

Zum Stimmen von Klangstäben

Gunter Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau an der TU Dresden, post@ifm-zwota.de (veröffentlicht Juli 2010)

Biegeschwingungen von Stäben

Die Klang erzeugenden Elemente der Stabspiele sind, wie es der Name der Instrumente schon besagt, schwingende Stäbe. Die Charakterisierung Stab besagt, dass die Länge der Objekte dominiert. Die Abmessungen Breite und insbesondere Dicke sind klein gegenüber der Länge. Für viele Belange kann man solche Stäbe als eindimensionale Gebilde ansehen. Bei den typischen, bekannten Stabspielen Metallophon, Xylophon, Vibraphon, Marimba verwendet man frei gelagerte Stäbe (Randbedingung frei-frei). Es gibt im Instrumentarium der Völker aber auch Stabspiele, die auf einseitig eingespannten Stäbe (Randbedingung fest-frei) beruhen.

Für die Klangerzeugung bei Stabspielen nutzt man die Eigenfrequenzen der Biegeeigenmoden der Stäbe. Die Biegeeigenfrequenzen eines Rechteckstabes ergeben sich zu

$$f_n = \frac{s_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{I}{A}} \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}, \quad \text{Gleichung 1}$$

wobei l die Stablänge, E den Elastizitätsmodul, ρ_0 die Dichte, A die Querschnittsfläche und I das Flächenträgheitsmoment des Stabes darstellen. Die Größen s_n , auch als Beiwerte bezeichnet, nehmen je nach Randbedingungen charakteristische Größen an. Tabelle 1 stellt die Werte der s_n sowie die sich ergebenden Frequenzverhältnisse f_n/f_1 dar.

Resonanz	s_n	f_n/f_1	$f_n/f_1/\text{cent}$
f_1	4,73	1	0
f_2	7,853	2,76	1758
f_3	10,996	5,41	2923
f_4	14,137	8,94	3792
f_5	17,279	13,37	4498

Tabelle 1: Beiwerte und Frequenzverhältnisse der Biegeeigen-schwingungen eines freien Rechteckstabes

Für einen rechteckigen Stab der Breite b und der Dicke d erhält man für das Flächenträgheitsmoment bzgl. der Längsachse

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad \text{Gleichung 2}$$

und somit die Gleichung für f_n

$$f_n = \frac{s_n^2 d}{4\sqrt{3}\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}. \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Eigenfrequenzen der Biegeschwingungen der Stäbe und damit die auf deren Basis erzeugten Teiltöne bilden also unharmonische

Verhältnisse zueinander. Die Ursache liegt in der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenlänge begründet. Dies führt auch dazu, dass Knotenlinien der einzelnen Moden nicht wie z. B. bei Saiten zusammenfallen. (Vergleiche TRENDELENBURG 1961) Die Randbedingung frei-frei erreicht man, indem die Stäbe möglichst direkt unter der Knotenlinie der ersten Biegeeigenmode unterstützt bzw. aufgehängt werden. Die Unterstützung an der Knotenlinie führt zur geringsten Störung (Dämpfung) der Eigenmode, da sich die einzelnen Elemente des Stabes in der Knotenlinie sowieso in Ruhe befinden. Die Knotenlinien der ersten Biegemode befinden sich bei $1/6$ bzw. $5/6$ der Gesamtlänge des Stabes. Da wegen der oben geschilderten Situation die Orte der Knotenlinien der höheren Moden von dem der ersten Mode abweichen, werden die höheren Moden und damit die von ihnen erzeugten Teiltöne deutlich stärker bedämpft. Dies zeigt sich in einem rascheren Abklingen der höheren Teiltöne. Abbildung 1 verdeutlicht dies für die Klänge zweier Metallklangstäbe.

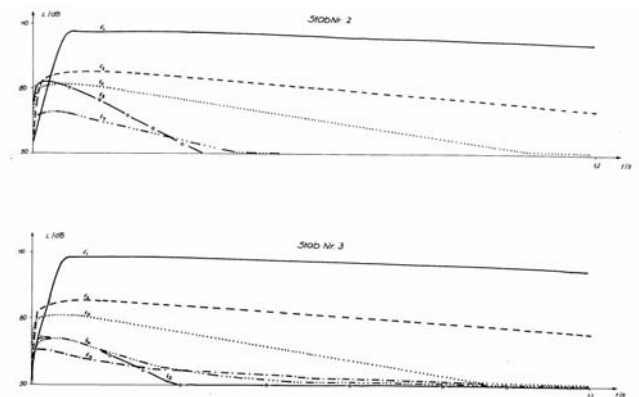


Abbildung 1: Abklingkurven der einzelnen Teiltöne zweier Klangstabsignale

Eine systematische Beobachtung des Abfalls der Teiltöne liefert folgende Aussagen:

- Die Dämpfung des Grundtons beträgt im Mittel 1,5 dB/s, die des Obertonbereiches 42 dB/s.
- Bei den tiefsten Klangstäben f, g, und a dauert es ca. 1,5 s bis der Grundton sicher 10 dB über dem Obertonbereich steht und 4 s bis der Unterschied 20 dB beträgt. Nach höheren Tönen zu, ist die erforderliche Zeit deutlich geringer und beträgt im Schnitt 0,5 s.
- Bei tiefen Klangstäben ist nicht die Dämpfung der Obertöne geringer, sondern sie werden von vorn herein stärker angeregt.

