



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Finite Elemente Methode“ (FEM) für die Berechnung
von Vibrationslasten

verfasst von / submitted by

Lukas Franz Handle, BA

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Arts (MA)

Wien, 2016 / Vienna 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066836

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Musikwissenschaft

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter



„...ohne Musik wäre das Leben ein Irrtum.“ (Nietzsche)

Danksagung

In erste Linie möchte ich mich bei meiner Familie in Tirol, sowie meiner Familie in Wien recht herzlich bedanken. Ohne eure tatkräftige Unterstützung und Motivation hätte ich diese Arbeit nicht verfassen können. Auch während des Studiums bin ich immer von meiner Familie stets unterstützt worden.

Danke Ingrid & Martin, Philip, Katja & Aeneas, Tilla & Sascha, Svea, Julian & Jonah, Daniela, Juliane & Paul und meinen Großeltern Edith & Gerlinde Oma und Franz & Herbert Opa. Diese Arbeit ist euch allen gewidmet.

Danke möchte ich zudem Herrn Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter und Herrn Dr. Ing. Dr. phil. Arnold Esper, die mich mit ihrer fachlichen Expertise immer unterstützt haben. Zudem löstete Herr Esper nicht nur einmal meinen Laptop zusammen, ohne den diese Arbeit nicht geschrieben hätte werden können. Des weiteren gilt ein besonderer Dank meinem langjährigen Chef Herrn Ass.-Prof. Dr. Emil H. Lubej, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und dessen Büro mein Ort des Schreibens war. Herr Jörg Mühlhans, MA hat mir bei Problemstellung der meist besonderen Art die richtigen Tipps und Hilfestellungen gegeben, Matthias Eder, BA und Mag. Lisa Punz, BA haben mein Klagen und Jammern meist in positive Motivation umgewandelt und Imke Oldewurtel, MA hat mich während meinen Pausen am Institut immer unterhalten.

Danke auch an meine Band H2D2, Christoph Dapoz, Bed, Hannes Dapoz, Bsc und Johannes Handle die mich bei unseren Konzerten aus dem universitären Alltag des Schreibens gerissen haben.

Herrn Dr. phil. Daniel Pfurtscheller gilt der Dank des Korrekturlesens meiner Arbeit. Last but not least möchte ich mich auch recht herzlich bei Frau Elisabeth Hofer bedanken, die mich mit der graphischen Erstellung der Vibraphontasten unterstützt hat.

Ohne die Unterstützung von euch allen hätte ich das nicht bewerkstelligen können.

Danke!

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt eines Vibraphonstabes inklusive Bohrung	17
Abbildung 2: Model 145 von Deagan (http://www.deaganresource.com/images/145.jpg , 04.10.2016)	18
Abbildung 3: Musser Modell M45 (http://malletshop.com/product_detail.cfm?prod=392 , 04.10.2016)	18
Abbildung 4: J. C. Deagan (The National Cyclopedia of American Biography, 1961: 390)	20
Abbildung 5: Red Norvo 1935 in New York (NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 166)	21
Abbildung 6: Lionel Hampton (NGroveD of Jazz, 200, Vol. 2, 2001: 142)	22
Abbildung 7: Milt Jackson 1950 in New York (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 343)	23
Abbildung 8: Bobby Hutcherson 2006 in New York (Marvi Lacar, New York Times, 2016)	24
Abbildung 9: Gary Burton (https://www.berklee.edu/news/1749/gary-burton-and-berklee , 21.09.2016)	25
Abbildung 10: Tom Van der Geld, Peter Nimsky, http://www.tomvandergeld.de/seite1_d.htm , 22.09.2016)	26
Abbildung 11: Mike Mainieri (http://nycrecords.com/?page_id=465 , 22.09.2016)	26
Abbildung 12: Wolfgang Schlüter, Privataarchiv	27
Abbildung 13: Werner Pirchner 1980 in Salzburg, von Helmut Frühauf (http://www.altneuland.at/wp/wp07.jpg , 21.09.2016)	28
Abbildung 14: Sinuswelle mit Bezeichnung der Wellenlänge und der Amplitude	32
Abbildung 15: Ausbreitung einer Longitudinalwelle in der Luft (Hall, 2008: 22)	33
Abbildung 16: Ausbreitung einer Longitudinalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)	34
Abbildung 17: Ausbreitung einer Quasi-Longitudinalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)	35
Abbildung 18: Beispiel für die Ausbreitung einer Transversalwelle (Hall, 2008: 22)	36
Abbildung 19: Ausbreitung einer Transversalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)	37
Abbildung 20: Ausbreitung einer Biegewelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)	37

Abbildung 21: Biegewellenphasengeschwindigkeit 1G-6G und auf die Dicke bezogene Biegewellenlänge 1W-6W von homogenen Platten aus verschiedenen Baumaterialien (Cremer, Heckl, 1996: 100)	38
Abbildung 22: Die ersten 6 Moden eines Stabes mit konstantem Querschnitt. Links mit den Randbedingungen x,y-frei, z konstant. Rechts mit den Randbedingungen x,y,z frei.	38
Abbildung 23: Die ersten drei Moden eines Stabes mit konstantem Querschnitt (l.o. – Mode 1, r.o. – Mode 2, m.u. – Mode 3)	42
Abbildung 24: Die ersten fünf Moden einer gestimmten Taste. (Bork, 1995: 109)	43
Abbildung 25: Anwendungsgebiete von FEM (Mathiak; 2010: 1-1)	44
Abbildung 26: Geometrie mit ANSYS vernetzt.	45
Abbildung 27: Berechnung eines Kreises mittels n-Ecken. (Gabbert, ca. 2000: 10)	45
Abbildung 28: Einige mögliche finite Elementtypen des Programms COSAR (Gabbert, ca. 2000: 10)	45
Abbildung 29: Abbildung einer gestimmten Xylophontaste (Bork, 1991: 58)	48
Abbildung 30: Vibraphon von Arnold Esper	52
Abbildung 31: Musser 3.0 Gold Pro Vibraphon (http://www.steveweissmusic.com/product/musser-m55g-gold-pro-vibe/musser , 28.09.2016)	52
Abbildung 32: Kosth K-220 (https://www.chicdeals.net/p/kosth-vibraphone/111991755931 , 28.09.2016)	53
Abbildung 33: Studio49 RVC 4000 (https://www.reisser-musik.de/vibraphon-studio49-rvc-4000/ , 28.09.2016)	53
Abbildung 34: Arcitc Vibe vanderPlas (http://www.vanderplastal.com/ , 28.09.2016)	54
Abbildung 35: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Esper	55
Abbildung 36: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Musser	55
Abbildung 37: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Kosth	56
Abbildung 38: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Studio49	56
Abbildung 39: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Nico von der Plas	57
Abbildung 40: Harmonische Analysen aller Hersteller.	62
Abbildung 41: Harmonische Analyse Esper (Messdaten siehe 9.1)	62
Abbildung 42: Harmonische Analyse Musser (Messdaten siehe 9.2)	63

Abbildung 43: Harmonische Analyse Kosth	63
Abbildung 44: Harmonische Analyse Studio49	64
Abbildung 45: Harmonische Analyse Nico van der Plas	64
Abbildung 46: Vergleich von drei unterschiedlichen Krafteinwirkungen auf eine Vibraphontaste. (Messdaten siehe 9.6)	68
Abbildung 47: FFT (oben) und harmonische Analyse mit ANSYS (unten) von der Vibraphontaste von Musser.	69
Abbildung 48: Vibraphontaste Arnold Esper I	88
Abbildung 49: Vibraphontaste Arnold Esper II	88
Abbildung 50: Vibraphontaste Arnold Esper III (Pfadedatei)	88
Abbildung 51: Vibrapohntaste Musser I	88
Abbildung 52: Vibrapohntaste Musser II	88
Abbildung 53: Vibrapohntaste Musser III (Pfadedatei)	88
Abbildung 54: Vibraphontaste Nico Van der Plas I	89
Abbildung 55: Vibraphontaste Nico Van der Plas II	89
Abbildung 56: Vibraphontaste Nico Van der Plas III (Pfadedatei)	89
Abbildung 57: Vibraphontaste Kosth I	89
Abbildung 58: Vibraphontaste Kosth II	89
Abbildung 59: Vibraphontaste Kosth III (Pfadedatei)	89
Abbildung 60: Vibraphontaste Studio49 I	90
Abbildung 61: Vibraphontaste Studio49 (Pfadedatei)	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiedliche Medien mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit (Kohlrausch et. al, 1996: 325-326)	31
Tabelle 2: Unterschied der Frequenz in Abhängigkeit von der Materialeigenschaft	39
Tabelle 3: Teiltöne einer schwingenden Saiten $f_1=110$ Hz	41
Tabelle 4: Teiltöne eines Stabes mit konstantem Querschnitt $f_1=110$ Hz	41
Tabelle 5: Maße und Aussehen der Vibraphontasten (s. 9.7)	58
Tabelle 6: Mode 1-10 der Taste von Arnold Esper mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.	58
Tabelle 7: Mode 1-10 der Taste von Ludwig-Musser mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.	59
Tabelle 8: Mode 1-10 der Taste von Kosth mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.	60
Tabelle 9: Mode 1-10 der Taste von Studio49 mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.	60
Tabelle 10: Mode 1-10 der Taste von Van der Plas mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.	61
Tabelle 11: Auslenkung der Teiltöne und ihre Differenz in dB.	65
Tabelle 12: Ergebnisse im Überblick der vier relevanten Hersteller	66
Tabelle 13: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Krafteinwirkung (Messdaten siehe 9.6)	68

Abkürzungsverzeichnis

 A – Querschnittsfläche B – Biegesteifigkeit b – Breite c – Schallgeschwindigkeit $c_{FL,G(l)}$ – Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten und Gasen longitudinal $c_{F(l)}$ – Schallgeschwindigkeit in Festkörpern longitudinal $c_{P(l)}$ – Schallgeschwindigkeit in Platten longitudinal $c_{S(l)}$ – Schallgeschwindigkeit in Stäben longitudinal c_T – Schallgeschwindigkeit transversal c_B – Schallgeschwindigkeit von Biegewellen E – Elastizitätsmodul F – Kraft G – Schubmodul h – Höhe Hz – Hertz I – Flächenträgheitsmoment der Querschnittsfläche K – Kompressionsmodul L_p – Schalldruck l – Länge m – Masse pro Längeneinheit M – Longitudinalmodul M' – Molare Masse p – Druck p_T – Gesamtdruck p_0 – Umgebungsdruck p_1 – Druckspannung R – Ideale Gaskonstante S – Fläche [m^2] T – Temperatur V – Volumen η – Verlustfaktor κ – Adiabatenexponent λ – Wellenlänge ν – Poissonzahl, Querkontraktionszahl ρ – Dichte ω – Kreisfrequenz

Inhaltsverzeichnis	
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xi
1. Einleitung	15
2. Das Vibraphon	16
2.1. Allgemein	16
2.2. Geschichte	17
2.2.1. John Calhoun Deagan	20
2.3. Vibraphon im Jazz	20
2.3.1. Red Norvo	21
2.3.2. Lionel Hampton	22
2.3.3. Milt Jackson	23
2.3.4. Bobby Hutcherson	24
2.3.5. Gary Burton	25
2.3.6. Tom (Thomas) Van der Geld	26
2.3.7. Mike Mainieri	26
2.3.8. Wolfgang Schlüter	27
2.3.9. Werner Pirchner	28
3. Schall	30
Exkurs Ideales Gas	30
3.1. Wellenformen	33
3.2. Longitudinalwellen	33
3.3. Quasi-Longitudinalwellen	35
3.4. Transversalwellen	36
3.5. BiegeWellen	37
4. Biegeresonanz von Stäben	40
4.1. Stäbe mit konstantem Querschnitt	40
4.2. Stäbe mit veränderlichem Querschnitt	42
5. Finite Elemente Methode (FEM)	44
5.1. Einführung	44
5.2. Geschichte	46
6. Methode und Ergebnisse	48
6.1. Processing	49

6.1.1. Modalanalyse	50
6.2. Auswertung der numerischen Modal- und harmonischen Analyse	50
6.2.1. Die Hersteller	52
6.2.2. Modalanalysen	55
6.2.3. Harmonische Analysen	62
6.3. Vergleich der Ergebnisse	65
6.4. Vergleich von unterschiedlichen Kräften	67
6.5. Numerische versus experimenteller Modalanalyse	69
7. Conclusio	71
8. Literaturverzeichnis	73
Internetquellen	75
9. Appendix	78
9.1. Messdaten Abbildung 41	78
9.2. Messdaten Abbildung 42	79
9.3. Messdaten Abbildung 43	80
9.4. Messdaten Abbildung 44	82
9.5. Messdaten Abbildung 45	83
9.6. Messdaten Abbildung 46	84
9.6.1. Kraft von 10 Newton	84
9.6.2. Kraft von 100 Newton	86
9.6.3. Kraft von 1000 Newton	86
9.7. Bilder	88
Abstract	91

1. Einleitung

Die vorliegende Masterarbeit „Finite Elemente Methode (FEM) für die Berechnung von Vibraphontasten“ beschäftigt sich wie aus dem Titel schon ersichtlich mit dem Thema Vibraphon und dem Thema der FEM.

Da diese Arbeit in Zuge meines Studiums am Institut für Musikwissenschaft verfasst wurde, ist die FEM eine Methode, die bei der Berechnung angewendet wurde und als solche physikalisch, mathematisch nicht hinterfragt wurde. Die FEM wird einleitend in Kapitel 5 mit einem kurzen Überblick sowie einem kurzen geschichtlichen Abriss beschrieben. FEM stellt ein komplexes Verfahren dar, um Geometrien und deren Schwingungsverhalten numerisch zu lösen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der FEM und nicht mit der Methode per se.

Dem Vibraphon ist der größere Teil dieser Arbeit gewidmet. Zum einen wird das Vibraphon, seine Erfindung und Weiterentwicklung skizziert, zum anderen bekannte Vibraphonisten und deren unterschiedlichen Spieltechniken erwähnt. Das Vibraphon findet nicht nur Anwendung im Jazz, sondern auch in der Klassik. Beispiele für die Anwendung in der klassischen Musik werden gegeben, jedoch liegt der Fokus auf der Verwendung im Jazz. Neben der theoretischen Abhandlung gibt es konkrete Simulationen und Messungen der Vibraphontasten von fünf unterschiedlichen Herstellern. Diese Ergebnisse werden einzeln aufgelistet und miteinander verglichen. Zudem wird versucht, einen Ausblick über weiterführende Forschungen zum Thema Vibraphon zu geben. Um in das Thema zusätzlich einzuführen werden Grundlagen der Akustik im Allgemeinen und Grundlagen der Eigenschaften von Wellen im Speziellen in Kapitel 3 und 3.1 beschrieben. Für die Ermittlung der Tonhöhen und deren Abweichungen in Cent, wie zum Beispiel in Tabelle 6, wurde die Frequenztafel von Helmut Seidl (1970) herangezogen.

