

Schallabstrahlung und Biegeschwingungen von Tonzungen und Stimmplatten

Gunter Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau an der TU Dresden, post@ifm-zwota.de (veröffentlicht August 2009)

Einleitung

Schwingende mechanische Strukturen geben einen Teil ihrer Schwingungsenergie an die umgebende Luft ab und erzeugen dadurch Luftschall. Viele mechanische Musikinstrumente nutzen diesen Vorgang aus. Bei den Schlaginstrumenten sind die Tonerzeuger in der Regel selbst die Schall abstrahlenden Elemente: Klangstäbe, Klangplatten, Membranen. Die Saite hat eine zu kleine Oberfläche um genügend Schallleistung abzustrahlen. Deshalb werden die Schwingungen zunächst auf einen Resonanzboden (ein solcher ist z.B. auch eine Gitarrendecke) geleitet der dann seinerseits die Abstrahlung übernimmt.

Erregt man ein schwingfähiges Objekt (z.B. Anschlagen oder Anzupfen) und überlässt es anschließend sich selbst, verfällt es in seine Eigenschwingungen. Dabei werden je nach Erregungsort eine oder mehrere (ggf. alle) Eigenschwingungen angeregt. Um eine Eigenschwingung anzuregen, muss man sie möglichst im Schwingungsbauch erregen. Die Tonzungen der Harmonikainstrumente stellen einseitig eingespannte Stäbe dar. Bei einem einseitig eingespannten Stab haben alle Eigenmoden am freien Ende einen Schwingungsbauch. Zupft man eine Tonzunge am freien Ende an, so erregt man also alle Eigenschwingungen.

Eine Eigenschaft einer Eigenmode ist ihre Schwingungsfrequenz, die sogenannte Eigenfrequenz. Dies nutzt man bei Musikinstrumenten, um die gewünschten Töne zu erzeugen. Die Einstellung der gewünschten Eigenfrequenzen erfolgt über die Wahl des Materials, der Geometrie sowie der Lager- und Einspannbedingungen (sogenannte Randbedingungen) der Ton erzeugenden Objekte.

Erregt man ein solches Objekt kontinuierlich mit einer sinusförmigen Kraft, so schwingt das System nach einer gewissen Einschwingzeit ausschließlich mit der Erregerfrequenz. Liegt die Erregerfrequenz nahe einer Eigenfrequenz so werden die Schwingungen bei gleicher Erregung stärker.

Ein einseitig eingespannter, homogener Stab und von konstantem Querschnitt besitzt Eigenfrequenzen, die folgende Verhältnisreihe bilden:

$$1 : 6,27 : 17,57 : 34,37 : 56,84 : \dots$$

Die Eigenfrequenzen bilden also keine harmonische Reihe. Dafür müsste die Verhältnisreihe $1 : 2 : 3 : 4 : 5 : \dots$ lauten. Harmonische Frequenzverhältnisse sind aber für die musikalischen Anwendungen sehr wichtig. Klangstäbe von Stabspielen sind beidseitig freie Stäbe. Auch sie besitzen bei konstantem Querschnitt keine harmonische Eigenfrequenzreihe. Bei hochwertigen Instrumenten werden in einem aufwendigen Stimmverfahren die Eigenfrequenzen der ersten drei Eigenmoden „harmonisiert“. Dazu wird der Querschnitt an bestimmten Abschnitten des Stabes verändert.

In Harmonikainstrumenten erzeugt nun nicht die Tonzunge allein den gewünschten Schall, sondern sie kann dies nur in

Zusammenwirken mit der Stimmplatte. Wird das System Tonzunge-Stimmplatte angeblasen, so bildet sich aufgrund der Eigenschaften des Systems eine sinusförmige Selbsterregung, deren Frequenz nahe der ersten Eigenfrequenz der Tonzunge liegt. Die Zunge wird also heftig mit der Erregerfrequenz schwingen und nur mit dieser! Die Tonerzeugung des Systems Tonzunge-Stimmplatte erfolgt nun derart, dass die Tonzunge durch ihre Schwingung den Luftkanal der Stimmplatte periodisch verschließt und frei gibt und dabei den Luftstrom durch den Kanal formt.

Ein schwingender Stab strahlt Schall ab. Schwingt er gleichzeitig mit mehreren Eigenfrequenzen, so findet man alle diese Frequenzen auch im abgestrahlten Schall wieder.

Im Falle der angeblasenen Tonzunge ist nun der durch die schwingende Zunge abgestrahlte Schall ohne Bedeutung, da die Schallabstrahlung der Zunge gegenüber dem aus dem kontinuierlichen Verschließen und Freigeben des Luftstroms durch die Zunge erzeugten Schall vernachlässigbar ist. Die Zunge schwingt infolge der Zwangserregung (nach einer gewissen Einschwingzeit) mit nur einer Frequenz. Der durch die Zungenschwingung unterbrochene Luftstrom bildet eine Impulsfolge mit fester Grundfrequenz. Das Spektrum einer solchen Impulsfolge ist eine streng harmonische Reihe auf Basis der Grundfrequenz.