Beobachtungen der Knotenlinien der ersten Stabmode, z. B. mittels Chladnischer Figuren zeigten darüber hinaus, dass diese, offensichtlich infolge von Inhomogenitäten im Stab nicht immer senkrecht zum Stab verlaufen, was zu zusätzlichen Dämpfungen auch des Grundtones führen kann. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.

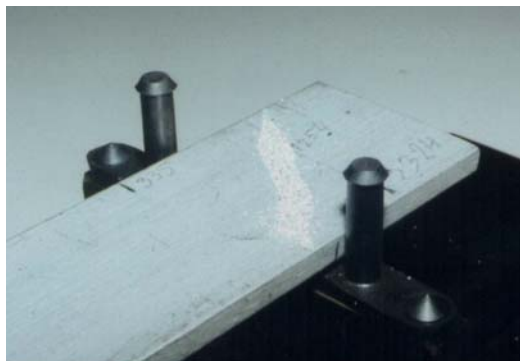


Abbildung 2: Knotenlinie der ersten Biegeeigenschwingung eines Klangstabes

Zur Tonhöhe von Klangstäben

Bei der normalen Verwendung der Klangstäbe regt man beim Anschlagen vorzugsweise die Biegeeigenschwingungen an, die dann ihrerseits Schall an die Umgebung abstrahlen. Die daraus resultierenden Teiltöne des Klages weisen zunächst beim idealen Rechteckstab, wie er zumindest für einfache Stabspiele verwendet wird, Frequenzverhältnisse wie in Tabelle 1 dargestellt auf. Dargestellt sind neben den Teiltonverhältnissen auch die Verhältnisse bzw. Frequenzabstände im cent-Maß. Man erkennt, dass die Teiltonreihe des Stabes weit von der harmonischen Reihe 1:2:3:4: ... entfernt ist. Betrachten wir aber ausgehend vom ersten Teilton die harmonischen Intervalle (Oktave, Quinte, Quarte, Sexte) und setzen diese jeweils über die Oktave fort,

- Quinte + Oktave
- Quarte + Doppeloktave
- Dreifachoktave
- große Sexte + Dreifachoktave

so liegen zumindest der dritte und fünfte Teilton sehr nahe zu solchen Intervallen. Probleme bilden offensichtlich der zweite und insbesondere der vierte Teilton. Tabelle 2 stellt die cent-Werte dieser konsonanten Reihe und die Differenzen zu den Stabteiltönen dar.

Kons. Reihe	f_n/f_1 /cent	Diff.
Prime	0	0
Quinte + O	1800	-48
Quarte + DO	2900	23
Dreif.-O.	3600	192
g.S. + Dr.O.	4500	-2

Tabelle 2: Cent-Werte der konsonanten Reihe und Differenzen zu den Stabteiltönen

BLUTNER führte 1984 eine Reihe von Untersuchungen zur Tonhöhenwahrnehmung von Klangstäben durch (Hierzu existiert keine Veröffentlichung). Er fand heraus, dass man die wahrgenommene Tonhöhe recht gut beschreiben kann, wenn man die cent-Abweichungen der ersten vier Teiltöne zu den konsonanten Intervallen, basierend auf der Sollfrequenz des angestrebten Tones, gewichtet addiert. Dabei kommen den Teiltönen folgende Gewichte zu: $f_1 \approx 56\%$, $f_2 \approx 20\%$, $f_3 \approx 20\%$ und $f_4 \approx 4\%$. Die geringe Bedeutung des vierten Teiltones ist zweifellos in seiner sehr kurzen Klangdauer und des im Verhältnis niedrigen Pegels begründet. Für die etwa gleiche Bedeutung des zweiten und dritten Teiltones gab

es zunächst keine Begründung. Der dritte Teilton klingt sowohl rascher ab und hat ebenso einen eindeutig geringeren Pegel als der zweite Teilton. Die Dominanz des ersten Teiltones (Grundton) ist aufgrund des Pegelüberschusses und der deutlich längsten Klangdauer offensichtlich.