Alle in der Arbeit erwähnte Eigenmarken, Produkte, Programme und sonstige eingetragenen Marken sind urheberrechtlich geschützt. Die erforderlichen Rechte für Abbildungen und Fotos wurden versucht soweit wie möglich einzuholen. Sollte mir dennoch eine Urheberrechtsverletzung unterlaufen sein, bitte ich dies zu melden und zu entschuldigen!

2. Das Vibraphon

2.1. Allgemein

Das Vibraphon zählt zu der Instrumentengruppe der Idiophone und gehört zur Familie der Metallophone. Zur genaueren Systematisierung finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. Nach Hornbostel und Sachs (1914) ist das Vibraphon nach 111.222¹ zu systematisieren. In der MGG₂ (2008) wird das Vibraphon, wie das Marimba oder Xylophon, als Stabspiel klassifiziert, welche nach Hornbostel und Sachs (1914) in zwei unterschiedliche, feiner aufgegliederte Gruppen unterteilt wird (vgl. Xylophon, 111.212²).

Das Vibraphon wird in den USA auch als Vibraharp oder nur als Vibes bezeichnet. Beide Namen gehen auf bis heute existierende Markennamen von zwei konkurrierenden Firmen zurück. Vibra-bells, Vibra-celeste und Harpaphone waren unter anderem auch Markennamen, die jedoch nur von kurzer Dauer waren (Trommer, 1995: 339; Rossing, 2008: 66; Holland; 1994: 201).

Das Vibraphon verdankt seinen charakteristischen Klang dem Material aus dem es gefertigt ist – meist eine Aluminiumlegierung – ,der daraus resultierenden langen Nachhallzeit und den Resonatoren unter den Stäben mit eingebauten Klappen, welche über einen Motor angetrieben werden und unterschiedlich schnell rotieren können. Die Nachhallzeit (RT60) für eine Vibraphontaste bei 200Hz (A3) ohne Resonator beträgt nach Fletcher, Neville und Rossing (1998) 40s und mit geöffneten Resonatoren 9s. Dem daraus entstehenden vibrato-ähnlichen Klang verdankt das Vibraphon seinen Namen. Die Klangstäbe werden ähnlich einer Klaviertastatur in zwei Reihen angeordnet und besitzen an zwei Stellen, an denen sich Schwingungsknoten bilden, eine waagrechte Bohrung (vgl. Abbildung 1). Durch diese Bohrung werden die Stäbe mit einer Schnur aufgereiht und liegen zwischen Gummistützen auf einem meist fahrbaren Gestell (Fletcher et al., 1998: 638; Montagu, 2002: 158).

¹ (1) Idiophone, (11) Schlagidiophone, (111) Unmittelbar geschlagene Idiophone, (111.2) Aufschlag-Idiophone, (111.22) Aufschlagplatten, (111.222) Schlagplattenspiele. (Hornbostel, Sachs, 1914:563-564)

² (111.21) Aufschlagstäbe, (111.212) Schlagstabspiele. (ebenda)



Abbildung 1: Querschnitt eines Vibraphonstabes inklusive Bohrung

Das Vibraphon wird mit zwei respektive vier speziellen Schlägeln gespielt. Diese Schlägel besitzen je nach Material unterschiedliche Härtegrade und bestehen aus einem Kern aus Gummi, Kunststoff oder Holz mit einer mehr oder weniger dicken Umwicklung aus Wollfaden oder Filz. Durch die unterschiedlichen Härtegrade können feine Klangunterschiede erreicht werden (Montagu, 2002: 160).

Der Tonumfang bei Vibraphonen beträgt üblicherweise drei Oktaven F3 bis F6 ($f = 175 - 1397 \text{ Hz}$), jedoch gibt es auch Instrumente mit größerem Tonumfang von C2 bis C7 oder C#3 bis B4. Ersteres wird für „Elegy for young lovers“, eine Oper von Hans Werner Henze benötigt, letzteres für Alban Bergs „Lulu“ (Trommer, 1995: 340; Fletcher, Neville, Rossing, 1998: 638). Neben der Anwendung in der Klassik findet das Vibraphon hauptsächlich seinen Einsatz im Jazz (s. Kapitel 2.3).

2.2. Geschichte

Die Entwicklung des Vibraphons begann ungefähr 1916 mit Herman Winterhoff von „Leedy Manufacturing Company“ in Indianapolis. Er experimentierte mit Motoren um einen vox humana Effekt bei einem aus Stahl gefertigten Marimba zu generieren. 1922 war Winterhoff erfolgreich mit seinem Vorhaben und 1924 fanden die ersten Aufnahmen mit Louise Frank Chiha „Aloha Oe“ und „Gypsy Love Song“ statt, welche ein großes Interesse unter Musikern und Musikerinnen und Publikum hervorrief. In diesem Jahr wurde zudem der Name Vibraphon geprägt:

„George H. Way, Leedy sales and advertising manager, had earlier coined the name ‘vibraphone,’ which was adopted in 1924 for the first promotional literature on the instrument.“ (Trommer, 1995: 340)

Bis Herbst 1927 wurden ca. 25 Stück des Leedy Vibraphons gefertigt, ehe die Produktion unterbrochen wurde. Im April desselben Jahres wurde von John Calhoun Deagan die „Vibraharp“ vorgestellt, welche maßgeblich von Henry J. Schluter (Chefingenieur) entwickelt wurde. Die ersten Modelle gelten als Vorbild für das später berühmt gewordene Model 145 (Trommer, 1995: 340).



Abbildung 2: Model 145 von Deagan
(<http://www.deaganresource.com/images/145.jpg>, 04.10.2016)

„This model, with its cord-suspended, half-inch-thick, graduated-width, tempered-aluminium tonebars with harmonic tuning, had a pedal-operated damper and adjustable vibrato speed. Introduction of the three octave f-f³ Model 145 firmly established the Deagan vibraharp as the significant new musical instrument, which became the basic design concept for all future instruments of this type.“ (Trommer, 1995: 340)

Aufgrund der hohen Nachfrage setzte die Leedy Company ihre Produktion 1928 fort und Deagan entwickelt 1929 zwei weitere Modelle, welche kleiner und transportabler waren. Die grundsätzliche Struktur von Vibraphonen änderte sich seit 1927 nur noch marginal. Clair Omar Musser, ein früher Entwickler bei Deagan, gründet 1948 sein eigenes Unternehmen „Musser Marimbas, Inc.“ und wurde zu einem der größten Konkurrenten von Deagan. Die ersten Modelle von Musser waren das M75 „Century“ und M45 „One-Nighter“, letzteres wurde 1964 entwickelt und wurde hauptsächlich durch Gary Burton bekannt (Trommer, 1995: 343).



Abbildung 3: Musser Modell M45
(http://malletshop.com/product_detail.cfm?prod=392, 04.10.2016)

Neuerung im Vibraphonbau gab es ab den 1960ern: Deagan experimentierte mit Verstärkungen und elektronischen Manipulationen der Klänge. 1962 wurde das erste verstärkte System „Magni-Sound“ vorgestellt, welches mit einigen Problemen zu kämpfen hatte (Holland, 1994: 204).

„A small crystal microphone embedded in each resonator gave the vibraphone player pure sound and adjustable volume from his instrument, along with problems of ambient sound amplification, feedback, and delicate components.“ (Trommer, 1995: 341)

Diese Entwicklungen wurden von Deagan und Musser weiter verfolgt bis schließlich 1970 Deagan das Electravibe präsentierte. Die neuen Pickups bestanden aus kleinen

Piezo-Chips, mit denen es besser gelang den Klang zu verstärken, die Lautstärke zu ändern sowie Balance zu steuern. 1989 wurde ein System mit magnetischen Pickups präsentiert, welches zudem in der Lage ist den Input über ein digitales Interface zu steuern und somit das Vibraphon als Steuerung für andere elektronische Sounds verwenden kann (Trommer, 1995: 342). Für neuer Entwicklungen am Vibraphon zeichnet sich der niederländische Hersteller vanderPlas (1999) aus, welcher eine Reihe von Neuerungen am Vibraphon umsetzt (s. Kapitel 6.2.1.5).

Die ersten Hersteller neben J. C. Deagan Inc. und Leedy Manufactures Company waren:

- G. C. Jenkins Company (JenCo), Decatur, Illinois
- Ludwig & Ludwig, Chicago, Illinois
- Premiere Drum Company and Boosey & Hawkes Ltd. (Ajax), England.

Hersteller, die nach dem 2. Weltkrieg hinzukamen:

- Musser Division/Ludwig Industries, LaGrange, Illinois
- Ross Mallet Instruments, Inc., Chippewa Falls, Wisconsin
- vanderPlas, Niederlande
- Trixon und Studio 49, Deutschland
- Galanti, Italien
- Bergerault, Ligueil, Frankreich
- Koth Company, Saito Musical Instruments und Nippon Gakki Company, Ltd. (Yamaha), Hamamatsu, Japan (Trommer, 1995: 342).

2.2.1. John Calhoun Deagan



Abbildung 4: J. C. Deagan
(*The National Cyclopedia of American Biography*, 1961: 390)

John Calhoun Deagan (1853-1934) ist eine der wichtigsten Persönlichkeiten im Bereich der Stabspiele, speziell für die Entwicklung des Vibraphons. Deagan war gelernter Konzertklarinetrist und während seiner Tätigkeit in einem Theaterorchester stets mit der Intonation der aus Deutschland importierten Glockenspiele unzufrieden. Aufgrund dessen beschäftigte er sich fortan mit der Akustik und dem Stimmen von Glockenspielen, sowie der Studie von Hermann Helmholtz und dessen Publikation „On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music“ (1862). Deagan

gelangt es, das erste gestimmte Glockenspiel zu entwerfen, das den Beginn einer langen und erfolgreichen Karriere darstellen sollte. 1898 gründete er seine Firma und kam über Umwege schlussendlich nach Chicago. Er entwickelte eine Vielzahl an Instrumenten das Xylophon, mehrere Arten von Chimes, Glocken für Orchester und die Vibraharp (*The National Cyclopedia of American Biography*, 1961:391-392; Strain, 1999).

1910 bei der jährlichen Versammlung der „American Federation of Musicians“ war er maßgeblich daran beteiligt, dass der Kammerton A=440 Hz als Standard für Orchester in den USA herangezogen wurde. Nach Deagans Tod wurde das Unternehmen von seiner Schwiegertochter (Ella Smith Deagan) übernommen und blieb bis zum Verkauf an Slingerland Drum Company 1978 in Familienbesitz. Heute gehört das Unternehmen und seine Patente der Yamaha Gruppe (*The National Cyclopedia of American Biography*, 1961:391-392; Strain, 1999).

2.3. Vibraphon im Jazz

Das Vibraphon erfreute und erfreut sich nach wie vor großer Beliebtheit vor allem im Jazz. Zwei Ereignisse zwischen 1930-1931 trugen maßgeblich zum Erfolg des Vibraphons bei. Der Saxophonist Adrian Rollini (1904-1956) fügte seinem Jazz-Quartett die 145 Vibraharp hinzu und brachte damit vielen Jazzmusikern der damaligen Zeit, den Klang und Sound, des Vibraphons nahe. Neben Rollini gelten vor allem Lionel Hampton (1908-2002), Red Norvo (1908-1999) und später Milt

Jackson (1923-1999) als Pioniere des Vibraphonspiels im Jazz (Trommer, 1995: 342; Berendt, 1989: 348).

„Lionel Hampton (b. 1909)³ [sic!], then a young drummer in the Les Hite Band, was “follin’ around” with a vibraharp when Louis Armstrong (1898-1971), fronting the band at the time, heard the “fascinating” sound.”
(Trommer, 1995: 342)

Speziell in den 1960er Jahren erfreute sich das Vibraphon großer Beliebtheit unter Musizierenden sowie dem Publikum. Dafür maßgeblich verantwortlich waren drei innovative Gruppen, die Martin-Denny-Gruppe, die Arthur-Lyman-Gruppe und die Gene-Rains-Gruppe aus Hawaii, die mit ihrem „exotischen“ Sound die Weltmusik und Jazz-Szene eroberten. Daraus resultierend fand das Vibraphon allmählich Einzug in Bildungseinrichtungen und zählt heute als Standardinstrument an den meisten Schulen, Konservatorien und Universitäten, die ein Studium von Perkussionsinstrumenten anbieten. Zudem wurden die ersten Lehrbücher, qualitativ hochwertige Unterrichtsmaterialien sowie Notentranskriptionen publiziert, die dazu beitragen, dass sich die Spieltechniken am Vibraphon ständig weiterentwickelten (Trommer, 1995: 343). Im Folgenden werden einige wichtige Vibraphonisten im Jazz erwähnt, sowie Bezug zu einem österreichischen Vibraphonisten hergestellt. Auf Vollständigkeit wird verzichtet, da dies den Rahmen der Arbeit bei weitem sprengen würde.

2.3.1. Red Norvo



Abbildung 5: Red Norvo
1935 in New York
(NGroveD of Jazz, Vol. 3,
2001: 166)

Red Norvo – Norville Joseph Kenneth – wurde am 31. März 1908 in Beardstown geboren. Er war gelernter Xylophonist und Marimbaspielder, und hatte von Kindesalter an Klavier gelernt. Diese instrumentale Herkunft von Norvo macht sie auch in seinem Vibraphonspiel bemerkbar. Im Gegensatz zu Lionel Hampton, der das Vibraphon perkussiv spielt, spielt Norvo auf sehr pianistische Weise. Er war noch vor Hampton der Erste, der das Vibraphon einsetzte, jedoch aufgrund des

³ Fälschlicherweise wird oft 1909 als Geburtsdatum von Lionel Hampton angegeben, er wurde allerdings am 20. April 1908 in Louisville, Kentucky geboren (NGroveD of Jazz, 2001: 142).

noch fehlenden Dämpferpedals nur sehr selten. Zudem verwendete er das Vibraphon oft ohne den Vibrato-Effekt (NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 165-167).