Messungen von Schwingungen und abgestrahltem Schall

Soweit die Theorie. Wie kann man sie in der Praxis überprüfen? Man muss gleichzeitig die Zungenschwingung und den abgestrahlten Schall analysieren. Schwingungen werden im Allgemeinen durch Kontaktaufnehmer gemessen. Diese würden aber die Schwingungen der feinen Tonzungen erheblich beeinflussen und so das Ergebnis der Messung stark verfälschen. Man muss also berührungslos, auf optischem Wege vorgehen. Dazu muss der Sensor aber die Tonzunge „sehen“. Wir haben eine solche Messung mit folgendem Aufbau nach Abbildung 1 realisiert.



Abbildung 1: Messaufbau

Für Standardmessungen an Tonzungen bzw. Tonzungen mit Stimplatte werden diese in unserem Institut auf Einzelkzellen aufgewachst und mit einem Ersatzvolumen (heller Kasten in Abbildung 1) betrieben, dass auf einem schallgedämpften Gebläse (dunkler Kasten) sitzt. Damit der Laserstrahl des Schwingungsmesssystems (Laservibrometer im Vordergrund) die Tonzunge sehen kann, muss die Kanzelle „verkehrt herum“, also nach außen gerichtet betrieben werden. Man kann diese gut in Abbildung 2 erkennen. Der Lasermesspunkt ist deutlich sichtbar. Da die Zunge sehr stark schwingt und an der Zungenspitze der Messbereich des Lasers überschritten wird, mussten wir den Messpunkt in Richtung Zungenfuß verschieben. Das Mikrofon im Vordergrund erfasst sowohl den von der Zunge als auch den vom Luftstrom stammenden Schall.



Abbildung 2: Kanzelle mit Mikrofon und Laserpunkt

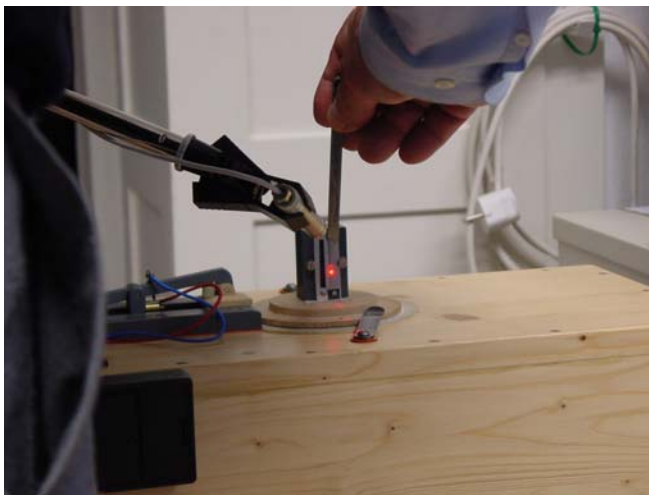


Abbildung 3: Anschnippen der Tonzunge

In einem ersten Versuch wurden die Zungen mit einem kleinen Metallstreifen angeschnippt (Abbildung 3). Nach dem Anschnippen führen sie Eigenschwingungen aus. Im zweiten Versuch kam es zu einer betriebsgerechten Erregung durch den Luftstrom. Die in beiden Versuchen aufgenommenen Spektren, dies erfolgte mit einem Mehrkanalanalysator für Vibrometer und Mikrofon gleichzeitig, sollen nun Aufschluss über die Zungenschwingungen im Betriebszustand geben. Sie sind in den folgenden vier Abbildungen für eine Tonzunge f^1 dargestellt.