Das einfache Stimmen von Klangstäben auf den Grundton

Betrachten wir Gleichung 1: Wir gehen von Klangstäben des gleichen Materials und aus ästhetischen Gründen auch von Stäben des gleichen Querschnitts aus. Weiterhin beschränken wir uns auf den Grundton (f_1). Man kann die Gleichung dann vereinfachen zu

$$f_1 = \frac{k_1}{l^2} \quad \text{Gleichung 4}$$

Alle für die Stäbe ja nun gleichen Größen sind in der Konstante k_1 zusammengefasst. Die Frequenz unseres Klangstabes hängt nun nur noch von seiner Länge ab, die wir zur Stimmung des Stabes variieren wollen. Für ein Instrument benötigen wir zwölf Klangstäbe in Halbtonstimmung. In der gleich schwebend temperierten Stimmung stehen die Grundfrequenzen benachbarter Halbtöne in folgendem Verhältnis zueinander:

$$\frac{f_1(\text{höhererHalbton})}{f_1(\text{niedrigererHalbton})} = 1,05946$$

Entsprechend verhalten sich die erforderlichen Stablängen umgekehrt wie die Wurzel aus 1,05946 zueinander.

$$\frac{l(\text{niedrigererHalbton})}{l(\text{höhererHalbton})} = \sqrt{1,05946} = 1,0293$$

Die Stablängen der in der Tonhöhe aufwärts steigenden Halbtöne bilden also eine schöne, gleichmäßig Reihe, da sie in jeweils gleichem Verhältnis zueinander stehen (Abbildung 3).

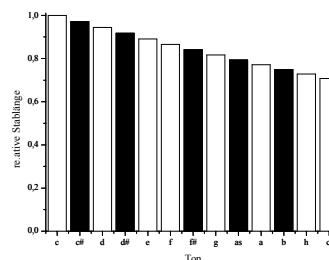


Abbildung 3: Relative Stablängen einer Halbtonreihe

Abbildung 3 zeigt die erforderlichen relativen Längen für die Töne einer Oktave. Nun werden bei Stabspielen üblicherweise nur die Ganztöne als Reihe gelegt. Die Halbtöne sind nicht vorhanden oder als eine zweite Reihe ausgelegt. In Abbildung 3 sind die Halbtöne in Form schwarzer Balken gekennzeichnet. Die Reihe der Ganztöne wird also schon nicht mehr ein wirklich gleichmäßig in der Länge abgestuftes Bild ergeben.

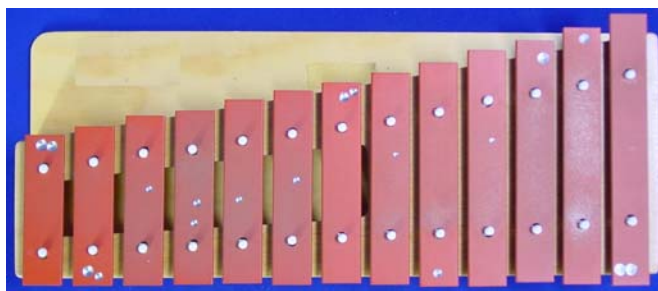


Abbildung 4: Glockenspiel, Klangstäbe mit der Unterseite nach oben aufgelegt

Abbildung 4 stellt ein kleines Glockenspiel dar. Man erkennt, dass die als Ganztonreihen aufgelegten Instrumente tatsächlich keine wirklich mehr gleichmäßig abgestuften Reihen bilden, die aber den ästhetischen Eindruck (zumindest bei diesem einfachen Instrument) nicht wirklich stört.

Nun gingen wir bei unserer Stimmung mit Hilfe der Stablänge zunächst davon aus, dass die Stäbe exakt gleiche Materialeigenschaften aufweisen. In Wirklichkeit werden wir aber immer geringe Unterschiede vorfinden, bei unterschiedlichen Materialchargen werden auch größere Differenzen zu berücksichtigen sein. Hinzu kommen stets auftretende Fertigungstoleranzen. Sind die Stäbe auf Länge geschnitten, so können sie für ein evt. notwendiges Stimmen hinsichtlich der Länge nur noch gekürzt werden, also nur in der Tonhöhe erhöht werden. Was aber, wenn der Stab nach dem Zuschnitt bereits zu hoch ist? Man könnte nun die Stäbe so konstruieren, dass sie stets zu tief liegen und beim Stimmen immer nur zu erhöhen sind. Aber auch hier könnte man übers Ziel hinausschießen und was dann? Wir müssen also nach einer anderen Möglichkeit zur Tonhöhenbeeinflussung suchen. Gleichung 3 weist sicher auf die Dicke als einen weiteren, manipulierbaren Parameter hin, aber so recht hilft sie nicht weiter.

Schauen wir uns an, wie sich der Stab bei der zur Klangerzeugung genutzten Biegeschwingung bewegt. Abbildung 5 stellt das Bewegungsprofil der ersten Biegemode dar. Es handelt sich um eine Betrachtung einer Stabsimulation von der Seite aus.