„He usually played vibraphone without vibrato, producing a sharply articulated sound, almost like a xylophone; by contrast he was occasionally heard using a shimmering sound, with the instrument’s motorized vibrato rotating at full speed, [...]“ (NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 166)

Als Beispiel für die im Zitat erwähnte volle Motorleistung kann der erste Chorus seines Stückes „The Man I love“ von 1944 herangezogen werden. Norvo spielte ebenfalls wie Hampton mit den Größen seiner Zeit im Jazz und gilt als führende Kraft für die Entwicklung des Cool Jazz. Norvo starb im Alter von 91 Jahren am 6. April 1999 (NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 165-167).

2.3.2. Lionel Hampton



Abbildung 6: Lionel Hampton (NGroveD of Jazz, 200, Vol. 2, 2001: 142)

Lionel Hampton wurde am 20. April in Louisville, Kentucky geboren. Er führte gemeinsam mit Red Norvo das Vibraphon im Jazz ein. Durch Luise Armstrong ermutigt, war Hampton 1931 für die erste Vibraphonaufnahme im Cotton Club während einer Recording Session verantwortlich. Hampton hatte bei seinen Auftritten oft ein opulentes Orchester bestehend aus Trompeten, Posaunen und Saxophone im Hintergrund (Trommer, 1995: 342; Berendt, 1989: 348).

„Diese Orchester spielen oft unbekümmert um Intonation, Homogenität und Präzision drauflos, aber der Vibraphonist Lionel Hampton gewinnt durch die rhythmischen »riff«-Orgien seiner Big Bands Inspiration und noch mehr Feuer und Kraft, als er ohnehin schon besitzt.“ (Berendt, 1989: 348)

Hampton, der eigentlich als Schlagzeuger begonnen hatte, spielte das Vibraphon auf sehr perkussive Art und Weise und komponierte seine besten Songs mit dem Goodman Quartet von 1936 bis 1940. Seine wohl bekanntesten Riffs sind „Flying Home“, „Down Home Jump“ und „Hey Ba-ba-rebop“. Er spielte mit einer Reihe von namhaften Jazzmusikern zusammen, studierte Musiktheorie an der University of Southern California, war politisch sehr interessiert, engagierte sich aktiv für

obdachlose Menschen und erhielt zahlreiche Auszeichnungen und Ehrungen. Zudem veröffentlichte er als Autor „Method for Vibraharp, Xylophone and Marimba“ (New York, 1967) und gemeinsam mit J.-C. Forestier, „The New Lionell Hampton Vibraphone Method“ (Zürich, 1981). Lionel Hampton starb im Alter von 94 Jahren am 31. August 2002. Seine Art das Vibraphon zu spielen bleibt jedoch für immer erhalten (Berendt, 1989: 348; NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 142-144; Liebmann, 2002).

2.3.3. Milt Jackson



Abbildung 7: Milt Jackson 1950 in New York (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 343)

Milt Jackson wurde am 1. Jänner 1923 in New York geboren. Schon mit 7 hat er begonnen Gitarre und Klavier zu spielen und ab 11 Jahren Vibraphon, Violine, Xylophon u.a. War es für Hampton Louise Armstrong und Benny Goodman, die ihm bei seiner Laufbahn als Musiker unterstützen, so war es für Jackson Dizzy Gillespie, ein Musiker von gleichem Rang und Namen wie Armstrong und Goodman. Dieser nahm ihn 1945 mit seiner Band auf Tour, um ihn anschließend als fixes Mitglied der Gillespie Big Band zu engagieren. Den wohl aus heutiger Sicht wichtigsten Schritt tat Jackson 1952 mit der Gründung des Modern Jazz Quartet (Berendt, 1989: 349; NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 343).

„Jackson was one of the first vibraphonist to master the bop style, and is generally regarded as one of the finest vibraphonists in Jazz. His improvisations exhibit great rhythmic variety, with sudden outbursts of short notes often adjoining languid, sustained phrases.“ (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 343)

Zudem spielt Jackson mit einer sehr langsamen Drehbewegung der Klappen im Vergleich zu Hampton und Norvo. Einige seiner bekannten Jazzstücke sind „Bluesology“, „Bags‘ Groove“, „The Cylinder“, „Ralph’s New Blues“ u.v.m. Jackson starb im Alter von 76 Jahren 1999 in New York (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 343).

2.3.4. Bobby Hutcherson



Abbildung 8: Bobby Hutcherson 2006 in New York (Marvi Lacar, New York Times, 2016)

Bobby (Robert) Hutcherson wurde 1941 in Los Angeles geboren. Als Jugendlicher, vor allem durch Milt Jackson beeinflusst, begann er das Vibraphon für sich zu entdecken.

Über mehrere Stationen und Engagements kam er 1961 nach New York und wurde von Jackie McLean für „One Step Beyond“ engagiert. Im Gegensatz zu Gary Burton, der zu jener Zeit die Spieltechnik mit vier Schlägeln perfektionierte, spielte Hutcherson meist mit nur zwei Schlägeln. Er bekam ein Engagement im Birdland Jazz Club in New York (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 302; Kampmann, Jost, 2009: 258).

„Hutcherson traveled east with the Grey-Mitchell sextet for an engagement at Birdland New York, where he was acclaimed for his full, fresh sound on an instrument that was still a rarity in jazz.“ (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001:302)

Hutcherson hatte eine lange und erfolgreiche Karriere und spielte mit unterschiedlichsten Jazzmusikern zusammen auf der Bühne, zudem begann er in den 1970er als Studiomusiker und lernte Marimba. Während dieser Zeit entstanden einige eigene Alben, mit welchen er auf sich aufmerksam machte, „Un Poco Loco“ (1979), „Four Seasons“ (1983), „In The Vanguard“ (1986) und „Skyline“ (1999). Hutcherson zählt neben Gary Burton, wohl zu den einflussreichsten, „neuen“ Vibraphonisten im modernen Jazz.

„Er hat das Milt Jackson-Erbe am stärksten weiterentwickelt, souverän Coltrane und den neuen Vibraphonklang einbeziehend. Er ist ein ungeheuer »kompletter« Spieler, der beide Möglichkeiten des Instruments in seinen Linien vereinigt: sowohl die perkussiven als auch die pianistischen. Seine Fähigkeiten, dem Vibraphon jene Starrheit und mechanische Ader zu nehmen, [...] ist mitreißend. Und er ist ein Zauberer der Anschlagkultur, aufregend vielfältig in der Kunst des emotionalen Formens und »Knetens« des Vibraphon-Tones.“ (Berendt, 1989: 350-351)

Bis 2014 veröffentlichte er noch mehrere Alben unter anderem mit Herbie Hancock (Klavier) oder David Sanborn (Altsaxophon). Bobby, Robert Hutcherson verstarb am 15. August 2016 im Alter von 75 Jahren (Chinen, 2016). Ein Zitat von Hutcherson beschreibt seine Art zu spielen und seine Philosophie des Spielens wohl am besten: „Es geht nicht um die Note, es geht um die Geschichte, die du in dieser Note erzählst.“ (Berendt, 1989: 351)

2.3.5. Gary Burton



Abbildung 9: Gary Burton
(<https://www.berklee.edu/news/1749/gary-burton-and-berklee>, 21.09.2016)

Gary Burton wurde 1943 in Anderson, Indiana geboren. Er lernte Marimba- und Vibraphon autodidaktisch im Alter von 6 bzw. 11 Jahren und machte seine ersten Erfahrungen als Musiker mit seiner Familienband. Als Mitglied des Stan Getz Quartet von 1964-66 wurde Burton international bekannt. Seine Art Vibraphon zu spielen wurde stark von den Pianisten Thelonious Monk und Bill Evans beeinflusst. Burton perfektionierte die Spieltechnik mit vier Schlegeln und wurde durch die neue Art des Spielens am Vibraphon bekannt (NGroveD of Jazz, Vol. 1, 2001: 354-355).

„Gary Burton musiziert aus einer bestechenden Verbindung von zartem, schwebendem Lyrismus und großer Virtuosität. Kein anderer Vibraphonist hat die pianistischen Möglichkeiten des Vibraphons so umfassend ausgeschöpft wie Burton. Er ist derjenige Vibraphonist, der die Fähigkeit, mit drei oder vier Schlegeln gleichzeitig zu spielen, am weitesten entwickelt hat. Er erzielt dabei akkordische Wirkungen, die denen des Pianisten Bill Evans [...] ähneln.“ (Berendt, 1989: 350)

„A virtuoso vibraphonist Burton developed an original style of improvisation quite distinct from those of his influential predecessors on the instrument, Lionel Hampton and Milt Jackson. In the early 1960s he pioneered a now widely copied playing style that made use of four mallets at once [...]. In many ways Burton created a compromise between contemporary jazz piano and wind styles [...].“ (NGroveD of Jazz, Vol. 1, 2001: 355)

1967 gründete Burton sein eigenes Quartet, welches stark von Rock-Musik beeinflusst wurde. Neben seiner Tätigkeit als aktiver Musiker ist die Lehre am Berklee College of Music ein wichtiger Teil seiner Karriere und einhergehend publizierte er mehrere Bücher wie zum Beispiel „Introduction to Jazz Vibes“ (1965). Gary Burton zählt zu den Großmeistern auf dem Vibraphon im heutigen Jazz (NGroveD of Jazz, Vol. 1, 2001: 354-355).

2.3.6. Tom (Thomas) Van der Geld



Abbildung 10: Tom Van der Geld, Peter Nimsky, http://www.tomvandergeid.de/seite1_d.htm, 22.09.2016)

Tom Van der Geld wurde 1947 in Boston geboren. Er lernte erst Klavier und Trompete und anschließend Vibraphon. Er studierte an der Universität von New Mexico und bei Gary Burton am Berklee College ehe er 1973 nach Deutschland emigrierte. In Deutschland begeisterte er mit seiner Band „Children at play“ und dem gleichnamigen Album Publikum und Kritiker. Van der Geld revolutionierte das Vibraphonspiel, er erforschte neue Wege das Instrument zu spielen und wurde stark von Gary Burtons Spiel beeinflusst (Kampmann, Jost, 2009: 536).

„Tom van der Geld ist der sensibelste, »zarteste« der neueren Vibraphonisten. Seine Improvisationen klingen manchmal, als ob sein Instrument nicht von Schlegeln geschlagen würde, sondern ein milder, warmer Wind die Platten zum Schwingen bringe.“ (Berendt, 1989: 351)

Van der Geld ist heute als Musiker, Komponist, Autor und Dozent an mehreren Hochschulen in Deutschland tätig.

2.3.7. Mike Mainieri



Abbildung 11: Mike Mainieri (http://nycrecords.com/?page_id=465, 22.09.2016)

Mike Mainieri wurde 1938 in New York geboren. Er ist ein erfolgreicher Jazz-Vibraphonist, Komponist, Arrangeur und Produzent. Er begann schon als 10 jähriger Junge Vibraphon zu spielen und hatte seine ersten professionellen Auftritte mit Paul Whiteman im Alter von 14 Jahren. In den 1950er und 60er Jahren spielte Mainieri mit Größen der Jazzmusikszene wie Buddy Rich, Billie Holiday, Wes Montgomery u.v.a zusammen.

1962 wurde er Mitglied der Jazz-Rock-Fusion Gruppe Jeremy & the Satyrs und spielte mit Frank Zappa, Richie Havens und Jimi Hendrix. In den 1979 gründete er die Jazz-Fusion Gruppe Steps Ahead, welche hohes Ansehen erlangte und nomen est omen, Schritte voraus waren (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 685; http://nycrecords.com/?page_id=465, 22.09.2016).

„In the late 70s, Mike founded the pioneering jazz/fusion group Steps Ahead, [...]. Delving into contemporary sounds while maintaining experimental sounds and compositional integrity, Steps Ahead was and is a launching pad for young talent and new musical ideas.“
(http://nycrecords.com/?page_id=465, 22.09.2016)

Mainieri versuchte ein Synthivibe, eine elektrifizierte Variante des Vibraphons, zu entwickeln. Unglücklicherweise wurde dies 1978 gestohlen und konnte bis heute nicht wieder aufgefunden werden. 1992 gründete Mainieri sein eigenes Jazz Label, NYC Records. Mainieri tourt nach wie vor weltweit mit Steps Ahead, gibt Workshops und ist als Produzent aktiv (NGroveD of Jazz, Vol. 2, 2001: 685; http://nycrecords.com/?page_id=465, 22.09.2016).

2.3.8. Wolfgang Schlüter



Abbildung 12: Wolfgang Schlüter, Privatarchiv

Wolfgang Schlüter wurde 1933 in Ost-Berlin geboren. Beeinflusst von Red Norvo, Lionel Hampton, Milt Jackson, Gary Burton und Bobby Hutcherson gehört Schlüter zu einflussreichsten Vibraphonisten in Europa. Er lernte als Kind Klavier und studierte Pauke und Schlagzeug in Berlin. Schlüter hat einen ähnlichen Zugang zum Vibraphon wie Lionel Hampton. Sie beide verbindet, dass sie das Schlagzeug als Hintergrund ihrer musikalischen Ausbildung besitzen. (Kampmann, Jost, 2009: 469).

„Wolfgang Schlüter hatte sich mit einer Jazzplatte eine unheilbare musikalische Infektion zugezogen. Der Bazillus hieß Lionel Hampton, ein swingender Berserker auf dem Vibraphon, ein leuchtendes Beispiel dafür, daß dieses Instrument ein Bruder des Schlagzeugs, nicht des Klaviers ist.“ (Naura, 1983: 1)

Er gründete gemeinsam mit Michael Naura 1956 das Michael Naura Quintett, das 1962 ein bahnbrechendes Album mit dem Titel „European Jazz Standards“ produzierte. Ab 1966 war er mit Naura und dem Dichter Peter Rühmkopf an einigen Jazz und Lyrik Projekten beteiligt. Zudem war Schlüter von 1965-95 Vibraphon-Solist und Perkussionist der NDR-Bigband (Kampmann, Jost, 2009: 469). Sein langjähriger Weggefährte Michael Naura (1983) beschreibt ihn in einem Zeitungsartikel zu seinem 50igsten Geburtstag:

„Nicolai Gogol läßt in seiner Novelle „Das Porträt“ den wahnsinnigen Maler Tschartkoff sagen: „Das Genie schafft kühn und schnell.“ Nein, ein Genie ist der bedächtige Wolfgang Schlüter nicht. Aber er ist ein Musiker, der, obwohl im Rundfunkvertrag, den Jazz nicht im Stich gelassen hat und dessen ruhige Integrität und reife Improvisationskunst in Europa [...] ohne Beispiel sind.“ (Naura, 1983: 2)

Schlüter wurde mit mehreren Ehrungen und Preisen ausgezeichnet, lehrte an der Hochschule für Theater und Musik in Hamburg und ist nach wie vor als Musiker aktiv.