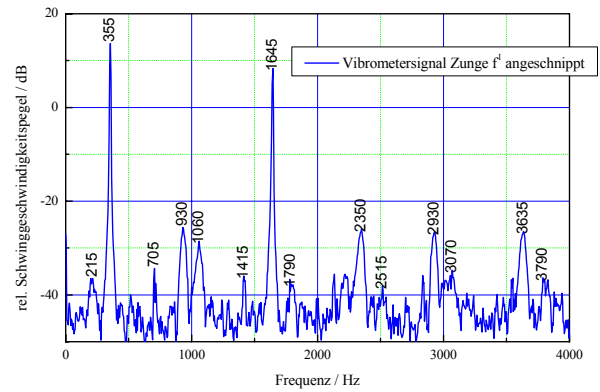


Abbildung 4: Vibrometerspektrum, Tonzunge angeschnippt

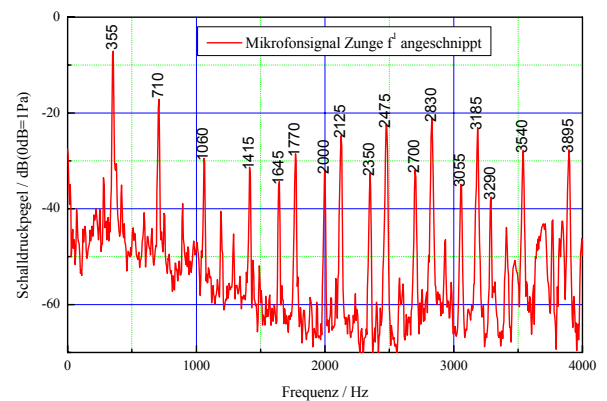


Abbildung 5: Mikrofonspektrum, Tonzunge angeschnippt

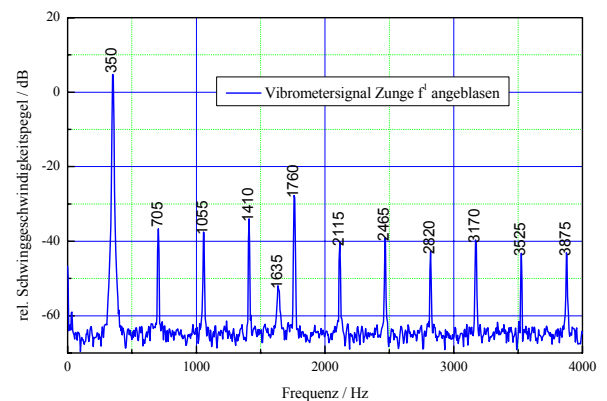


Abbildung 6: Vibrometerspektrum, Tonzunge angeblasen

Das Schwingungsspektrum der angeschnippten Zunge (Abbildung 4) zeigt zwei deutliche Peaks 355 Hz und 1645 Hz. Sie bilden ein Frequenzverhältnis von 1 : 4,6. Es handelt sich um die beiden ersten Eigenmoden der Zunge, wobei das Frequenzverhältnis durch die Profilierung der Zunge gegenüber dem idealen Stab verschoben ist. Die weiteren Komponenten sind gegenüber diesen beiden sehr schwach und zudem deutlich bedämpft, was man an den breiten Peaks erkennt.

Im Schallspektrum der angeschnippten Zunge (Abbildung 5) findet man die beiden Komponenten wieder. Sie dominieren aber keineswegs das Spektrum. Wo kommen nun die Komponenten her,

die nicht in der Zungenschwingung enthalten sind? Es wirkt der gleiche Effekt wie bei der Maultrommel. Das Eintauchen der Tonzunge in die Stimmlatte in Verbindung mit dem engen Luftspalt erzeugt Schallimpulse, die den typischen „Summton“ bilden. Wie bereits erwähnt weisen Impulse ein harmonisches Spektrum auf. Da die Zunge mit zwei Eigenschwingungen schwingt, muss es auch zwei Impulse und damit zwei harmonische Reihen geben. Tatsächlich findet man im Schallspektrum eine Reihe auf 355 Hz und eine auf 1645 Hz. Darüber hinaus existieren Frequenzkomponenten, die in keine der beiden Reihen passen. Deren Ursprung kann momentan nicht erklärt werden.

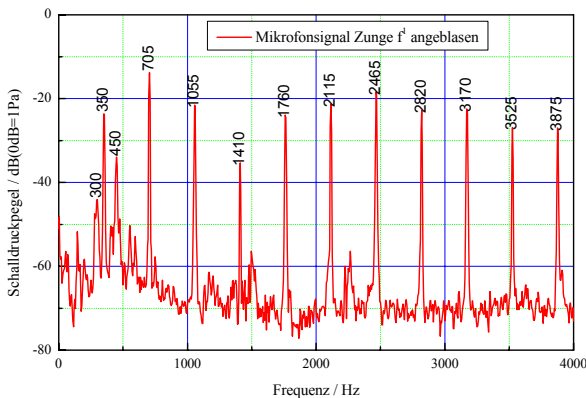


Abbildung 7: Mikrofonspektrum, Tonzunge angeblasen

Im Schallspektrum der angeblasenen Zunge (Abbildung 7) findet man nur noch relevante Komponenten, die auf der harmonischen Reihe über 350 Hz beruhen. Die Spektralanteile bei 300 Hz und 450 Hz kommen wahrscheinlich aus dem Einschwingen, keinesfalls aber von weiteren Tonzungenmoden, denn die liegen viel, viel höher!