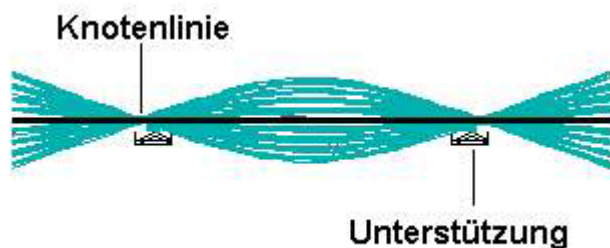


Abbildung 5: 1. Stabiegemode frei-frei

Man kann sagen, dass sich die Stabmitte heftig verbiegt, die Ränder sich eher als starre Gebilde auf und ab bewegen. Stellen wir uns den Klangstab als eine Art Federschwinger vor, so stellt die Mitte die Feder, die Ränder eher die schwingende Masse dar. Wird bei einem Feder-Masse-Schwinger die Masse verringert, so steigt die Schwingungsfrequenz, wird die Feder weicher gemacht, so sinkt diese. Eine Stabfeder macht man durch Verringerung des Querschnittes weicher, die Masse verringert man ebenfalls durch Materialabtrag. Auf unseren Klangstab übertragen heißt das: Trägt man am Rand Material ab, so verringert man die schwingende Masse, die Eigenfrequenz und damit die Tonhöhe steigt. Trägt man in der Mitte Material ab, so macht man die wirksame Feder weicher, die Tonhöhe sinkt. Schauen wir uns in dieser Hinsicht die Unterseiten der Klangstäbe in Abbildung 4 an, so finden wir in der

Tat entsprechende Materialabtragungen in Form kleiner Sackbohrungen. Da die jeweiligen Abweichungen bei geschickter Wahl der Stablängen stets gering ausfallen, handelt es sich meist nur sehr kleine Bohrungen. Mittels solcher „Stimmbohrungen“ lassen sich auch exakt auf gleiche Längenverhältnisse abgestufte Klangstäbe korrekt abstimmen.

Der Einfluss des Längsprofils auf die Verhältnisse der Eigenresonanzen

Im vorangehenden Abschnitt betrachteten wir das Stimmen von Klangstäben ausschließlich unter Berücksichtigung des ersten Teiltones, des Grundtones. Dieser beruht auf der ersten Biegeeigen-schwingung des Stabes. Wir konnten aber nun eingangs zeigen, dass auch die anderen Teiltöne die wahrgenommene Tonhöhe mitbestimmen. Wie soll man diese aber unabhängig voneinander stimmen? Auch hier helfen uns die angeführten Gleichungen zu den Eigenfrequenzen von Rechteckstäben nicht weiter.

Schaut man sich Klangstäbe höher wertiger Instrumente an, so stellt man fest, dass sie auf der Unterseite stark profiliert sind. Beispiele findet man in Abbildung 6.



Abbildung 6: Profilierte Klangstäbe für Vibraphon

Es liegt der Schluss nahe, dass die Profile die einzelnen Eigenfrequenzen unterschiedlich beeinflussen. Bestimmte Tendenzen können wir aus Überlegungen ableiten: In der Nähe der jeweiligen Knotenlinien bewegt sich der Stab in Bezug auf die entsprechende Eigenschwingung nur wenig und wird kaum gebogen. Hier wird ein Materialabtrag (als Teil der Profilierung) die Eigenfrequenz nur wenig beeinflussen. Am Rand des Stabes bewegen sich alle Eigenschwingungen heftig. Ein Materialabtrag wird hier also alle Teiltöne erhöhen; aber alle in gleichem Maße? Für das Stimmen einzelner Teiltöne benötigen wir also weit detailliertere Informationen.

Man könnte diese durch schrittweises Experimentieren gewinnen, nur wäre das sehr mühevoll. Vielleicht hat sich in der Vergangenheit ein Hersteller dieser Mühe tatsächlich unterzogen. Eine Veröffentlichung dazu ist uns allerdings nicht bekannt. Wir wollen vielmehr den Einfluss mittels Computer berechnen und bedienen und als Algorithmus der Methode der finiten Elemente.

Betrachtete man die Unterseite von Klangstäben hochwertiger Instrumente, so fällt stellt man fest, dass stets möglichst gleichmäßige, eher größere Auskehlungen verwendet werden und man auf Bohrungen zum Stimmen eher verzichtet. Notwendige feinere

Materialabtragungen zum Endstimmen werden als kleine, unauffällige Zusatzauskehungen ausgeführt. Die typisch vorgefundenen Auskehungsformen zeigt Abbildung 7

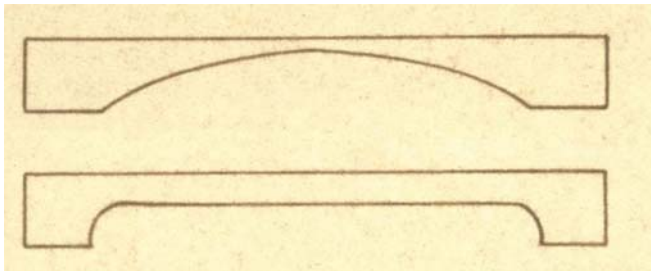


Abbildung 7: Typischen Auskehungsformen von Vibraphonklangstäben

Gehen wir von dieser Gestaltung der Auskehung aus, so sind zwei grundlegende Veränderungen der Auskehung von Interesse: die Gesamtverbreiterung der Auskehung und die symmetrische Verschiebung einer kleinen Zusatzauskehung. Die im Folgenden betrachtete, etwas vereinfachte Situation stellt Abbildung 8 dar.