2.3.9. Werner Pirchner



Abbildung 13: Werner Pirchner 1980 in Salzburg, von Helmut Frühauf (<http://www.altneuland.at/wp/wp07.jpg>, 21.09.2016)

Werner Pirchner wurde 1940 in Hall in Tirol geboren und gilt als einer der wichtigen Vibraphonisten in Österreich. Als Jugendlicher war Pirchner schon in der Tanzmusik tätig und mit 18 Jahren verließ er sein Elternhaus um Musiker zu werden (Huber, 2014; NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 296).

„[...] ,der mit 18 von zuhause wegging und den Eltern nur einen Zettel hinterließ, auf dem stand „Ich bin Musiker.““ (Huber, 2014)

Fortan war Pirchner als Musiker zuerst in Innsbruck im Oscar Klein Quartett tätig bis er schließlich sein eigenes Ensemble gründete. Dort komponierte er Musik für Fernsehen und Radio. Er produzierte sein erstes Album „Ein halbes Doppelalbum“ – also eine LP – 1973 und wirkte bei unterschiedlichen Produktionen mit. 1974 schrieb er die Filmmusik und führte Regie, gemeinsam mit Christina Berg, für den Film „Der Untergang des Alpenlandes“, ein aus heutiger Sicht

etwa skurril wirkender, an Monty Python erinnernder, satirischer Kurzfilm. 1975 gründet er mit seinem kongenialen Partner Harry Pepl (Gitarre) das Pirchner-Pepl-JazzZwio. Es folgten viele Auftritte in Europa unter anderem beim Jazzfestival von Montreux und eine Zusammenarbeit mit Jack DeJohnette am Schlagzeug. Seine Art Vibraphon zu spielen ist einzigartig, da er auf einem von ihm selbst konstruierten Vibraphon – tenor vibes – spielte. 1988 spielte Pirchner sein letztes Konzert beim Deutschen Jazzfestival und widmete sein weiteres Schaffen dem Komponieren für „klassische“ Musiker (Berendt, 1989: 351; Huber, 2014; NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001: 297; Deisenberger, 2010).

Die „späte“ Berufung zur klassischen Musik erklärt Pirchner 1997:

„In meiner Jugend orientierte ich mich an der jeweils neuesten Jazzmusik. Die Beschäftigung mit den Theorien Schönbergs und vor allem mit Bachs Sonaten für Violine solo haben mir später andere Wege des Ausdrucks eröffnet. Bis zu meinem 42. Lebensjahr hätte ich aber aus Respekt vor den größten Meistern nicht gewagt, auch nur einen Ton für ein klassisches Konzert zu schreiben. Als Komponist, Jazzmusiker und privilegierter Gelegenheitsarbeiter versuchte ich a) meine Ideen und Gefühle in mir zugänglichen Dimensionen (diverse LPs mit Kompositionen, zwei Filme, ein paar Texte & Zeichnungen u.a.m.) auszudrücken und b) das rot-schwarze Farbenspiel auf meinem Bankkonto zu beeinflussen.

Eines schönen Morgens teilte mir der Geiger Peter Lefor telefonisch mit, daß er für sein nächstes ORF-Konzert ein Stück von mir für Solo-Violine auf's Programm gesetzt hat. So betrat ich mit tastender Zehe ... den Weg, den ich heute noch gehe. Ich versuche Musik zu schreiben, die ausdrückt, was ich im Augenblick denke, fühle ... und bin. Oder das Gegenteil.“
(<http://www.wernerpirchner.com/4DCGI/biografie>, 22.09.2016)

Pirchner erhielt eine Reihe von Preisen und Ehrungen und gilt heute wohl noch als meistgespielter österreichischer Komponist in Österreich, da er 1994 die Signatur für Ö1 komponierte, die jeden Tag nicht nur einmal zu hören ist und stets an ihn erinnert. Pirchner starb am 10. August 2001 (NGroveD of Jazz, Vol. 3, 2001:296).

3. Schall

Wellen umgeben uns immer und überall im Alltag, ob Radiowellen, WLAN-Wellen, Licht, Infraschall, Ultraschall, aber auch hörbarer Schall in Form von Musik, Geräuschen, Lärm etc. Was aber ist hörbarer Schall und was sind Schallwellen?

Schallwellen breiten sich in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern aus. Sie werden gemäß ihrer Ausbreitungsart in Longitudinal- und Transversalwellen eingeteilt. Die Geschwindigkeit mit der sich der Schall in verschiedenen Medien ausbreitet, wird Schallgeschwindigkeit c genannt. Für ein ideales Gas (s. Exkurs Ideales Gas) lässt sich die Schallgeschwindigkeit durch folgenden Zusammenhang errechnen:

$$c_{\text{Ideales Gas}} = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M'}}$$

Hier bezeichnet R die ideale Gaskonstante, T die Temperatur, M' die molare Masse des Gases und κ den so genannten Adiabatenkoeffizient (Mortimer, Müller, 2007).

Exkurs Ideales Gas

Der Zusammenhang von Druck p , Volumen V und Temperatur T kann für Gase über das ideale Gasgesetz errechnet werden:

$$pV = nRT$$

Hier gibt n die Stoffmenge an und R bezeichnet abermals die ideale Gaskonstante. Wie aus dem Namen ersichtlich erfüllt nur ein idealisiertes Gas diese Gleichung unter allen Umständen. Für reale Gase ist diese Gleichung nur in bestimmten Druck- und Temperaturbereichen gültig. Sie gilt typischerweise nicht bei hohen Drücken und tiefen Temperaturen (Mortimer, Müller, 2007: 146).

In Kapitel 3.1 wird noch genauer auf die Differenzierung der Schallgeschwindigkeit eingegangen. In Tabelle 1 werden exemplarisch unterschiedliche Medien und deren Schallgeschwindigkeit aufgelistet.

Medium	ρ [g/cm ³]	Temperatur [°C]	c [m/s] ⁴
Luft	1,98	-20	319
	1,29	0	331
	1,21	20	344
		40	355
Wasser (destilliert)	1,000	0	1403
	0,988	20	1483
	0,992	40	1529
Wasser (Seewasser)	1,03	20	1522
Eis	0,9	-4	4000
Aluminium	2,7	15-20	6400
Beton	2,2		4200
Eisen	7,9		6000
Flintglas ⁵	3,9		4000

Tabelle 1: Unterschiedliche Medien mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit (Kohlrausch et. al, 1996: 325-326)

In weiterer Folge hängt die Wellenlänge (λ) und die Frequenz (f) von der Schallgeschwindigkeit (c) ab:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Somit kann zum Beispiel die Wellenlänge eines Tons mit der Frequenz von $f = 440\text{Hz}$ (A4) und einer Schallgeschwindigkeit von $344 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ berechnet werden:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{440 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,78\text{m}$$

Die Wellenlänge des Kammertons A beträgt $0,78\text{m}$. Diese einfachen Berechnungen sind grundlegende Bedingungen für akustische Überlegungen wie zum Beispiel bei Schallschutzmaßnahmen oder tontechnischen Überlegungen. Eine weitere Größe, die hier nur kurz erwähnt werden soll, ist die Amplitude einer Schallwelle. Diese kann auf zwei Arten ermittelt werden: als Auslenkungsamplitude, welche die Auslenkung der einzelnen Luftmoleküle zu ihrem Ruhepunkt beschreibt, oder als Druckamplitude, die üblicherweise Verwendung findet. Da die Auslenkungsamplitude in einer Größenordnung von $10^{-6}\text{m} = 1\mu\text{m}$ liegt wird meist

⁴ Bei Festkörpern wird lediglich die Schallgeschwindigkeit für longitudinal Wellen angegeben.

⁵ Flintglas ist ein Glas mit einem hohen Anteil an Bleioxid und besitzt daher eine relativ hohe Dichte (<http://www.spektrum.de/lexikon/optik/optische-glasarten/2290>, 29.09.2016).

die Druckamplitude respektive Schalldruck als Größe herangezogen (Hall, 2008: 27-28). Die Berechnung von Drücken kann wie folgt erfolgen:

$$p = \frac{F}{S}$$

Wird also eine Kraft $F [N]$ auf eine Fläche $S [m^2]$ ausgeübt, ergibt sich für den Druck p die Maßeinheit N/m^2 .

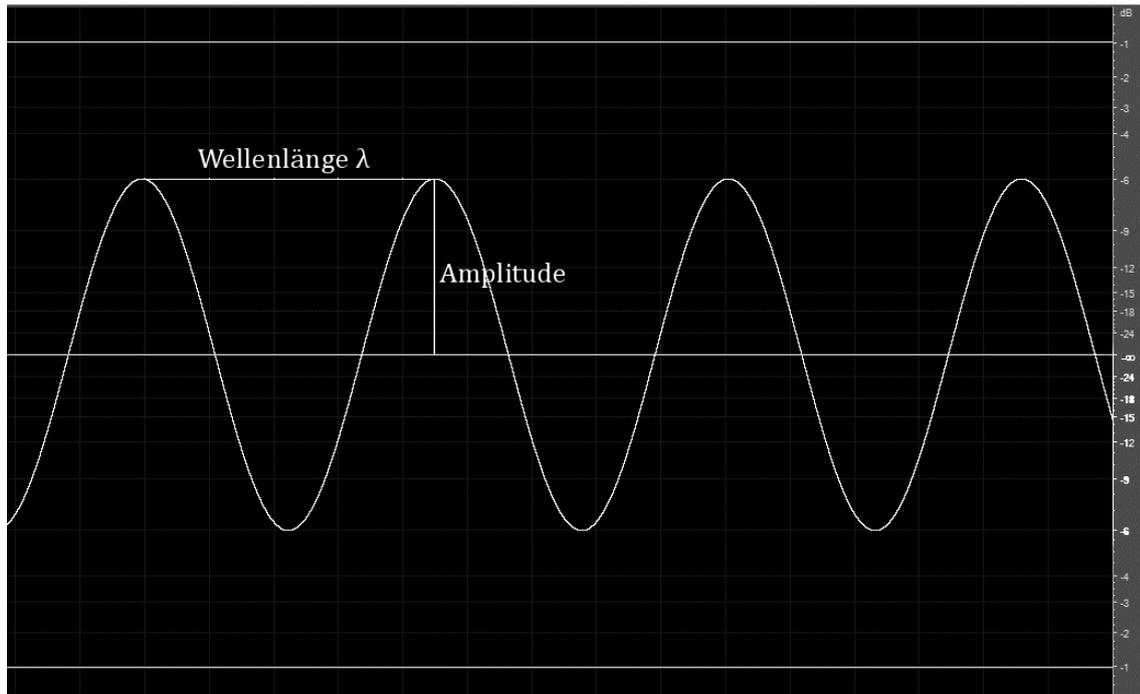


Abbildung 14: Sinuswelle mit Bezeichnung der Wellenlänge und der Amplitude

Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, wird die Druckamplitude oft in Dezibel [dB] angegeben. Die Einheit Bel ist lediglich eine logarithmische Hilfseinheit, welche das Verhältnis zweier gleicher Leistungsgrößen beschreibt. Der Schalldruck kann über folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \text{ (Kollmann, 2000: 5)}$$

Der errechnete Schalldruck L_p oder SPL (sound pressure level) wird in weiterer Folge einer frequenzabhängigen Bewertungskurve zugeordnet, um die Werte an den Frequenzgang des Gehörs anzupassen. Es gibt vier Bewertungen, $dB(A)$, $dB(C)$, $dB(B)$ und $dB(D)$, welche herangezogen werden können. Die beiden letzten Bewertungen besitzen allerdings nur noch historischen Charakter und meist wird die A-Bewertung herangezogen (Fouad, 2009: 138).

3.1. Wellenformen

In der Akustik werden Wellen in zwei grundsätzliche Typen eingeteilt:

- Longitudinal- oder Dichtwellen
- Transversal- oder Schubwellen

Diese Unterteilung beruht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle in Kombination mit der Bewegungsrichtung der Teilchen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Dabei kann eine Welle physikalisch als Druckunterschied in Medien beschrieben werden. Durch das Fortschreiten der Welle ergeben sich also Druckunterschiede innerhalb eines Mediums. Der Gesamtdruck p_T lässt sich wie folgt beschreiben:

$$p_T = p_0 + p_1$$

Dabei ist p_0 der Umgebungsdruck des Mediums und p_1 die Druckspannung aufgrund der sich ausbreitenden Welle (Rossing, 2007: 208).

Neben diesen beiden Wellenarten treten insbesondere bei Festkörpern eine Reihe von weiteren Wellentypen auf, die in weiterer Folge genauer beschrieben werden.

3.2. Longitudinalwellen

Eine Longitudinalwelle oder Längswelle beschreibt eine Welle, bei der sowohl die Schwingungsrichtung als auch die Schwingungsausbreitung ident sind. Die Teilchen in gasförmigen, flüssigen und festen Medien bewegen sich somit in derselben Richtung in der sich auch die Welle ausbreitet. Das wohl bekannteste Beispiel für eine Longitudinalwelle ist der Schall in gasförmigen und flüssigen Medien (Cremer, Heckl, 1996: 77).

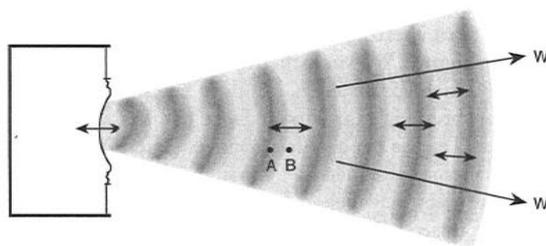


Abbildung 15: Ausbreitung einer Longitudinalwelle in der Luft (Hall, 2008: 22)

Wie in Abbildung 15 veranschaulicht wird, breitet sich die Welle in Richtung der Pfeile (W) aus. Die Doppelpfeile deuten die Hin- und Herbewegungen der

Luftmoleküle an, welche dieselbe Richtung besitzen. Die in unterschiedlichen Grautönen eingefärbten Bereiche stellen die Unterschiede in Luftdruck und Dichte, während der Fortbewegung der Welle dar. Hellgrau ist die „verdünnte“ Luft und dunkelgrau die „verdichtete“ Luft. Diese Verdichtung und Verdünnung kommt dadurch zustande, dass sich die Luftmoleküle bewegen und zwischen den beiden Zonen hin- und herwandern (Hall, 2008: 22).