Interessant ist, dass sich im Schwingungsspektrum der angeblasenen Zunge (Abbildung 6) auch alle Komponenten finden, die eigentlich nur im Schall auftreten dürften. Der Schall koppelt auf die Zunge zurück und ruft erzwungene Zungenschwingungen auf diesen Frequenzen hervor. Ein Resonanzeffekt bei dieser Erregung lässt sich in der Nähe der zweiten Zungeneigenschwingung erahnen. Die zweite Eigenschwingung bei 1635 Hz selbst ist stark bedämpft aber durchaus vorhanden. Schallanteile, die man ihr zuschreiben könnte findet man aber nicht!

Die beschriebenen Untersuchungen stützen die Aussage, dass das Spektrum des Tonzungenklanges auf der Frequenz der ersten Eigenmode der Tonzunge beruht. Nun wird die Form des Schallimpulses und damit die Ausprägung der einzelnen harmonischen Komponenten auch von der konkreten Form der Biegeschwingung der Tonzunge beeinflusst. Die wird nicht zuletzt vom Profil der Tonzunge bestimmt. Ändert man das Profil der Tonzunge, so schlägt sich das aber auf jedem Fall auch in den Eigenschwingungen und damit im Spektrum des beim Anschneiden erzeugten Schalles nieder. Zwischen Eigenschwingungen und dem letztlich erzeugten Schall besteht also durchaus ein Zusammenhang. Ist dieser Zusammenhang hinreichend bekannt, so könnte man aus dem Spektrum der angeschnittenen Tonzunge auf den Klang der Stimmlatte beim Anblasen schließen, insofern die anderen Parameter wie Luftspalt und Aufbiegung konstant gehalten werden.

Ein sehr vereinfachtes mathematisches Modell des Systems Tonzunge – Stimmlatte

Abbildung 8 zeigt die Schnittdarstellung einer Stimmlatte. Die Tonzunge (1) ist mit einem Niet (3) am Fußende auf dem Stimmlattenkörper (2) befestigt. Die Tonzunge weist eine endliche Dicke mit einem tonabhängigen Profil auf und hat eine etwas geringere Länge und Breite als der Kanal im Stimmlattenkörper, so dass sie ungehindert in den Kanal beim Schwingen eintauchen kann. Die Differenz zwischen Kanal und Tonzunge wird als „Luftspalt“ bezeichnet. Die Gleichmäßigkeit des Luftspalts hängt neben der Bearbeitung von Tonzunge und Kanal auch wesentlich von der Montage der Tonzunge auf den Stimmlattenkörper ab. Der Luftspalt verursacht beim Eintauchen der Tonzunge in den Kanal eine Restströmung, da die Zunge den Kanal nicht vollständig verschließt. Das verursacht einen Gleichanteil in der Luftströmung, der der Tonbildung verlorengeht. Dieser Luftverlust summiert sich bei mehrhörigem Akkordspiel zu einer merklichen Größe, die der Spieler zusätzlich mit dem Balg aufbringen muss.

Die Stimmlatte weist in Ruhestellung eine gewisse „Aufbiegung“ gegenüber der Oberfläche des Stimmlattenkörpers auf. Diese Aufbiegung ist wichtig für das Entstehen der Selbsterregung. Die infolge der Aufbiegung unter die Tonzunge strömende Luft, verursacht eine Bernoulli-Kraft, die die Zunge nach unten in Richtung Kanal beschleunigt, mit dem vollständigen Eintauchen der Zunge in den Kanal jedoch verschwindet.

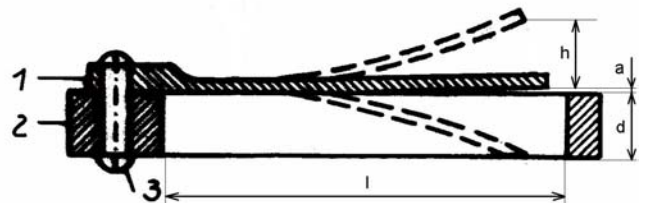


Abbildung 8: Schnittdarstellung einer Stimmlatte

Wir wollen die Schallentstehung an der Stimmlatte an einem stark vereinfachten Modell studieren. Dazu treffen wir folgende Annahmen:

- Die Stimmlatte besitzt einen Kanal der Länge l , der Breite b und der Dicke d .
- Die Tonzunge besitzt ebenfalls die Länge l und die Breite b . Sie passt zunächst ideal in den Kanal.
- Die Tonzunge besitzt keine Dicke und wird als starres Element angenommen, dass sich um ein Scharnier am Fußpunkt der Tonzunge dreht.
- Die Schwingung der Tonzunge befindet sich in einem stabilen Zustand und die Spitze der Tonzunge bewegt sich mit einer sinusförmigen Bewegung auf und ab. Die Ruhelage der sinusförmigen Bewegung befindet sich um die Aufbiegung a oberhalb des Stimmlattenkörpers. Wir gehen von einer symmetrischen Schwingung um die Ruhelage aus.
- Das Scharnier wird als von der Ausdehnung her unendlich klein und ideal in der Oberflächenebene liegend angenommen.
- Die Tonzunge verschließt den Kanal beim Eintauchen und solange sie sich vollständig im Kanal befindet

komplett. D. h. wir vernachlässigen wiederum die Kreisbahn der Zungenspitze, die eigentlich einen kleinen, variablen Spalt an der Vorderflanke der Zunge verursacht.