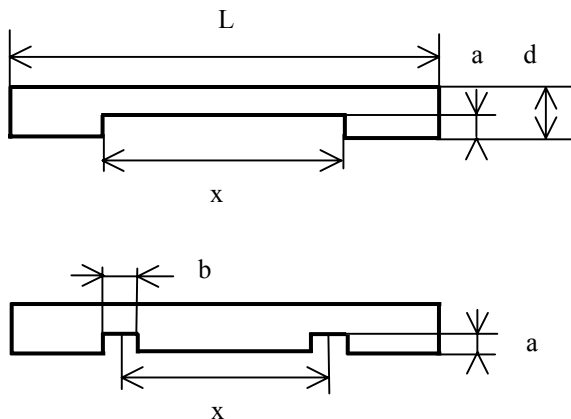


Abbildung 8: Variationen einer vereinfachten Auskehung

Von wesentlichem Interesse ist die Abhängigkeit der einzelnen Teiltonfrequenzen von der Größe x , wobei a und b als Parameter fungieren. Die Modellierung der Variation von x erfolgte zunächst mit einem im IfM von MÜLLER entwickelten FE-Programm für die Berechnung der Eigenfrequenzen von Tonzungen (MÜLLER 1990). In diesem speziellen Programm wird der Stab in Form von 51 Segmenten modelliert, wobei jedem der Segmente ein Dickenwert D , für die Bezeichnung in Abbildung 8 ist $D = d - a$, zugeordnet werden kann. Das Programm berechnet in Abhängigkeit von der eingegebenen Stabgeometrie die Frequenzen der Biegemoden. Nun kann man natürlich entsprechenden mathematischen Modellen ein gewisses Misstrauen entgegenbringen. Ein Test inwieweit Modell und Praxis einander entsprechen, ist für die Bewertung späterer Ergebnisse von variierten Simulationsrechnungen von großem Vorteil. An einem Teststab führten wir die Variation der Auskehung deshalb Schritt für Schritt parallel zur Rechnung durch. Der Stab wies die folgenden Maße und Materialwerte auf. Die angegebenen Abmessungen entsprechen wieder Abbildung 8:

- $L = 224 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$, $a = 4,5 \text{ mm}$
- $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$, $E = 70,82 \text{ GPa}$,

Der Teststab bestand aus der Legierung Al Cu Mg1. Für diese wird in Tabellen ein E-Modul von 67,93 GPa angegeben. Eine eigene Berechnung anhand der gemessenen Eigenfrequenzen der Biegemoden des noch unbearbeiteten Rechteckstabes lieferte jedoch den letztlich verwendeten Wert. Es gilt also immer wieder: „Kontrolle ist besser.“

Die Experimente liefen dann wie folgt ab:

Nach Berechnung und Messung des unbearbeiteten Stabes wurden in den Stab und sein Modell jeweils in der Mitte eine rechteckige Auskehung über die gesamte Breite von $1/51$ der Stablänge und einer Tiefe von 4,5 mm eingebracht. Diese Auskehung verbreiterten wir bei jedem Schritt um $1/51$ nach beiden Seiten.

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Verläufe der gemessenen und berechneten Werte der Verhältnisse der Biegeeigenfrequenzen der Stäbe $f_n/f_1(x)$ und $f_n(x)/f_n(x=0)$ in Abhängigkeit der Auskehungslänge x .

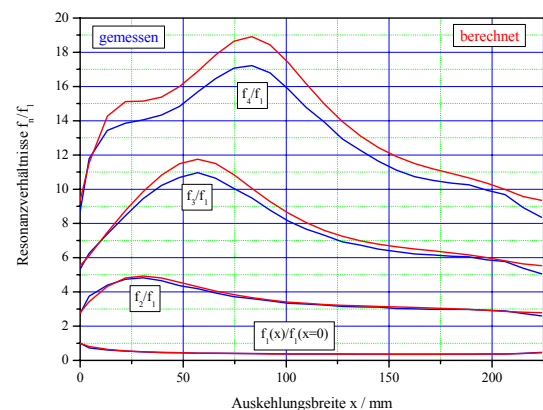


Abbildung 9: Verlauf $f_n/f_1(x)$ für Teststab berechnet und gemessen im Vergleich

