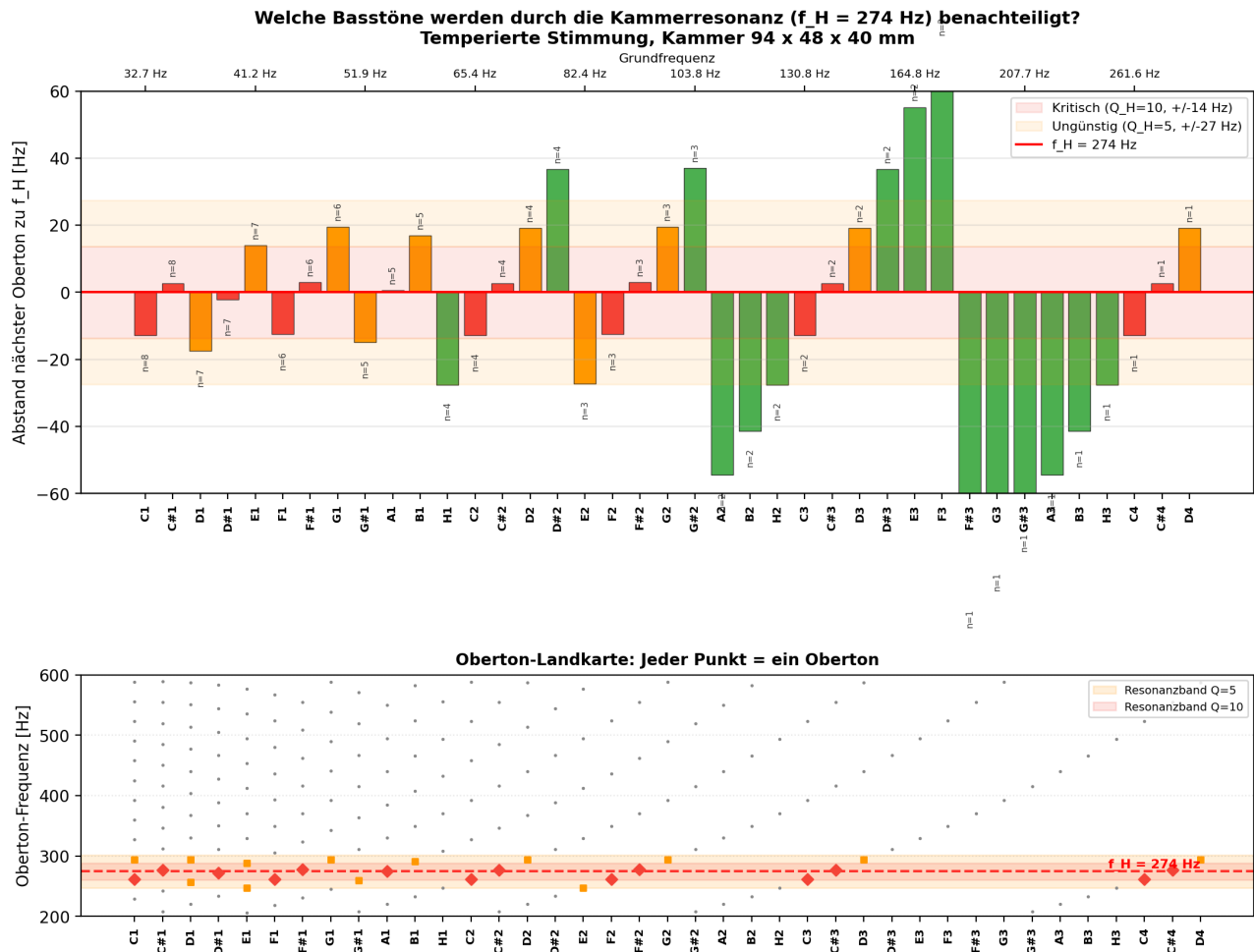


Abbildung 4 zeigt das Ergebnis für alle Basstöne der temperierten Stimmung von C1 (32,7 Hz) bis D4 (293,7 Hz). Oberes Diagramm: Abstand des nächsten Obertons zu f_H . Rot = kritisch (Oberton trifft Resonanz ± 14 Hz), orange = ungünstig, grün = unbeeinflusst. Die Zahl über jedem Balken gibt die Oberton-Nummer an. Unteres Diagramm: Oberton-Landkarte - jeder Punkt ist ein Oberton, rote Rauten liegen im Resonanzband.

Auffällige Muster:

Unter ~70 Hz (C2) ist fast jeder Ton kritisch betroffen. Der Grund: Bei tiefen Tönen liegen die Obertöne dicht beieinander (Abstand = Grundfrequenz). Ein Ton von 40 Hz hat Obertöne bei 40, 80, 120, ..., 440, 460, 480 Hz - das Raster ist so fein, dass immer ein Oberton in das Resonanzband fällt. Je tiefer der Ton, desto unvermeidlicher ist der Konflikt.