- Der Luftspalt wird durch eine konstante Zusatzfläche, gleichmäßig um die Zunge herum modelliert.

Mit diesen Annahmen können wir die Bewegung der Tonzunge in drei zu betrachtende Phasen einteilen:

1. Die Tonzunge bewegt sich oberhalb der Stimmplatte also über der Befestigungsebene der Zunge.
2. Die Tonzunge bewegt sich im Stimmplattenkanal.
3. Die Tonzunge bzw. Teile der Zunge schwingen auf der Unterseite der Platte aus dem Kanal heraus.

Bewegungsphase 1:

Befindet sich die Tonzunge oberhalb der Stimmplattenebene, so gibt sie ein Fenster für die Luftströmung mit folgender Fläche F_o frei:

$$F_o = (l + b)(a + h \sin \omega t),$$

wobei h die maximale Auslenkung der Tonzunge gegenüber der Ruhelage angibt. Die angewandte Gleichung vernachlässigt, dass die Zungenspitze sich nicht senkrecht nach oben, sondern auf einer Kreisbahn mit der Radius l bewegt. Die Tonzunge befindet sich oberhalb der Stimmplattenebene solange

$$a + h \sin \omega t \geq 0.$$

Die maximale Größe des freigegebenen Fenster wird durch den Querschnitt des Kanals der Stimmplatte begrenzt. Auch wenn die Zunge selbst einen größeren Querschnitt freigibt, steht nur der Querschnitt des Kanals effektiv für den Volumenfluss zur Verfügung. Der maximal verfügbare Querschnitt beträgt

$$F_{max} = lb.$$

Die Variation des Volumenflusses durch den Kanal in Abhängigkeit von der Stellung der Tonzunge wird also bei größeren Amplituden nach oben begrenzt. Die Begrenzung setzt ein, wenn

$$h > \frac{lb}{l + b} - a.$$

Für die oben betrachtete Stimmplatte f^1 mit $l = 36$ mm, $b = 4$ mm und $a = 0,5$ mm gilt das für $h > 3,1$ mm.

Bewegungsphase 2:

Für Bewegungsphase 2 nehmen wir an, dass die Zunge den Kanal vollständig verschließt.

Bewegungsphase 3:

Gilt

$$a + h \sin \omega t < -d$$

schwingt die Zunge auf der Unterseite aus dem Kanal heraus. Die Tonzunge gibt nun ein Fenster F_U folgender Größe frei:

$$F_U = \frac{(|h \sin \omega t| - d - a)^2}{|h \sin \omega t| - a} l + (|h \sin \omega t| - d - a) b$$

Für Bewegungsphase 1 haben wir eine mögliche maximale Öffnungsfläche erhalten, wenn die Amplitude der Tonzunge hinreichend groß ausfällt. Im Falle der betrachteten Beispielstimmplatte Akkordeon f^1 wäre der Amplitudengrenzwert 3,1 mm. Damit die Tonzunge in Bewegungsphase 3 unter aus dem Kanal hinaus schwingt muss die Amplitude größer als die Stimmplattendicke d plus die Aufbiegung a sein. Unsere Akkordeon- f^1 -Stimmplatte weist eine Dicke von $d = 3$ mm auf. Wir erhalten also wieder eine Mindestamplitude von 3,1 mm, damit die Zunge überschwingt. Die Frage ist nun, ob derartige Amplituden in der Praxis überhaupt vorkommen? Ohne weiteres! Bereit im *mf* stellen wir an der f^1 -Tonzunge Amplituden > 4 mm fest. Abbildung 9 zeigt eine Stroboskopaufnahme der schwingenden f^1 -Zunge. Man kann die Größe der Amplitude recht gut erkennen.