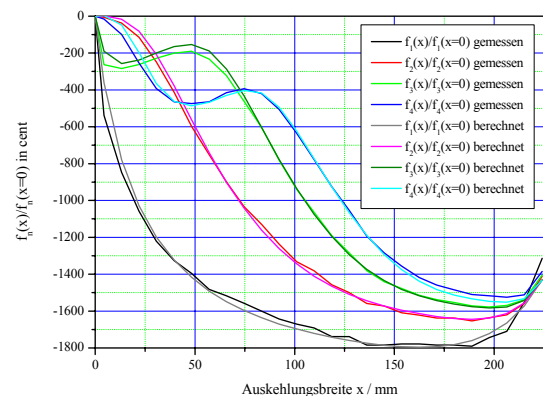


Abbildung 10: Verlauf $f_n(x)/f_n(x=0)$ für Teststab berechnet und gemessen im Vergleich

Man erkennt, dass Messung und Berechnung in Hinblick auf Tendenzen des Verlaufes der Kurven sehr gut übereinstimmen, in Details jedoch auch deutliche Differenzen auftreten. Umfangreiche Tests ergaben für die Biegeeigenfrequenzen f_n Differenzen zwischen Messung und Rechnung im Bereich 2 % bis 7 %. Dies entspricht cent-Werten zwischen 40 und 120. Für die Frequenzverhältnisse f_n/f_1 fanden wir Abweichungen zwischen 2,5 % und 9 % (46 ... 160 cent). Ursachen für die Fehler lagen zum einen in

Ungenauigkeiten bei Fräsen der Auskehlung, sie verursachen ca. 35 cent ... 40 cent und Fehlern in der Frequenzmessung, bedingt durch die Messapparatur, in der Größenordnung von 50 cent. Somit kann man den Berechnungen ein hohes Maß an Vertrauen schenken.

Es konnten also nun eine Reihe von Berechnungen zum Studium der Wirkung von Auskehlungen an Klangstäben auf die Teiltonverhältnisse vorgenommen werden. Für einen Stab der Abmessungen

- $L = 284 \text{ mm}$, $d = 6 \text{ mm}$, a variabel
- $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$, $E = 67,93 \text{ GPa}$

werden sie nachfolgend dargestellt. Die Modellrechnungen umfassten wieder die schrittweise Vergrößerung der Auskehlung und zwar für die Auskehlungstiefen $a = 2,5 \text{ mm}$, $a = 1,5 \text{ mm}$ und $a = 3,5 \text{ mm}$. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 11.

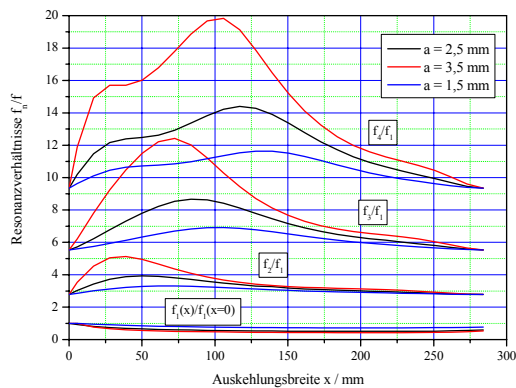


Abbildung 11: Ergebnisse der Berechnungen für eine schrittweise Verbreiterung verschieden tiefer Auskehlungen

Weiterhin wurde die symmetrische Verschiebung eines symmetrischen Auskehlungs-paares (vergleiche Abbildung 8) einer Breite von $11,1 \text{ mm}$ ($= 2/51$ der Länge) und einer Tiefe $a = 2,5 \text{ mm}$ simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

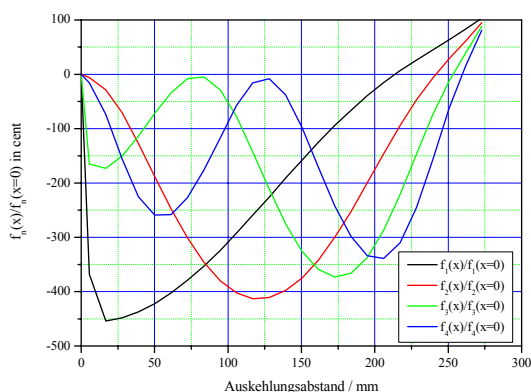


Abbildung 12: Ergebnisse der Berechnungen der Biegeeigenfrequenzen für eine Verschiebung eines Auskehlungs-paares

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen, dass man anhand der Verläufe der Frequenzverhältnisse Grundauskehlungen auswählen, bzw. durch gezielte Berechnungen z. B. mit nicht rechteckigen Auskehlungsformen entwickeln kann, die die

gewünschten Frequenzverhältnisse von Eigenschwingungen und damit Teiltönen hervorbringen. Für das Feinstimmen muss man sich am Verlauf der Teiltonveränderungen für kleine Auskehlungen orientieren um eine geeignete Bearbeitungsstelle zu wählen. Es liegt nahe, die Stäbe in der Vorstimmung etwas zu hoch auszuliegen, wenn man sich beim Feinstimmen auf Materialabtrag im inneren Bereich der Auskehlung bzw. auf geringfügiges Verbreitern der Auskehlung beschränken will.