Abbildung 16: Ausbreitung einer Longitudinalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)

Reine Longitudinalwellen (vgl. Abbildung 16) treten in festen Medien bei z.B. Seismischen Schwingungen auf, da die Erde als allseitig ausgedehnt beschrieben werden kann und ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt. In Festkörpern deren Ausmaße nicht ein Vielfaches der Wellenlänge betragen, kann sich der Schall, im Gegensatz zu gasförmigen und flüssigen Medien, nicht nur longitudinal, sondern auch – durch Schubkräfte innerhalb eines Festkörpers bedingt – transversal, quasi-longitudinal u.a. ausbreiten. Zudem wird die Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen je nach Medium unterschiedlich berechnet (Cremer, Heckl, 1996: 82):

$$c_{FL,G(l)} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$c_{F(l)} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}}$$

$c_{FL,G(l)}$ beschreibt hier die Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Flüssigkeiten und Gasen und ist abhängig von der Dichte $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ und dem Kompressionsmodul $K \left[\frac{N}{m^2} \right]$. In Festkörpern hängt die Schallgeschwindigkeit $c_{F(l)}$ von der Dichte ρ dem Elastizitätsmodul $E \left[\frac{N}{m^2} \right]$ sowie der Konstante ν , welche als Querkontraktionszahl oder Poissonsche Zahl bezeichnet wird, ab (Cremer, Heckl, 1996: 82-86).

3.3. Quasi-Longitudinalwellen

Quasi-Longitudinal- oder Dehnwellen treten insbesondere bei Stäben und Platten auf, welche nicht allseitig ausgedehnt sind. Dabei kann eine Quasi-Longitudinalwelle als eine Art Mischung von Longitudinal- und Transversalwelle gesehen werden. Da die Querabmessung von Platten, bei Stäben auch die Längsabmessung, im Verhältnis zur Wellenlänge (λ) klein ist, kann angenommen werden, dass Quasi-Longitudinalwellen nur bei Formen auftreten, bei denen dieser Umstand zutrifft (Cremer, Heckl, 1996: 82).

Folgendes Beispiel soll zur weiteren Erklärung dienen: Wird eine Platte mit der Dicke von 65mm und der Materialeigenschaft einer Aluminiumlegierung angenommen, so beträgt die Schallgeschwindigkeit rund $6400 \frac{m}{s}$ (vgl. Tabelle 1). Daraus folgt, dass eine Wellenlänge, die der Dicke der Platte entspricht, erst bei rund 98460 Hz erreicht werden würde. Damit wird verdeutlicht, dass die Wellenlängen von Frequenzen im hörbaren Bereich, im Verhältnis zur Querabmessung der Platte groß sind.

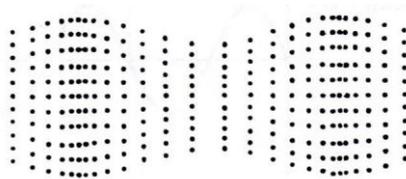


Abbildung 17: Ausbreitung einer Quasi-Longitudinalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)

Zudem ändert sich wie von Cremer & Heckl (1996) beschrieben auch die Berechnung der Schallgeschwindigkeit bei Stäben und Platten.

$$c_{S(l)} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$c_{P(l)} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

Die Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Stäben $c_{S(l)}$ und Platten $c_{P(l)}$ lassen sich aus dem Verhältnis von der Elastizitätsmodul $E \left[\frac{N}{m^2} \right]$ zu der Dichte $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ und bei Platten auch zu der Querkontraktionszahl ν berechnen (Cremer, Heckl, 1996: 85-86).

3.4. Transversalwellen

Die Transversalwelle schwingt nicht wie die Longitudinalwelle in Ausbreitungsrichtung, sondern senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

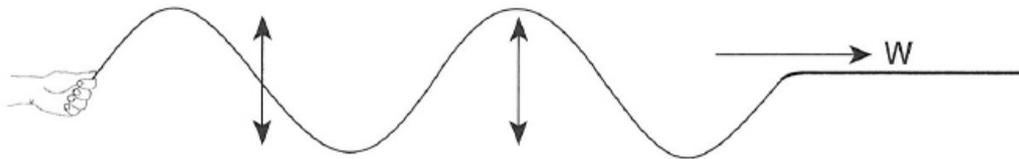


Abbildung 18: Beispiel für die Ausbreitung einer Transversalwelle (Hall, 2008: 22)

Wie in Abbildung 18 ersichtlich breitet sich die Welle in Richtung des Pfeils (W) aus, die Teilchen der Welle bewegen sie jedoch „auf“ und „ab“, also senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese Art von Wellen tritt ausschließlich in Festkörpern auf. Dieser Umstand ist durch Schubspannungen bedingt, welche es der Materie überhaupt ermöglichen sich in Form von Stäben, Platten etc. zu manifestieren. Daher ändert sich bei Transversalwelle auch die Schallgeschwindigkeit wie folgt (Cremer; Heckl, 1996: 87):

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Durch den Zusammenhang zwischen Schubmodul $G \left[\frac{N}{m^2} \right]$ und Elastizitätsmodul $E \left[\frac{N}{m^2} \right]$ lässt sich feststellen, dass $G < E$ ist und somit die Schallgeschwindigkeit von Transversalwellen c_T kleiner als die von Longitudinal- und Quasilongitudinalwellen ist. Wird ein Wert von $\nu = 0,3$ angenommen, stehen die Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen in Festkörpern $c_{F(L)}$, in Stäben $c_{S(L)}$, in Platten $c_{P(L)}$ und die Schallgeschwindigkeit von Transversalwellen c_T in folgendem Verhältnis zueinander:

$$c_T : c_{F(L)} = 0,535, c_T : c_{S(L)} = 0,592, c_T : c_{P(L)} = 0,620 \text{ (Cremer, Heckl, 1996: 90)}$$

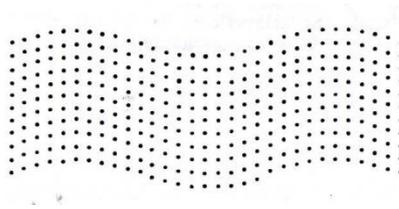


Abbildung 19: Ausbreitung einer Transversalwelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)

3.5. Biegewellen

Alle bis hier erwähnten Wellentypen, also Longitudinal-, Quasilongitudinal- und Transversalwellen, treten bei Vibrphontasten zwar auf, sind in ihrer Ausprägung aber nicht von großer Relevanz.

Die Abstrahlung von Stäben betreffend haben Biegewellen die weitaus größte Bedeutung, da nicht nur zwei, sondern vier Feldgrößen zu beschreiben sind (Cremer, Heckl, 1996: 95).

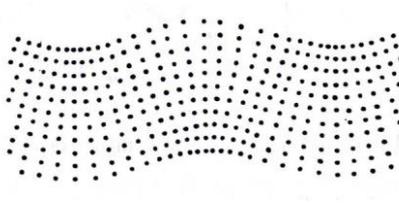


Abbildung 20: Ausbreitung einer Biegewelle in Festkörpern (Dickreiter, 2014: 12)

Die Geschwindigkeit, mit der sich Biegewellen ausbreiten c_B , lässt sich nach Cremer & Heckl (1996) wie folgt beschreiben. Sie ist von dem Biegemoment $B[N\ m^2]$, der Masse pro Längeneinheit $m\left[\frac{kg}{m}\right]$ und Kreisfrequenz $\omega[s^{-1}]$ abhängig:

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \sqrt[2]{\omega}$$

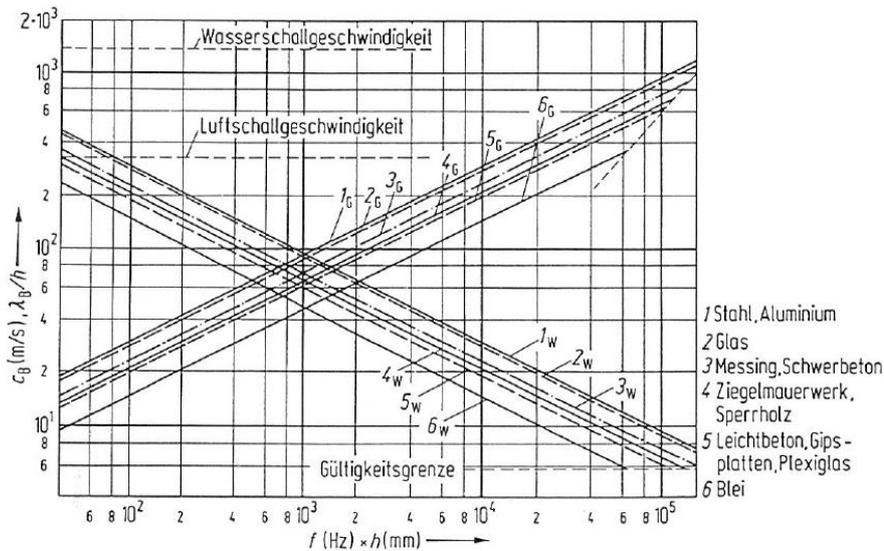


Abbildung 21: Biegewellenphasengeschwindigkeit 1G-6G und auf die Dicke bezogene Biegewellenlänge 1W-6W von homogenen Platten aus verschiedenen Baumaterialien (Cremer, Heckl, 1996: 100)

Da der Einfluss der Querkontraktion nach Cremer & Heckl (1996) nur wenige Prozent beträgt, kann Abbildung 20 auch näherungsweise für rechteckige Balken und Platten herangezogen werden.

Bei Stabspielen, wie Xylophon, Marimba, Vibraphon etc. sind die Klang erzeugenden Teile frei gelagerte Stäbe. Die Randbedingungen für diese Stäbe sind also in x und y Richtung als frei-frei zu bezeichnen und in z-Richtung als fest, da Torsionsschwingungen durch die Fixierung mit Schnüren etc. unterdrückt, im Idealfall verhindert werden können. Im Vergleich dazu gibt es Stabspiele die an einer Seite fixiert sind und somit in zwei Richtungen fest und in nur eine Richtung frei schwingend sind (Ziegenhals, 2010: 1).

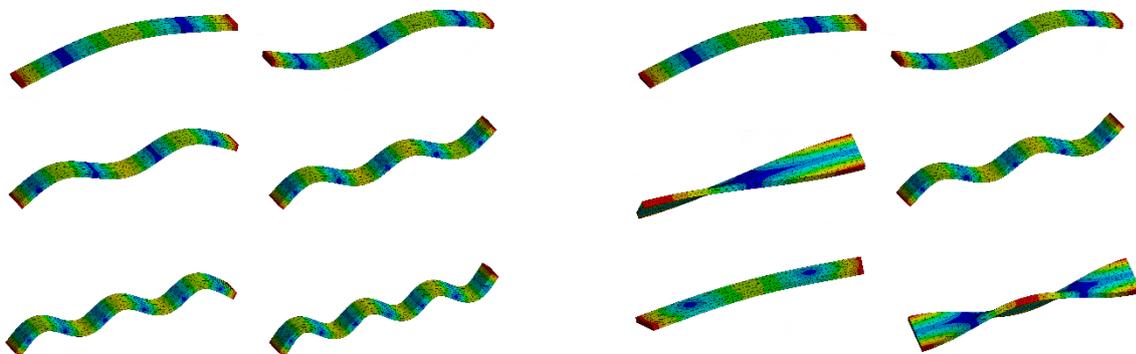


Abbildung 22: Die ersten 6 Moden eines Stabes mit konstantem Querschnitt. Links mit den Randbedingungen x,y-frei, z konstant. Rechts mit den Randbedingungen x,y,z frei.

In Abbildung 22 werden zwei unterschiedliche Randbedingungen mit einander verglichen. Die ersten beiden Moden sind ident, doch treten bei der Simulation mit den Randbedingungen frei-frei-frei zusätzlich Torsionsschwingungen auf (vgl. Abbildung 22 Mode⁶ 3, 5 und 6). Wird die z-Richtung als konstant angenommen, so treten die Torsionsschwingungen nicht auf und die Moden 3, 5 und 6 ändern sich. Bei Vibraphontasten werden durch die Fixierung der Taste Torsionsschwingungen unterbunden.

In erste Annäherung können frei schwingende Stäbe als eindimensionale Gebilde gesehen werden. Stäbe sind zudem dadurch gekennzeichnet, dass ihre Länge gegenüber der Breite und Dicke respektive Durchmesser groß ist. Die Biegeschwingungen werden nach Bork (1991) maßgeblich durch drei Materialeigenschaften bestimmt:

- Elastizitätsmodul: E
- Dichte: ρ
- Verlustfaktor: η

Mode	f [Hz] PE ⁷	f [Hz] Cu-Legierung	f [Hz] Epoxy Carbon
1	76,022	248,2	574,72
2	208,84	681,82	1546,2
3	407,45	1330,2	2926,5
4	669,24	2184,8	4627,5
5	991,67	3237,6	6569,8
6	1371,9	4479,8	8688,6
7	1481,9	4838,5	10929

Tabelle 2: Unterschied der Frequenz in Abhängigkeit von der Materialeigenschaft

In Tabelle 2 werden die ersten sieben Moden eines Stabes ($l = 400\text{mm}$, $b = 60\text{mm}$ und $h = 10\text{mm}$) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften gegenübergestellt. Der Stab wurde in ANSYS mit den drei unterschiedlichen Materialeigenschaften simuliert. Dabei beeinflusst das Verhältnis von $E:\rho$ die Grundfrequenz maßgeblich (Bork, 1991: 52).

⁶ Siehe Kapitel 4.1

⁷ PE – Polyethylen:

Zusätzlich zu den Materialeigenschaften ist die äußere Form eines Stabes von besonderer Bedeutung. Folgende Größen sind entscheidend:

- Querschnittsfläche: $A[m^2]$
- Flächenträgheitsmoment der Querschnittsfläche: $I[m^4]$

Aus diesen Größen lässt sich nach Cremer & Heckl (1996) die Biegesteifigkeit $B[N m^2]$ eines Stabes ermitteln:

$$B = EI = \int_s y^2 dS$$

Bei einem rechteckigen Stab mit der Höhe $h [m]$ und der Breite $b [m]$ ist $I[m^4]$ und $A[m^2]$ wie folgt zu berechnen (Cremer, Heckl, 1996: 97; Bork, 1991: 52, 1995:106):

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$A = bh$$

4. Biegeresonanz von Stäben

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, hängen Biegewellen eines Stabes von mehreren Faktoren ab, welche für die Berechnung der Eigenfrequenz herangezogen werden und von großem Nutzen für die Konstruktion von Stäben für ein Vibraphon, Xylophon etc. sind.