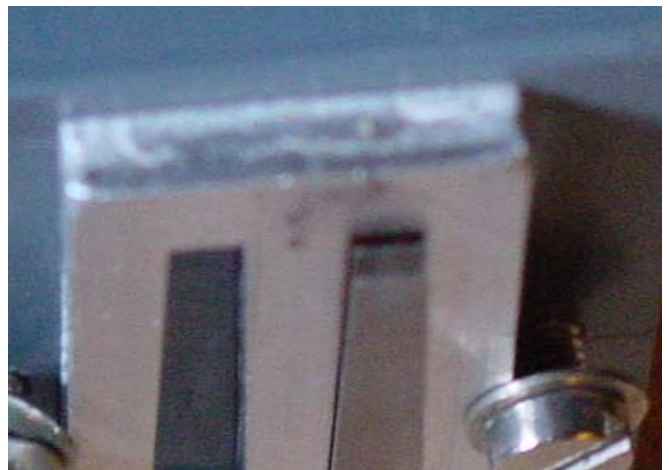


Abbildung 9: Stroboskopaufnahme einer schwingenden f^1 -Tonzunge

Mit Hilfe der angeführten Gleichungen kann nun die freigegebene Fensteröffnung über der Zeit berechnet werden. Die Berechnung ist sehr einfach z. B. in EXCEL realisierbar. Abbildung 10 zeigt der Verlauf der Fensteröffnung für zwei Auslenkungen. Die Amplitude 3 mm führt weder in die Sättigungsphase, noch tritt ein Herausschwingen aus dem Kanal auf. Bei 5 mm Amplitude kommen beide Effekte zum Tragen.

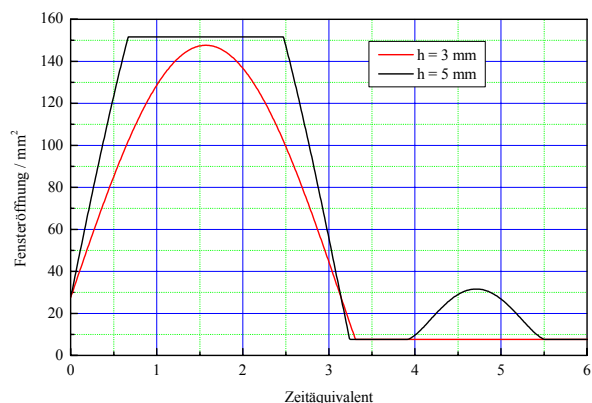


Abbildung 10: Zeitverlauf der von der Tonzunge freigegebenen Fensteröffnung. Dargestellt ist nur eine Periode!

In Abbildung 10 ist keine wirkliche Zeitachse eingefügt, sondern ein Zeitäquivalent, da wir ohne eine bestimmte Frequenz vorzugeben einfach die Sinusfunktion für einen gewissen Wertebereich berechnet haben.

Der durch die freigegebene Fläche strömende Volumenstrom ist der Fläche proportional. Der durch den wechselnden Fluss entstehende Schalldruck ist proportional zur Ableitung des Volumenstromes. Abbildung 11 stellt nun die Ableitung der Flächenfunktion dar, also einen zum Schalldruck proportionalen Verlauf.

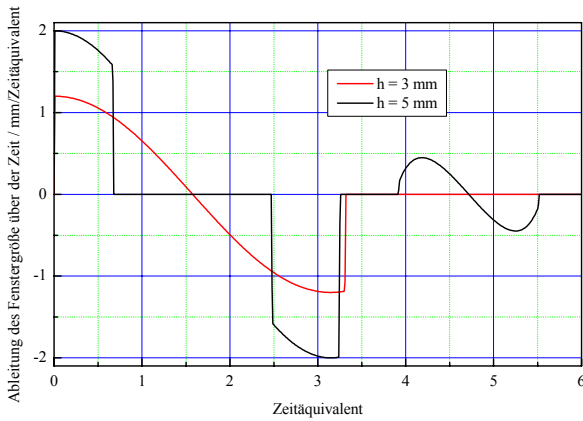


Abbildung 11: Zeitverlauf der Ableitung der Fensteröffnung nach dem Zeitäquivalent. Dargestellt ist nur eine Periode!

Wir wollen zunächst unser Ergebnis mit Angaben von RICHTER (1990) vergleichen (Abbildung 12).