Finite Element Berechnungen an Klangstäben

Bereit die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Berechnungen führten wir mit einem FE-Programm aus. Dies war jedoch sehr einfach aufgebaut und simulierte den Stab mittels eindimensionalen Elementen. Die Arbeiten fanden Mitte der 1980er Jahre statt. Nach einer längeren Pause wurden 1990/1991 die Versuche zur Berechnung von Klangstäben mit neuen, verfügbaren FE-Werkzeugen fortgesetzt. Wir erstellten entsprechende FE-Modelle mit Hilfe der Systeme GITRA und TPS10. Das GITRA-Modell besteht aus 68 Dreieckselementen (Scheibe-Platte) mit 54 Knoten (Abbildung 13).

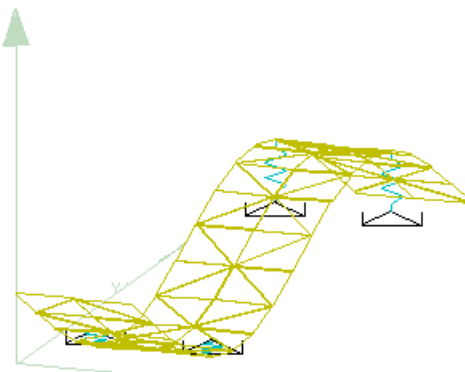


Abbildung 13: GITRA-Modell eines Klangstabes – Darstellung der berechneten zweiten Biegemode

Da bei GITRA keine frei-frei-Schwingung vorgesehen ist, wurde der Stab im Modell auf vier sehr weichen Federn gelagert. Man kann dies in der Abbildung gut erkennen. Die vier Federn „stören“ das eigentliche Stabmodell nur wenig. Wir erhalten lediglich zusätzliche Starrkörperbewegungen, d.h. der Stab schwingt starr als Ganzes auf den Federn. Diese Ergebnisse werden einfach ignoriert. Als Materialdaten wurden die bereits bei den früheren Berechnungen Werte für AlCuMg1 verwendet:

- $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$, $E = 70,63 \text{ GPa}$, $\nu = 0,34$.

GITRA-Berechnungen bilden auch die Grundlage für Abbildung 5. Das TPS10-Modell bestand aus 204 Viereckelementen (Schalenelement 134) mit 335 Knoten. Es erfolgte eine direkte Berechnung des freien Stabes. Die Abweichungen zwischen den am Vorbildstab gemessenen Teiltonfrequenzen und den berechneten Biegeeigenfrequenzen liegen für beide Systeme im Bereich 1% ... 2%. Wesentliche neue Erkenntnisse im Vergleich zu den Berechnungen mit dem sehr einfachen System ergaben sich nicht.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigten eindeutig, dass man mit hinreichend optimierten FE-Modellen die Frequenzen der ersten Biegemoden (Teiltöne) auf etwa 30 cent genau berechnen kann. Unter Berücksichtigung immer auftretender Material- und Fertigungstoleranzen sollte man die Stabgeometrie so auslegen, dass sich alle Teiltonfrequenzen nach der Vorfertigung im Bereich

30 cent ... 50 cent über den gewünschten Sollwerten bewegen. Auf ein abschließendes Feinstimmen kann offensichtlich nicht verzichtet werden.

Temperatur- und Luftfeuchteabhängigkeit der Stimmung von Stabspielen

Mit der Zielstellung Anforderungen an die Klimastabilität in den Arbeitsräumen der Stimmer von Stabspielen zu formulieren, wurde die Abhängigkeit der Stimmung von Stabspielen vom Raumklima untersucht. Dazu wurden Klangstäbe verschiedenen Klimabedingungen ausgesetzt und nach Einstellen der Gleichgewichtszustände jeweils die Stimmung gemessen. Aus den Werten kann auf die Abhängigkeit der Stimmung vom Klima geschlossen werden. Die Temperatur variierte in den Versuchen im Bereich 0°C ... 40°C und die relative Luftfeuchte im Bereich 40 % ... 95 %.

Die Stimmung der Metallklangstäbe sinkt mit steigender Temperatur und zwar in Abhängigkeit von ihren Abmessungen. Es gilt in guter Näherung:

- Vibraphonklangstäbe -0,4 cent/grd
- Metallophonklangstäbe -0,5 cent/grd.