Beim Anregen eines Stabes durch einen Schlägel entstehen gleichzeitig eine Reihe von Biegeschwingungen, welche in die Luft abgestrahlt werden und durch das Zusammenklingen der Teiltöne einen komplexen Klang ergeben. Dieser Klang zeichnet sich nach Bork (1991) durch die Nicht-Harmonizität der Teiltöne sowie durch kürzere Ausklingvorgänge mit wachsender Eigenfrequenz aus. Die nächsten zwei Kapitel widmen sich der Berechnung der Teiltonreihe von Stäben mit konstantem und veränderlichem Querschnitt.

4.1. Stäbe mit konstantem Querschnitt

Wie oben erwähnt haben Stäbe mit konstantem Querschnitt ein nicht-ganzzahliges Verhältnis der Teiltöne zueinander. Im Vergleich dazu hat eine schwingende Saite

eine harmonische Teiltonreihe, also ein ganzzahliges Verhältnis der Teiltöne zueinander. Wird die Grundfrequenz $f_1 = 110\text{Hz}$ angenommen, so verhalten sich die Teiltöne bei einer Saite wie folgt:

Frequenz	110 Hz	220 Hz	330 Hz	440 Hz	550 Hz
Note	A2	A3	E4	A4	C#5
Verhältnis	1:1	1:2	2:3	3:4	4:5
Intervall	Prim	Oktave	Quint	Oktave	gr. Terz
Teilton	1.	2.	3.	4.	5.

Tabelle 3: Teiltöne einer schwingenden Saiten $f_1=110\text{ Hz}$

Bei einem Stab mit konstantem Querschnitt verhalten sich Teiltöne im Verhältnis von 1:2,76:5,40:8,93:13,34 (Bork, 1991: 52, 1995: 105; Ziegenhals, 2010: 1). Wird nun eine Grundfrequenz von $f_1 = 110\text{Hz}$ wie bei der Saite, angenommen, lassen sich mit folgender Formel die Frequenzen der Teiltöne berechnen:

$$f_n = \frac{3,561}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \delta$$

$\delta = 1,0; 2,7572; 5,4040; 8,9332; 13,3446 \dots$ (Bork, 1991: 52, 1995: 105)

Frequenz	110 Hz	304 Hz	594 Hz	983 Hz	1468 Hz
Note	A2	D3	D4	A#5	G6
Abweichung in Cent	0	+40	+20	+92	0
Verhältnis	1:1	1:2,76	2,76:5,40	5,40:8,93	8,93:13,34
Teilton	1.	2.	3.	4.	5.

Tabelle 4: Teiltöne eines Stabes mit konstantem Querschnitt $f_1=110\text{ Hz}$

Werden die beiden Tabellen Tabelle 3 und Tabelle 4 miteinander verglichen, so fallen die Unterschiede der verschiedenen Teiltöne mit derselben Grundfrequenz $f_1 = 110\text{ Hz}$ deutlich auf. In einem System, das an zwei Seiten festgebunden ist, können sich stehende Wellen ausbilden. Diese stehenden Wellen können auch als Moden bezeichnet werden. Diese Moden entstehen bei Biegeschwingungen von

unterschiedlichen Materialien. Grundsätzlich gibt es unendlich viele Moden, jedoch sind hier nur Moden von Interesse, die im hörbaren Bereich liegen (Bork, 1991: 55).

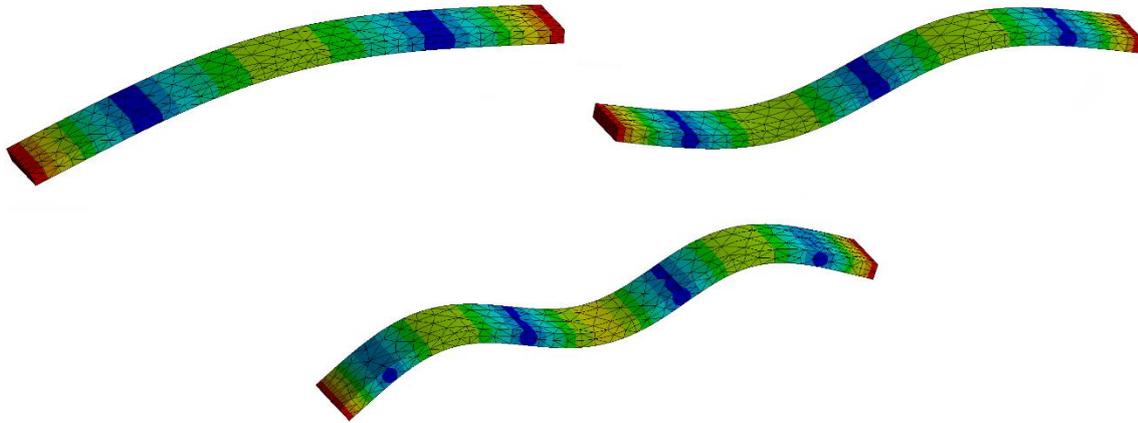


Abbildung 23: Die ersten drei Moden eines Stabes mit konstantem Querschnitt (l.o. – Mode 1, r.o. – Mode 2, m.u. – Mode 3)

In Abbildung 23 werden die ersten drei Moden eines Stabes mit konstantem Querschnitt dargestellt. Je „blauer“ die Farbe, desto weniger Biegemoment findet statt. Je „roter“ desto höher ist die Auslenkung der Biegeschwingung. Anders formuliert, können in den dunkelblauen Bereichen die Wellenknoten und in den grünen respektive roten Bereichen die Wellenbäuche beobachtet werden. Die Randbedingungen für die Berechnung sind x,y-frei und in z-Richtung konstant, sprich ohne Torsionsschwingungen.

4.2. Stäbe mit veränderlichem Querschnitt

Um das ungeradzahlige Verhältnis eines Stabes mit konstantem Querschnitt zu verändern, kann durch Fräsungen an der Unterseite eines Stabes, nahezu ein geradzahliges, harmonisches Verhältnis erzielt werden. Diese Fräsung verändert die Größen A und I , welche durch den nicht mehr konstanten Querschnitt ortsabhängig werden, und hat somit zur Folgen, dass δ sich ändert. Die Verhältnisse von einem Stab mit veränderlichem Querschnitt, also einer gestimmten Xylophon- oder Vibraphontaste, sind ungefähr 1:4:10:19 etc. (Bork, 1991: 56-58, 1995: 110-112).

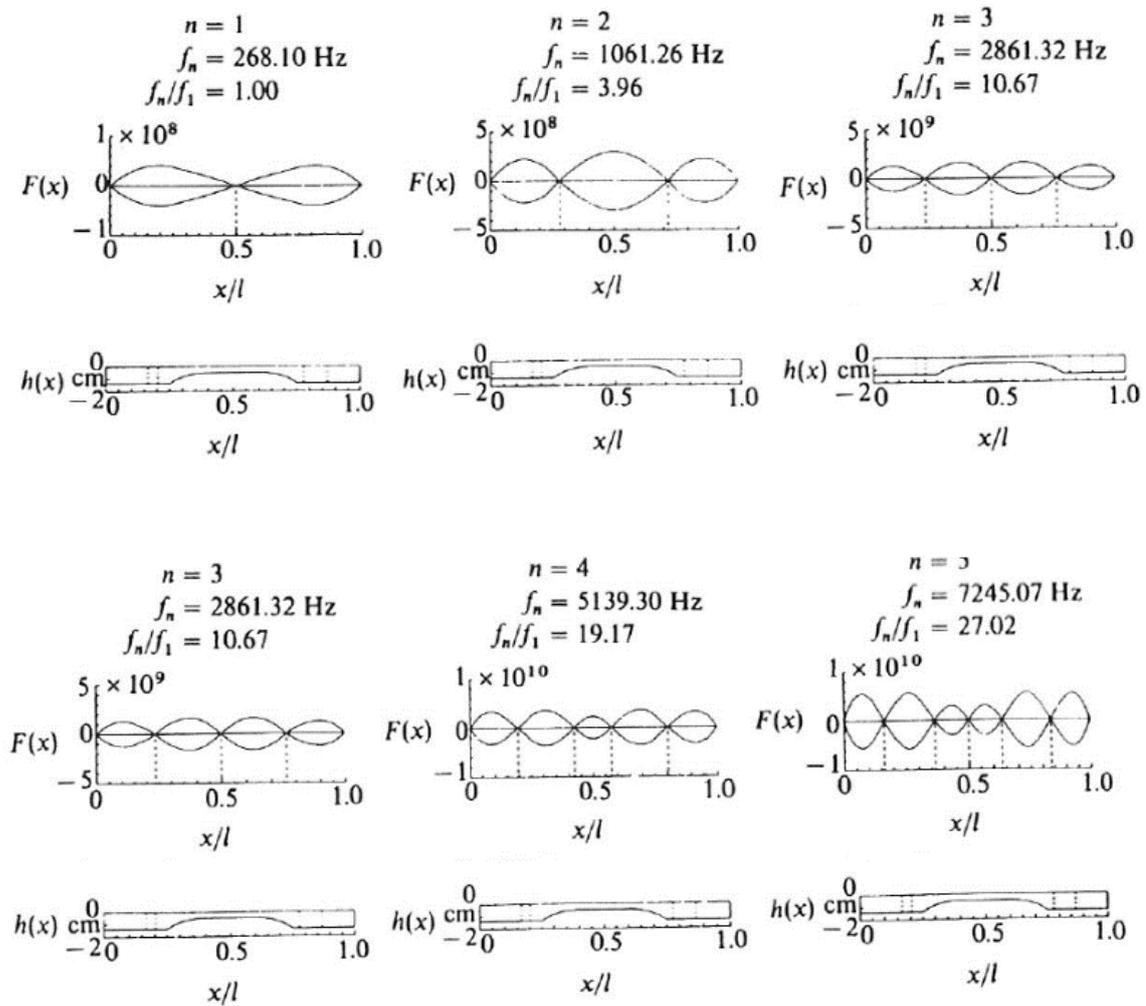


Abbildung 24: Die ersten fünf Moden einer gestimmten Taste. (Bork, 1995: 109)

Die Verhältnisse weichen jedoch von Hersteller zu Hersteller ab, was in Kapitel 6.2 genauer behandelt wird. Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass speziell die dritte Mode von diesen Abweichungen betroffen ist. Durch das Stimmen des zweiten Teiltons wird die Tonhöhenwahrnehmung speziell im tieffrequenten Bereich gestützt. In den USA wird in machen Fälle der zweite Teilton nicht im Verhältnis 1:4 – die Doppeloktave – sondern im Verhältnis 1:3 – die Duodezime – gestimmt. Die in den USA verbreitete Variante hat den Vorteil, dass die industrielle Fertigung leichter ist, da das Verhältnis näher dem Stab mit konstantem Querschnitt ist (1:2,76), jedoch einen negativen Einfluss auf die Tonhöhenwahrnehmung besitzt (Bork, 1991: 56-57).

5. Finite Elemente Methode (FEM)

5.1. Einführung

Die Finite Elemente Methode (FEM) stellt ein bekanntes, numerisches Berechnungsverfahren dar, um komplexe Strukturen in den verschiedensten Disziplinen, wie im Bauwesen, in der Fahrzeug-, Luft-, und Raumfahrttechnik beschreiben zu können (Wittel, 2010: 3; Mathiak, 2010: 1-1). Sie ermöglicht die Berechnung und Simulation von Kräften und Verformungen.

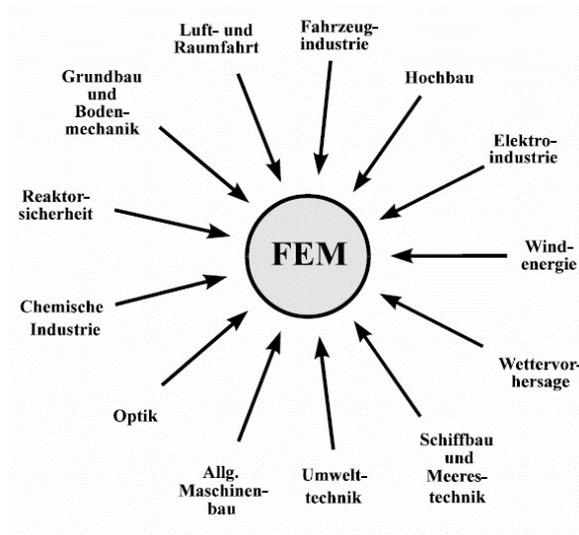


Abbildung 25: Anwendungsgebiete von FEM (Mathiak; 2010: 1-1)

Die Methode beruht darauf, dass eine Konstruktion, welche aufgrund ihrer Komplexität nicht gänzlich analytisch gelöst werden kann, in viele kleine analytisch lösbare Teile zerlegt wird. Diese Teile werden als Elemente bezeichnet. Dabei wird die Geometrie durch Knoten, also End- und Eckpunkte, definiert und es entsteht ein FE-Netz (Abbildung 26). Nach Lösung dieses Gleichungssystems wird für jeden Knoten eine Verschiebung oder Verformung berechnet und man erhält die Kräfte, die die Spannungen in jedem Element bestimmen (Wittel, 2010: 4).

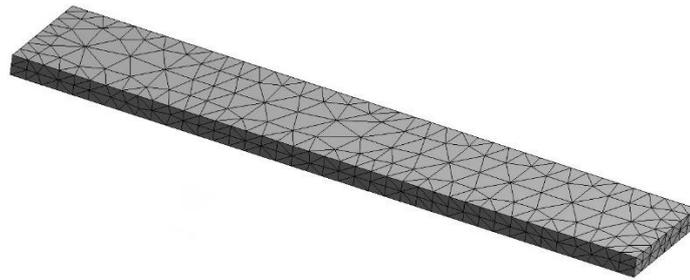


Abbildung 26: Geometrie mit ANSYS vernetzt.

So lässt sich an einem Kreis, der den Radius $r = 1$ besitzt, ergo $A = \pi$, eine vereinfachte Lösung darstellen. Ersetzt man den Kreis durch ein n -Eck, so kann der Flächeninhalt nur annähernd berechnet werden. Je größer n , desto feiner wird die Vernetzung, desto genauer kann der Flächeninhalt berechnet werden (vgl. Abbildung 27) (Gabbert, ca. 2000: 10).