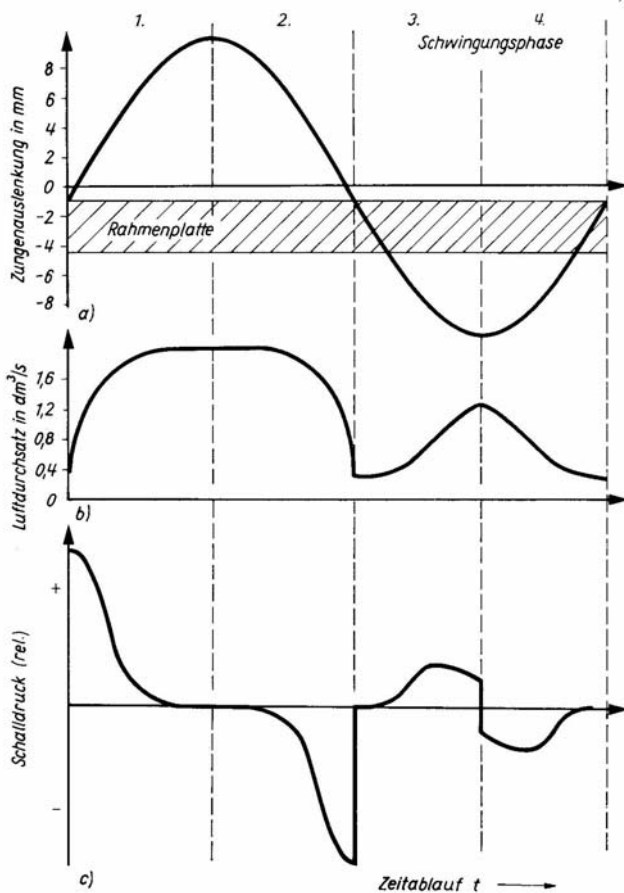


Abbildung 12: Verlauf von Tonzungenschwingung, Luftfluss und Schalldruck an der Stimmlippe nach RICHTER

Zunächst stellen wir qualitativ durchaus eine gute Übereinstimmung unseres einfachen Modells mit den Angaben von Richter fest. Man muss dabei beachten, dass RICHTER die Kurve weder aus Messungen noch Berechnungen gewann, sondern aus der Anschauung heraus zeichnete. Unsere Druckkurve ist gegenüber der RICHTER-Kurve etwas „hakelig“. Dies resultiert aus den vereinfachenden Annahmen, die zu einigen untypischen Zuständen führen. Zum einen wird sofort nach dem Eintauchen der Tonzunge in den Kanal, dieser wieder etwas freigegeben, wegen der Kreisbahn der Zunge. Insbesondere schwingt die Zunge nicht wie von uns angenommen steif, sondern mit einer Biegelinie. Dies hat zur Folge, dass ein deutlich geringeres Fenster freigegeben wird und damit der Sättigungsbereich des Luftflusses gar nicht oder erst bei höheren Amplituden erreicht wird. Wir können die Auswirkung unserer Annahmen etwas abmildern, indem wir eine deutlich geringere Stimmlattendicke annehmen und die Amplitude verringern. Für die Berechnung der Kurven der folgenden Abbildung 13 haben wir die Dicke der Stimmlatte auf 1 mm reduziert. Damit sehen die Kurven sehr viel „gefälliger“ und ähnlicher zu den RICHTER-Kurven aus. Gleichzeitig variierten wir die Aufbiegung um deren Wirkung zu studieren.

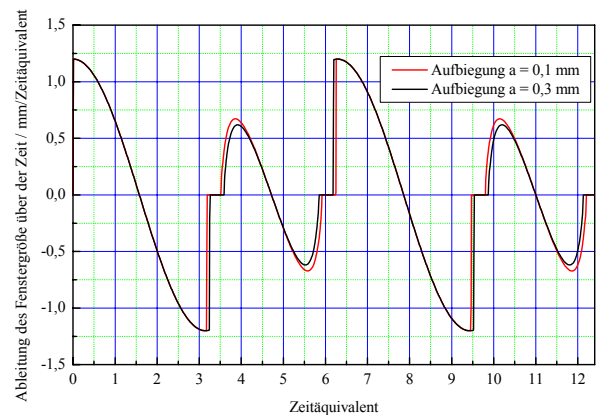


Abbildung 13: Zeitverlauf der Ableitung der Fensteröffnung nach dem Zeitäquivalent mit variierten Eingangsdaten. Dargestellt sind zwei Perioden.

Wir erkennen, dass sich die geringfügige Änderung der Aufbiegung sichtbar im Kurvenverlauf abzeichnet.

Nun ist natürlich besonders interessant inwieweit der mit Hilfe des stark vereinfachten Modells berechnete Schalldruckverlauf an der Stimmlatte mit dem tatsächlichen, gemessenen Verlauf übereinstimmt. Abbildung 14 stellt zwei entsprechende Kurven gegenüber (Die Mikrofonposition ist in Abbildung 1 und Abbildung 2 ersichtlich). Gezeichnet wird das Signal über jeweils zwei Perioden. Man erkennt, dass das Modell die Realität lediglich in sehr grober Näherung beschreibt. Eine wesentliche Ursache liegt wie bereits erwähnt in der Annahme der starren Zunge, die eben keine Biegelinie beschreibt.