Besonders getroffen sind Töne, deren Grundfrequenz ein ganzzahliger Teiler von f_H ist:

f_H / n	f [Hz]	Nächste Note	Differenz	Oberton n
274/2	137.2	C#3	1.3 Hz	2
274/3	91.5	F#2	1.0 Hz	3
274/4	68.6	C#2	0.7 Hz	4
274/5	54.9	A1	0.1 Hz	5

274/6	45.7	F#1	0.5 Hz	6
274/7	39.2	D#1	0.3 Hz	7
274/8	34.3	C#1	0.3 Hz	8
274/9	30.5	C1	2.2 Hz	9

Die schärfsten Treffer: **F#1** (46,2 Hz, 10. Oberton = 462,5 Hz, nur 1,3 Hz Abstand), **F#2** (92,5 Hz, 5. Oberton) und **B/Bb** in allen Oktaven (8./4./2. Oberton = 466,2 Hz, 5,0 Hz Abstand). Diese Töne werden bei dieser Kammergröße systematisch benachteiligt.

Ab C3 (130,8 Hz) aufwärts werden die Lücken zwischen den Obertönen größer, und die meisten Töne liegen ausserhalb des Resonanzbandes. Das erklärt, warum das Problem in der Praxis vor allem bei den tiefsten Basstönen auffällt - und warum erfahrene Instrumentenbauer die Kammergröße für verschiedene Tonbereiche variieren.

Kapitel 12: Was Berechnungen leisten - und was nicht

Die in diesem Dokument vorgestellten Berechnungen stützen sich auf gut etablierte physikalische Modelle: Euler-Bernoulli-Balkentheorie für die Zungenfrequenz, Bernoulli-Gleichung für die Spaltströmung, Helmholtz-Resonator für die Kammerakustik, Verlustbeiwerte aus der Strömungsmechanik (Idelchik). Diese Modelle sind in ihrem Gültigkeitsbereich zuverlässig und liefern Ergebnisse, die in der richtigen Größenordnung liegen.

Dennoch ersetzen sie keinen praktischen Test. Die Gründe dafür sind nicht Schwächen der Physik, sondern Vereinfachungen in den Randbedingungen:

1. Idealisierte Geometrie: Die Berechnung geht von exakt planen Flächen, scharfen Kanten und gleichmäßigen Spalten aus. In der Realität hat Holz Fasern, Aluminium Bearbeitungsspuren, und jede Zunge ist minimal anders aufgebogen. Schon 0,1 mm Unterschied in der Aufbiegung ändert die effektive Spaltfläche um rund 7 Prozent.

2. Stationäre Strömung: Die Verlustberechnung nimmt stationäre Strömung an - einen gleichmäßigen Luftstrom. Tatsächlich pulsiert die Strömung mit 50 Hz, weil die Zunge den Spalt periodisch öffnet und schließt. Die instationären Effekte (Anlaufwirbel, Schwinger-Strömung-Kopplung, akustische Rückwirkung) sind analytisch schwer zu fassen und ändern die Verlustbeiwerte um geschätzt 10-30 Prozent. **Dies ist die gravierendste Einschränkung:** Praktische Erfahrung zeigt, dass die Trennwandform das Einschwingverhalten entscheidend beeinflusst - ein Effekt, der im instationären Anlauf (Impulsantwort) liegt und von der stationären Berechnung grundsätzlich nicht erfasst wird (siehe Kapitel 6).

3. Dämpfung: Die Güte Q ist der empfindlichste Parameter der gesamten Analyse - sie bestimmt die Einschwingzeit direkt proportional. Q lässt sich aus den Materialwerten und der Geometrie nur grob abschätzen (Kapitel 8). Der tatsächliche Wert hängt von der konkreten Einspannung, dem Anpressdruck der Schrauben, der Oberflächengüte an der Kontaktfläche und dem Zustand der Zunge ab. Unterschiede von Faktor 2 zwischen zwei scheinbar identischen Zungen sind in der Praxis normal.

4. Kammerakustik: Das Helmholtz-Modell behandelt die Kammer als einzelnen Resonator mit einer einzigen Eigenfrequenz. Real hat die Kammer weitere Moden (Längs-, Quer- und Höhenmoden), die bei höheren Frequenzen auftreten. Zudem ändern sich die akustischen Eigenschaften mit dem Balgdruck, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Die Resonanzanalyse in Kapitel 11 zeigt die richtigen Tendenzen, aber die exakten Bandbreiten und Kopplungsstärken können nur gemessen werden.