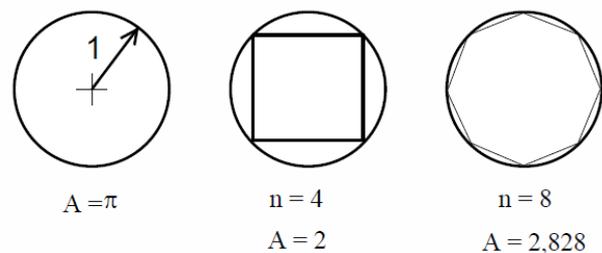


Abbildung 27: Berechnung eines Kreises mittels n -Ecken. (Gabbert, ca. 2000: 10)

Genauere Ergebnisse liefern: $n=64$: $A=3,136$, $n=256$: $A=3,1412$, $n=1000$: $A=3,1415$. Mit einem 1000-Eck kann der Flächeninhalt recht genau berechnet werden und entspricht π bis zur vierten Nachkommastelle. In weiterer Folge können für die Vernetzung der Geometrie verschiedene finite Elementtypen gewählt werden.

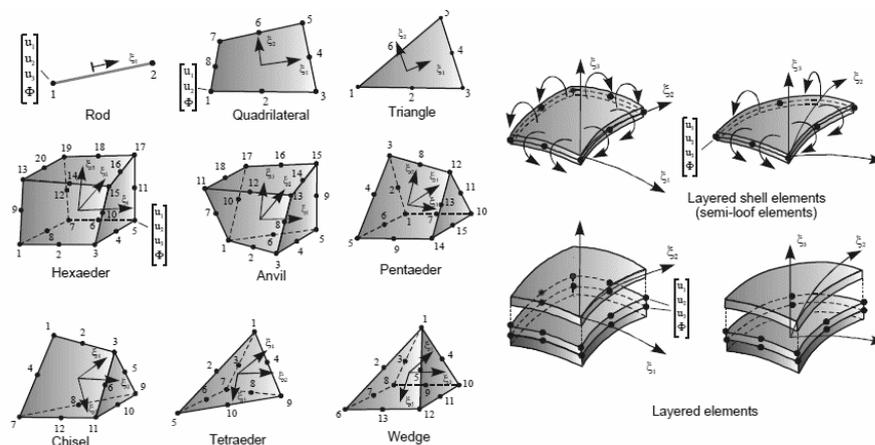


Abbildung 28: Einige mögliche finite Elementtypen des Programms COSAR (Gabbert, ca. 2000: 10)

Je nach Programm stehen unterschiedliche finite Elementtypen zur Verfügung um eine Geometrie zu vernetzen. Dabei kann zwischen Linienelementen (Stab, Balken, Rohr etc.), Flächenelementen (Dreieck/Viereck, Platten, Schalen etc.) und Volumenelementen (Tetraeder, Pentaeder, Hexaeder etc.) unterschieden werden (vgl. Abbildung 28). Einige dieser Elemente sind vereinfacht und senken somit den Rechenaufwand, sind jedoch in ihrer Anwendung und Genauigkeit limitiert. Die Wahl des Elementtypen ist für die weitere Berechnung von großer Bedeutung, da dieser als Berechnungsgrundlage dient. In dieser Arbeit wurden die Vibrationslasten mittels Tetraeder in dem Programm ANSYS vernetzt (siehe Abbildung 26) (Wittel, 2010: 27).

5.2. Geschichte

Die Geschichte der FEM lässt sich bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. Karl Schellbach (1851/52) entwickelte ein mathematisches Verfahren, das für die Lösung eines Minimalflächenproblems verwendet wurde. Dieses Verfahren kommt der FEM schon recht nahe. Des Weiteren beschäftigten sich Walter Ritz (1908/09) und Boris G. Galerkin (1915) in ihren Aufsätzen mit dieser Thematik. Während des 2. Weltkriegs beschäftigten sich mehrere Ingenieure mit dem Kraftgrößenverfahren und der Deformationsmethode (gilt als Vorläufer der FEM), konnten jedoch aufgrund der fehlenden Rechenleistung eines Computers keine effektive Umsetzung der Methoden erwirken (Wittel, 2010: 5; Mathiak, 2010: 1-4).

Durch die Steigerung der Rechenleistung von Computern war es in den 1950er Jahren möglich komplexe Berechnungen anzustellen.

„Die Entwicklung der Matrizenmethode der Stabstatik (Langefors, Argyris) und der Rechentechnik waren die wesentlichen Voraussetzungen für diese Pionierleistung der Ingenieure.“ (Gabbert, ca. 2000: 41)

Als „Geburtsstunde“ der FEM kann das Jahr 1956 genannt werden und lässt sich mit Ray W. Clough, M. J. Turner, H. C. Martin und L. J. Topp und ihrer Publikation „Stiffness and deflection analysis of complex structures (1956)“ festmachen. Die Arbeit wurde bei Boeing an gepfeilten Flugzeugflügeln durchgeführt. Clough beschreibt die Problemstellung:

„The specific problem that Jon Turner asked me to work on in 1952 was the calculation of the flexibility influence coefficients for low aspect ratio wing structures having either straight or swept-back configurations. Such influences coefficients were needed to predict flutter and other aeroelastic effects that might influence flight stability and control (...).“ (Clough, 1990: 89)

Clough war zudem wahrscheinlich der Erste, der den Begriff finite Elemente explizit im Jahr 1960 in „The finite element method in plan stress analysis“ erwähnte.

In den Jahren darauf entstand ein großes Interesse innerhalb der Ingenieurwissenschaft für diese Methode und 1963 gab es die erste Konferenz über Computermechanik und FEM (Klein, 2015: 3-4).

Die Entwicklung der FEM ist jedoch bis heute noch nicht abgeschlossen. Durch die immer stärker und schneller werdenden Computer ist es möglich CAD-Programme direkt mit einer FE-Analyse zu verknüpfen, um so die Berechnung genauer und schneller ablaufen zu lassen. Hier einige kommerzielle Programme mit denen sich FEM-Berechnungen durchführen lassen: ANSYS, NASTRAN, MARC, I-DEAS, ABAQUS etc. Diese Programme unterscheiden sich in ihrer Anwendung nur marginal und bieten meist dieselben Berechnungsgrundlagen (Klein, 2014: 4; Wittel, 2010: 5).

6. Methode und Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln wird die Herangehensweise an die Simulation, das Processing und die Auswertungen der simulierten Ergebnisse beschrieben und mittels einer „realen“ Messung auf Genauigkeit und Aussagekraft überprüft.

Ausgangspunkt dieser Messungen stellt die Teiltonreihe einer gestimmten Xylophontaste dar. Da Xylophone bzw. Marimbaphone als Vorläufer des Vibraphons gelten, wurden in den Artikeln von Bork (1986, 1991, 1999) hauptsächlich Xylophontasten erwähnt, welche jedoch mit Vibraphontasten sehr gut zu vergleichen sind.

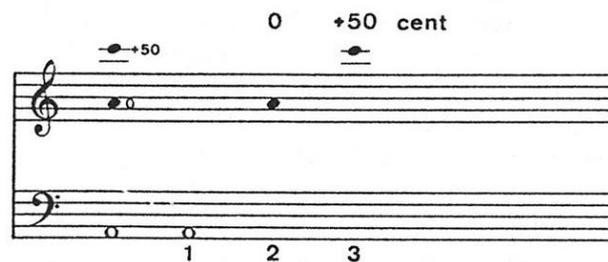


Abbildung 29: Abbildung einer gestimmten Xylophontaste (Bork, 1991: 58)

In dieser Arbeit werden Vibraphontasten von fünf unterschiedlichen Herstellern verglichen. Für jede Taste wird eine Modal- und eine Harmonische Analyse mittel ANSYS erstellt, um die Ausprägung des dritten Teiltons bei Vibraphontasten zu untersuchen. Wie in Abbildung 29 zu erkennen ist, liegt der dritte Teilton einer gestimmten Xylophontaste bei einer großen Terz +50 cent (Bork, 1991:58).

Die Ausprägung des dritten Teiltons ist für den weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderer Bedeutung. Es wird untersucht in welchem Bereich die Hersteller den dritten Teilton ansiedeln und wie stark dieser im Vergleich zum ersten Teilton ausgeprägt ist.

6.1. Processing

Um die Biegeschwingungen und die Verformungen der Vibraphontasten berechnen und simulieren zu können, war es notwendig die Geometrie dieser so exakt wie möglich zu ermitteln. Um dies zu gewährleisten wurden Vibraphontasten von fünf unterschiedlichen Herstellern als 2D Modell eingescannt (s. 9.7) und in weiterer Folge von Elisabeth Hofer mit Adobe Illustrator in eine Vektorengrafik⁸ umgewandelt. Die Hersteller der Vibraphontasten sind:

- Dr. Ing. Dr. Phil. Arnold Esper⁹
- Ludwig Musser¹⁰
- Kosth¹¹
- Studio 49¹²
- Nico van der Plas¹³

Diese Vektorgraphiken, auch als Pfade bezeichnet, wurden in FreeCAD importiert und zu einem 3D Modell in Originalgröße verarbeitet und etwaige Fehler ausgebessert. Die Modelle wurden in ein für ANSYS lesbares Format (*.step) konvertiert, exportiert und zur Berechnung und Simulation in ANSYS importiert.

In ANSYS wurde die Geometrie vernetzt und mittels FEM die Verformung berechnet. Dazu wurde zuerst eine Modalanalyse herangezogen, um die Teiltöne und deren Verformung zu berechnen und in weiterer Folge eine harmonische Analyse, um das Verhältnis zwischen den Teiltönen bestimmen zu können. Für die harmonische Analyse wurden eine Kraft von 100N und ein Lehrsches Dämpfungsmaß von 0,02 angenommen (Kammer, 2014: 389). Um Fehler bezüglich der Krafteinwirkung vorzubeugen (siehe Kapitel 6.4), wurde die Simulation mit unterschiedlichen Kräften wiederholt, das Dämpfungsmaß blieb dabei konstant. Dabei muss erwähnt werden, dass jede Simulation eine gewisse Ungenauigkeit besitzt und die Netzgröße an die Computerleistung angepasst werden musste. Zudem ist die genaue

⁸Vektorengrafiken besitzen den Vorteil, dass diese beliebig vergrößert und verkleinert werden können, ohne einen Qualitätsverlust zu erleiden.

⁹<https://musikwissenschaft.univie.ac.at/institut/personalverzeichnis/esper/>, 27.10.16

¹⁰<http://www.ludwig-drums.com/>, 27.10.16

¹¹https://www.facebook.com/vibraphoneclub/photos/?tab=album&album_id=473127056108253, 27.10.16

¹² <http://www.studio49.de/de/>, 27.10.16

¹³ <http://www.vanderplastal.com/index.php/home>, 27.10.16

Materialdefinition der Vibraphontasten nicht bekannt und konnte auch nicht eruiert werden, was dazu geführt hat, dass als Grundmaterial eine Aluminiumlegierung (Al2024) herangezogen wurde (Trommer, 1995: 340). Die Dichte der Legierung wurde beeinflusst, um die Vibraphontasten auf derselben Grundfrequenz vergleichbar zu halten. Eine genauere Bestimmung wäre daher nur mit Kenntnis der genauen Zusammensetzung des Materials möglich, sowie mit Hilfe eines 3D-Scan, um die exakte Geometrie inklusive Abrundungen zu ermitteln.

Dadurch weichen die Ergebnisse der Simulationen von Taste zu Taste ab. Die Interpretation der Ergebnisse beruht daher weniger auf den tatsächlich gemessenen Werten, als vielmehr darauf, einen Trend festzustellen, welcher als Vergleichswert herangezogen werden kann. Um die Wichtigkeit des Materials hervorzuheben wurde eine Vibraphontaste mit unterschiedlich dichten Materialien berechnet und simuliert, um auch diesen Unterschied herauszuarbeiten (s. Tabelle 2).

6.1.1. Modalanalyse

Nach Kollmann (2000) gibt es grundsätzlich zwei Arten von Modalanalysen: Zum Ersten die experimentelle und zum Zweiten die numerische Modalanalyse. Für die numerische Modalanalyse wurden in dieser Arbeit eine Modalanalyse mittels FEM und eine harmonische Analyse herangezogen. Die FEM gestützte Modalanalyse simuliert und berechnet die Biegeschwingungen bzw. Moden der Vibraphontasten und die harmonische Analyse liefert die Auslenkung der unterschiedlichen Moden sowie das Verhältnis dieser zueinander.

Die experimentelle Analyse erfolgte mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) des Klages einer in der Mitte angeschlagenen Vibraphontaste von Musser, die mit einem Mikrophon aufgenommen und mit dem Programm Adobe Audition ausgewertet wurde. Die Ergebnisse der beiden Analysen (experimentell und numerisch) von Musser werden im weiteren Verlauf der Arbeit gegenübergestellt und verglichen (siehe Kapitel 6.5).

6.2. Auswertung der numerischen Modal- und harmonischen Analyse

Im Folgenden werden die simulierten Messergebnisse der unterschiedlichen Hersteller und deren Auswertungen behandelt und in Kapitel 6.3 mit einander

verglichen. Als Ausgangspunkt dienten die Vibraphontasten der fünf Hersteller mit der Grundfrequenz von $f = 175 \text{ Hz}$ (F3). Die Tonhöhe wurde aufgrund der Verfügbarkeit der Tasten gewählt und aufgrund der für das Gehör maßgeblichen Ausprägung der Teiltöne. Der tieffrequenten Bereich ist für die Tonhöhenwahrnehmung von größerer Bedeutung als die hochfrequenten Bereiche, da die Tonhöhenwahrnehmung mit steigender Frequenz ab ca. 4000 Hz immer ungenauer wird und somit keine rechte Tonhöhe mehr zugeordnet werden kann (Spitzer, 2002: 235). Wird zum Beispiel die Grundfrequenz einer Vibraphontaste oder einem Glockenspiel mit $f = 880 \text{ Hz}$ angenommen, so liegt der zweite Teilton bei 3520 Hz und der dritte bei 8800 Hz und ist somit weit über 4000 Hz und ist für das Wahrnehmen der absoluten Tonhöhe bereits zu hoch. Daher spielt die harmonische Zusammensetzung der Teiltöne, Vibraphontasten betreffend, nur in den ersten beiden Oktaven eine wichtige Rolle. Ein besonderes Augenmerk gilt der 3. Mode (vgl. Abbildung 23) in den Analysen, da diese, im Verhältnis zur 1. und 2. Mode stark ausgeprägt ist und für das Spielen von Akkorden störend sein kann. Die 3. Mode liegt im Frequenzbereich einer großen Terz zum Grundton und bekanntermaßen spielt die Terz eine wichtige Bedeutung für die Differenzierung des Tongeschlechts. Wird beispielsweise ein c-Moll-Akkord gespielt kommt es zu einer Schwebung zwischen der großen Terz (E - 3. Mode der Grundfrequenz) und der kleinen Terz (E^b - Grundfrequenz der gespielten Taste) dieser Umstand kann als störend empfunden werden.