Die deutlich stärkeren Signalanteile (die hohen Spitzen) entstehen während der Schwingung der Tonzunge oberhalb der Stimmlatte. Hier wird ein größeres Strömungsfenster freigegeben. Die kleineren Signalanteile entstehen während der Bewegung der Zunge in bzw. unterhalb der Stimmlatte. Insbesondere liefert das Modell keine Aussagen zu den deutlichen mehrfachen Druckänderungen in der Schwingungsphase der Tonzunge oberhalb der Stimmlatte. Während der Messungen bemerkten wir, dass der mittels Mikrofon in der Nähe der Stimmlatte aufgenommene Schalldruck-Zeit-

Verlauf sehr stark von der Mikrofonposition und vom Einbauzustand der Stimmlatte abhängt. Unter Einbauzustand wird verstanden, ob die Stimmlatte außerhalb des Instrumentenkörpers (also unter Laborbedingungen wie in Abbildung 1 bis Abbildung 3 dargestellt) oder nach Innen gerichtet betrieben wird. Man vergleiche hierzu Schalldruck-Zeit-Verläufe in Abbildung 14 und Abbildung 15. Es werden nicht nur Signaltbereiche gegeneinander verschoben, sondern es entstehen bzw. verschwinden zusätzliche Spitzen und Einbrüche, was sich natürlich auch im Schalldruckspektrum widerspiegelt.

Modell nicht. Es liefert lediglich unproportionale Veränderungen in der Signalform, wenn sich neue Zustände einstellen infolge der Veränderung der Amplituden der Zungenbewegung, wie das Erreichen des Sättigungszustandes oder des Überschwingens auf der Unterseite der Stimmlatte.

Mit dem vorgestellten, stark vereinfachten Modell des Systems Tongzunge – Stimmlatte können also prinzipielle Vorgänge an der Stimmlatte studiert, jedoch nur sehr vage Aussagen zum tatsächlichen klanglichen Ergebnis getroffen werden.

Literatur

Richter, G.: **Akkordeon**, Handbuch für Musiker und Instrumentenbauer; VEB Fachbuchverlag Leipzig 1990

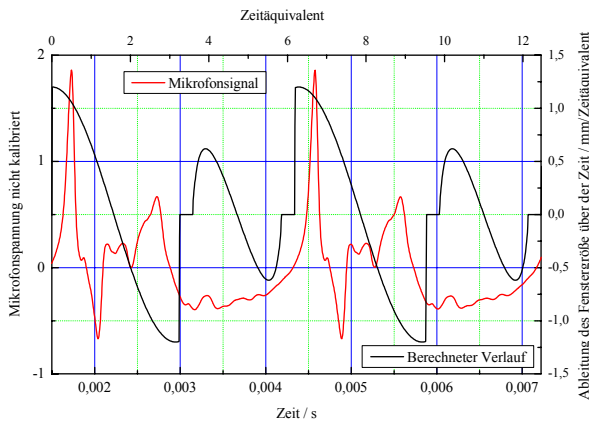


Abbildung 14: Vergleich des an einer f^1 -Stimmlatte gemessenen Schalldruck-Zeit-Verlaufes (*ff*-Anspiel) mit dem über das Modell berechneten Verlauf

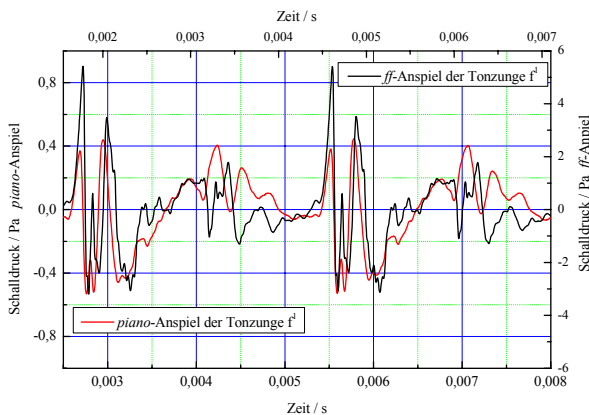


Abbildung 15: Schalldruck-Zeit-Verlauf für *piano*- und *ff*-Anspiel im Vergleich (Bitte die nicht gleichen Skalierungen der Achsen beachten!)

Abbildung 15 stellt zwei für *piano*- und *ff*-Anspiel gemessene Schalldruck-Zeit-Verläufe gegenüber. Die Achsen für die beiden Messkurven wurden für eine bessere Vergleichbarkeit gegeneinander verschoben bzw. mit unterschiedlichen Maßstäben versehen. Man erkennt, dass beim *piano*-Anspiel die Dominanz der aus der Zungenschwingung oberhalb der Stimmlatte resultierenden Signalanteile zurückgeht, wobei die Signalstärke natürlich insgesamt sinkt, was aber durch die Veränderung des Maßstabes in der Darstellung optisch verschleiert wird. Die Tatsache, dass das Signal bei leiserem Anspiel, d. h. geringerem Spieldruck, sich in seinen Verhältnissen verändert und nicht insgesamt proportional abfällt bedeutet, dass sich die Klangfarbe verändert. Auch dieses Phänomen beschreibt unser einfaches