In der ehemaligen DDR galt die TGL 38862. In ihr wird der Normstimmton mit a^1 entspricht 440 Hz bei 23°C und 60 % rel. Luftfeuchte angegeben. In einigen Staaten gilt die ISO 16 (Januar 1975). Hier werden der Normstimmton ebenfalls mit 440 Hz für a^1 festgelegt, jedoch keine Umgebungsbedingungen dazu festgelegt. Unabhängig davon auf welchen Normstimmton man nun stimmt, sollte ein vorgegebenes Klima Stimmen eingehalten werden. Für eine maximale Fehlertoleranz von ± 5 cent und der Annahme, dass der Stimmer sonstige Fehler im Bereich ± 2 cent verursacht, muss eine Klimakonstanz von

- $T = 23^\circ\text{C} \pm 6$ grad

eingehalten werden. Die Luftfeuchtigkeit braucht bei üblichen Metallklangstäben nicht beachtet zu werden. Um der Erwärmung der Klangstäbe beim Stimmen entgegenzuwirken, sollte ein entsprechend temperiertes Wasserbad für das Lagern von Metallklangstäben zwischen Bearbeitung und Messung bzw. bis zum nächstem Bearbeitungsschritt zur Anwendung kommen.

Xylophonklangstäbe reagieren ebenfalls mit sinkender Stimmung auf steigende Temperatur. Die Reaktion ist stärker als bei Metallklangstäben. Bei konstant gehaltener Luftfeuchte stellten wir eine Abhängigkeit von

- Xylophonklangstäbe -1 cent/grd

fest. Holzklangstäbe reagieren nun auch auf Veränderungen der Luftfeuchtigkeit. Bei steigender Luftfeuchte sinkt die Stimmung ebenfalls. Zwischen 40 % und 60 % rel. Luftfeuchte liegt näherungsweise eine lineare Abhängigkeit von

- Xylophonklangstäbe -0,6 cent/% rel. Luftfeuchte (im Bereich 40 % und 60 %)

vor. Danach steigt der Einfluss der Luftfeuchte exponentiell an. Zwischen 70 % und 80 % rel. Luftfeuchte sinkt die Stimmung um etwa 17 cent. Geht man bei Xylophonen von einer Genauigkeitsforderung an die Stimmung von ± 10 cent aus, so müssen folgende

Forderungen an das Stimmraumklima für Xylophone gestellt werden:

- $T = 23^\circ\text{C} \pm 3$ grad
- Rel. Luftfeuchte = 60 % ± 10 %

Die größere Toleranz hinsichtlich der Stimmgenauigkeit bei Xylophonen ist durch die deutlich kürzere Klangdauer und damit die eingeschränkte Tonhöhenwahrnehmung durch den Menschen gerechtfertigt.

Hintergrund

Die geschilderten Arbeiten führte der Autor mit Unterbrechungen im Zeitraum 1982 bis 1990. Eine Veröffentlichung erfolgte seinerzeit nicht. Abbildung 14 zeigt die seinerzeit für die Untersuchung des von Klangstäben abgestrahlten Schalls verwendete Messapparatur. Am rechten Bildrand sieht man auch einen Resonanzkasten mit Klangstab. Die Anordnung wirkt aus heutiger Sicht schon recht angestaubt. Die erzielbaren Resultate waren aber auch für moderne Verhältnisse sehr genau.



Abbildung 14: Messplatz IfM um 1982

Jedoch dauerten einzelne Messungen erheblich länger, als bei aktuellen digitalen Messsystemen.

Auch wenn die Arbeiten selbst keinen aktuellen Status besitzen, so sind doch die Ergebnisse auch heute für die Beschäftigung mit Klangstäben und Stabspielen aus welchem Beweggrund auch immer, bedeutungsvoll.

Wenn man sich mit Stabspielen beschäftigt, sei auf jeden Fall auf die Arbeit von BORK 1983 verwiesen. Auch ROSSING 1990/1991 schreibt ausführlich zu Stabspielen. In wesentlichen Aussagen, insbesondere zur hier behandelten Stimmungsproblematik aber auch in Hinblick auf Resonatoren bezieht er sich allerdings im Wesentlichen auf die Arbeit von BORK.

Literatur

- Bork, I.: **Zur Abstimmung und Kopplung von schwingenden Stäben und Hohlraumresonatoren**, Dissertation Techn Univ. Braunschweig, Fak. f. Maschinenbau u. Elektrotechnik 1983
- Fletcher, N. H.; Rossing, Th. D.: **The Physics of Musical Instruments**, Springer-Verlag New York, Berlin, Heidelberg 1991
- Müller, U.: **FEM – Ein Rechenverfahren zur Optimierung von Tonzungenprofilen**, Instrumentenbau-Zeitschrift 44(1990)9 S.34-38
- Rossing, Th. D.: **The science of sound**, Addison-Wesley Publishing Company Reading, Menlo Park, New York 1990
- Trendelenburg, F.: **Einführung in die Akustik**, Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1961