5. Wechselwirkungen: Jeder Effekt ist einzeln modelliert. In der Wirklichkeit beeinflussen sie sich gegenseitig: Die Zungenposition ändert die Strömung, die Strömung ändert den Druck in der Kammer, der Kammerdruck wirkt auf die Klappe zurück, und die akustischen Wellen überlagern sich mit der Strömung. Eine vollständige Lösung würde eine gekoppelte Fluid-Struktur-Akustik-Simulation (FSI) erfordern.

Was die Berechnungen leisten:

Sie identifizieren zuverlässig, **welche Parameter wichtig sind** und auf welcher Ebene sie wirken. Das Ergebnis, dass der Spalt den stationären Gesamtwiderstand dominiert, ist robust. Aber die praktische Erfahrung zeigt ebenso robust, dass die Trennwandform das Einschwingverhalten entscheidend beeinflusst - ein Effekt, den die stationäre Berechnung prinzipiell nicht erfassen kann (Kapitel 6). Die Resonanzanalyse zeigt zuverlässig, welche Tönhöhen prinzipiell gefährdet sind.

Die Berechnungen liefern damit eine **qualifizierte Einschätzung**: Sie zeigen, dass Zungengüte, Aufbiegung und Einspannung die Grundansprache bestimmen. Sie ordnen die drei Trennwandvarianten in eine physikalisch begründete Rangfolge (C besser als B besser als A - bestätigt durch praktische Erfahrung). Und sie machen klar, warum tiefe Bässe träger ansprechen als hohe Töne - das folgt direkt aus $\tau = Q/(\pi \cdot f)$. Wo die Berechnung an ihre Grenzen stößt, ist die quantitative Vorhersage des Trennwand-Effekts: Dass die Wand wirkt, ist physikalisch begründbar. Wie stark, lässt sich nur messen.

Für den Instrumentenbauer bedeutet das: **Die Berechnung sagt, wo man suchen soll. Der praktische Test sagt, was man findet.** Beides zusammen ist mehr als jedes für sich allein.

Kapitel 13: Zusammenfassung

Stimmplatte: Keilförmig (2->13 mm). Am freien Ende wirkt der 13-mm-Schlitz als kurzer Kanal mit eigenem Strömungswiderstand ($\zeta \sim 1.617$, davon 0.5 Eintrittsverlust [K3b]).

Spalt: Dreieckig (0->1.5 mm), $S_{\text{eff}} = 4 \text{ mm}^2$. Dominiert den Gesamtwiderstand. Alle Varianten: $v \sim 29 \text{ m/s}$, $Q \sim 115 \text{ ml/s}$ bei 1 kPa.

Dynamische Spaltänderung [K6]: Der Balgdruck biegt die Zunge statisch nach unten. Grenzdruck $dp_{\text{crit}} = 221 \text{ Pa}$ identisch mit Schwellendruck. Effektiver Schwingungsbeginn bei $\sim 90 \text{ Pa}$ (1 mbar). Arbeitsbereich 90-221 Pa.

Trennwand-Material: Folie und Furnier sind strömungstechnisch gleichwertig. Furnier ist stabiler und akustisch neutraler. Folie spart Platz, kann aber flattern.

Klappenorientierung: Ausblas ($\zeta=0.66$) besser als Umlenk ($\zeta=1.86$). Ausblas nutzt Wandgeometrie voll, Umlenk nur bei Platzmangel.

Trennwandform: Praktisch entscheidend für die Ansprache (instationärer Anlauf). C (Parabel) beste Richtungserhaltung, B (schräg) guter Kompromiss, A (gerade) am einfachsten aber am trügsten. Stationärer Durchfluss bei allen gleich - der Unterschied liegt in der Impulsantwort (Reflexionen, Richtungsverlust). Die Turbulenz für die Selbsterregung erzeugt der Spalt selbst.

Ansprache: $\tau = Q/(\pi \cdot f)$. Bei $Q=100$: 637 ms, bei $Q=25$: 159 ms. Die Kammergeometrie beeinflusst nicht den stationären Durchfluss, aber entscheidend den instationären Anlauf (Impulsantwort).

Akustik: Helmholtz 274 Hz, Kammer akustisch klein.

Phasenkopplung [v8 neu]: Die Ansprache wird durch drei Mechanismen bestimmt: (1) akustische Phase (dominant, durch f_H), (2) Kammer-Güte Q_H (durch Wandform), (3) Anströmwinkel am Spalt (durch Wandform, beim Einschwingen). Gleichmäßige Strömung allein reicht nicht - die Phase muss stimmen.

Vorkammer [v8 neu]: $48 \times 20 \times 70 \text{ mm}$ (67 cm^3) senkt Mode 1 von 274 auf 231 Hz (-16%). 5. OT (250 Hz) koppelt besser, 6. OT (300 Hz) schlechter. VK-Länge ist Abstimmwerkzeug für die Oberton-Phasenlage ohne Einfluss auf den stationären Durchfluss.