Alle numerischen Analysen wurden mit dem Programm ANSYS simuliert und berechnet. Für die experimentelle Analyse wurde das Programm Adobe Audition herangezogen.

6.2.1. Die Hersteller

6.2.1.1. Dr. Ing. Dr. Phil. Arnold Esper



Abbildung 30: Vibraphon von Arnold Esper

Arnold Esper ist Mitarbeiter am Institut für Musikwissenschaft in Wien. Neben seiner Tätigkeit am Institut ist er seit 30 Jahren im Instrumenten- und Boxenbau tätig. Sein selbst entwickeltes Vibraphon ist Gegenstand dieser Arbeit (s. Abbildung 30).

6.2.1.2. Ludwig-Musser



Abbildung 31: Musser 3.0 Gold Pro Vibraphon
(<http://www.steveweissmusic.com/product/musser-m55g-gold-pro-vibe/musser>, 28.09.2016)

Ludwig-Musser ist ein in den USA beheimatetes Unternehmen, welches Schlagzeuge und Perkussionsinstrumente herstellt. Gegründet wurde das Unternehmen 1909 unter dem Namen Ludwig & Ludwig Drum Company von William F. & Theobald Ludwig. Ludwig avancierte zu einem der weltführenden Schlagzeug Hersteller und erweiterte 1966 seine

Produktion mit Stabspielen, durch die Übernahme der Musser Marimba Company.

Clair Omar Musser war einer der Pioniere der Vibraphon Entwicklung. Er war selbst Musiker und begann seine Karriere bei J.C. Deagan (siehe 2.2). Ludwig-Musser gehören heute zur Conn-Selmer, Inc. und produzieren nach wie vor qualitativ hochwertige Instrumente (<http://www.ludwig-drums.com/en-us/ludwig/about>, 26.09.2016).

6.2.1.3. Kosth



Abbildung 32: Kosth K-220
(<https://www.chicdeals.net/p/kosth-vibraphone/111991755931>, 28.09.2016)

Sprache abrufbar und mittels Google Chrome Übersetzer lassen sich keine befriedigenden Übersetzungen generieren.

6.2.1.4. Studio 49



Abbildung 33: Studio49 RVC 4000 (<https://www.reisser-musik.de/vibraphon-studio49-rvc-4000/>, 28.09.2016)

Betriebsgebäude und konnte somit auch Orchesterinstrumente wie Vibraphon, Marimba etc. produzieren. Nach dem Tod von Klaus Becker-Ehmck führt zuerst seine Frau das Unternehmen. Es ist heute unter der Führung seines Sohns Bernd Becker-Ehmck immer noch in Familienbesitz (<http://www.studio49.de/de/ueberuns/geschichte-studio-49/>, 28.09.2016).

Über den Hersteller Kosth konnte während meine Recherche leider nur wenig herausgefunden werden. Trommer (1995) erwähnt Kosth als ein japanisches Unternehmen, welches unter anderem Vibraphone herstellt. Die Homepage des Unternehmens (<http://www.kosth.jp/>) ist leider ausschließlich in japanischer

Das Unternehmen Studio49 wurde 1949 gegründet und ist eng mit der Geschichte von Carl Orff verbunden. Klaus Becker-Ehmck, der Gründer von Studio49, baute zum Beispiel die ersten Lithopone¹⁴ nach den Vorstellungen und Wünschen Carl Orffs. Durch die große Anfrage an Instrumenten in der Nachkriegszeit baute Studio49 1956 ein eigenes

¹⁴ Lithophon aus dem griechischen litho (Stein) und phon (Klang) auf Deutsch Klangstein.

6.2.1.5. Nico von der Plas



Abbildung 34: Arcitc Vibe vanderPlas
(<http://www.vanderplastal.com/>, 28.09.2016)

vanderPlas vibraphones wurde 1999 gegründet und hat sich der alleinigen Entwicklung von Vibraphonen verschrieben. Auf ihrer Homepage beschreiben sie ihren Zugang zum Vibraphonbau wie folgt:

„We are not a marimba building company that also on the side manufactures vibraphones, we are not a drums company that also on the side manufactures vibraphones: we are a solely vibraphone manufacturer, offering the finest vibraphones and vibraphone accessories.“
(<http://www.vanderplastal.com/index.php/home>, 28.09.2016)

Die Entwicklungen reichen von aus Silikon gefertigten Dämpfersystemen bis hin zu Blauen Vibraphontasten, eingebaute Midi-Controller, verbesserte Methode zum Stimmen der Tasten etc. vanderPlas vibraphones ist ein in den Niederlanden ansässiges Unternehmen (<http://www.vanderplastal.com/index.php/home>, 28.09.2016).

6.2.2. Modalanalysen

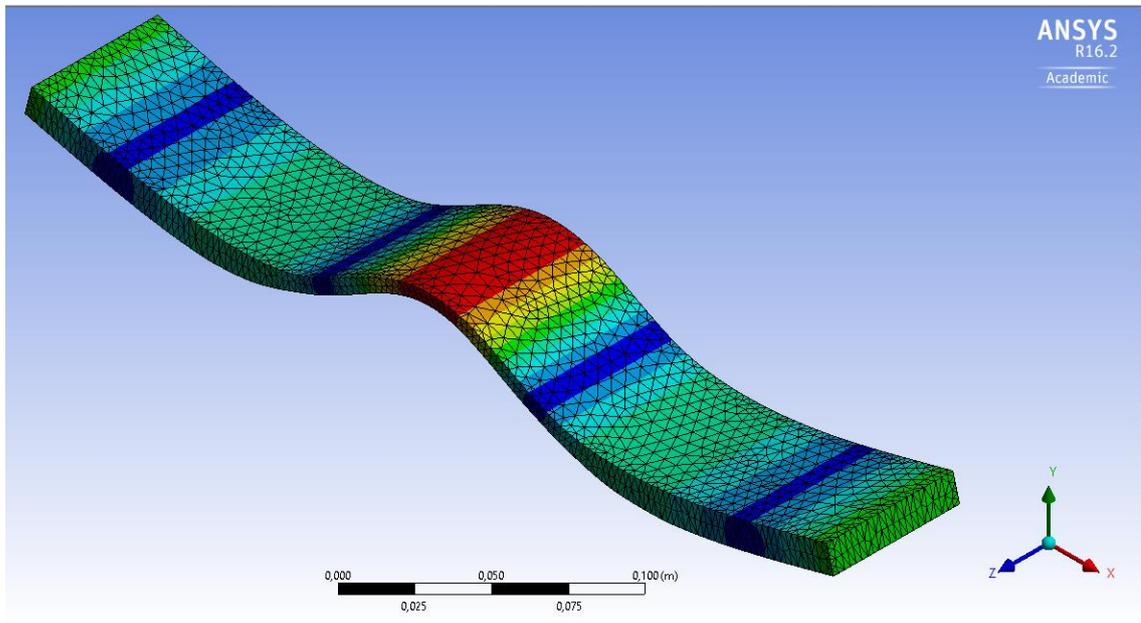


Abbildung 35: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Esper

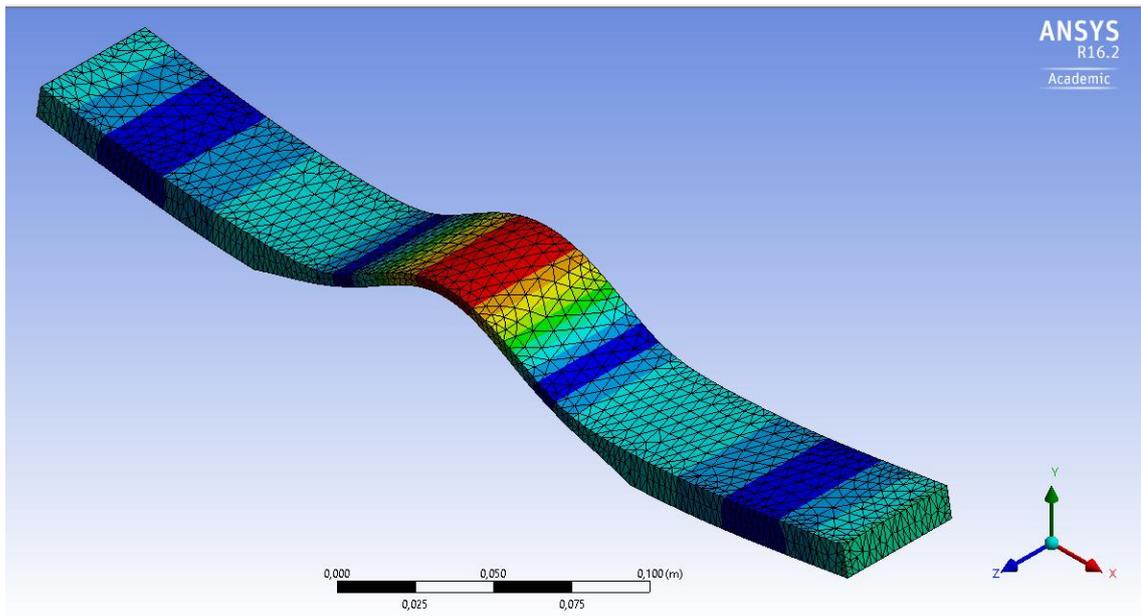


Abbildung 36: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Musser

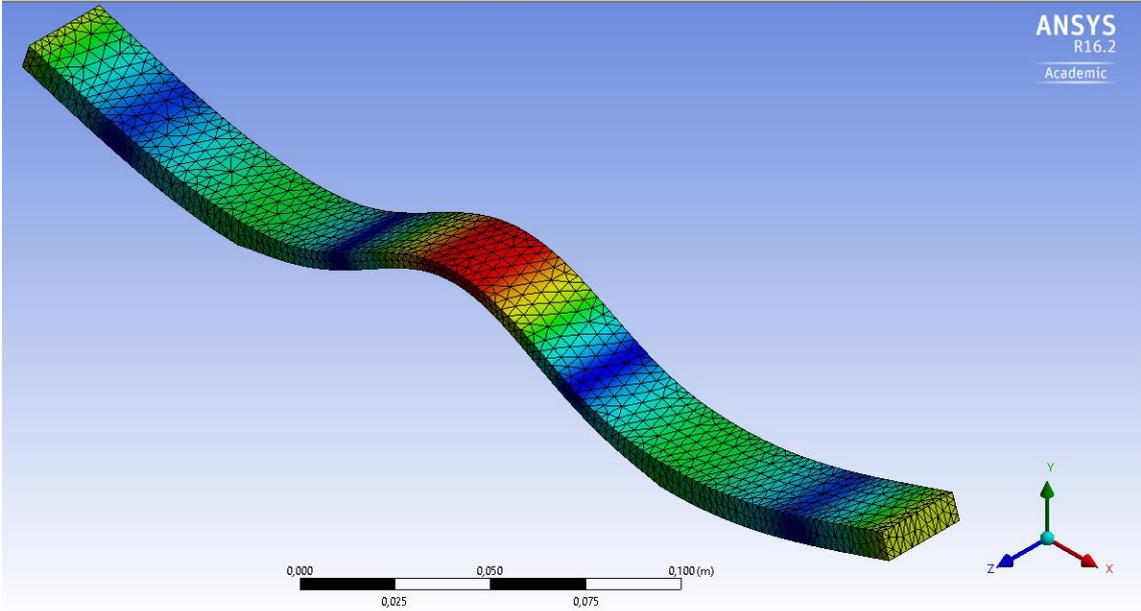


Abbildung 37: Modalanalyse 3. Mode Vibrphontaste Koth

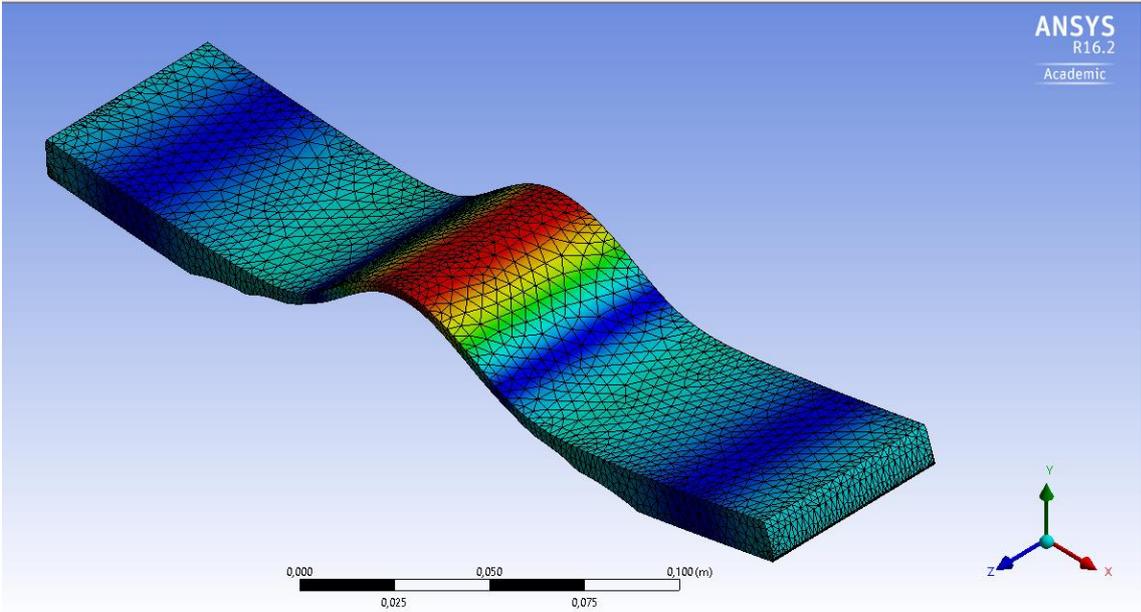


Abbildung 38: Modalanalyse 3. Mode Vibrphontaste Studio49

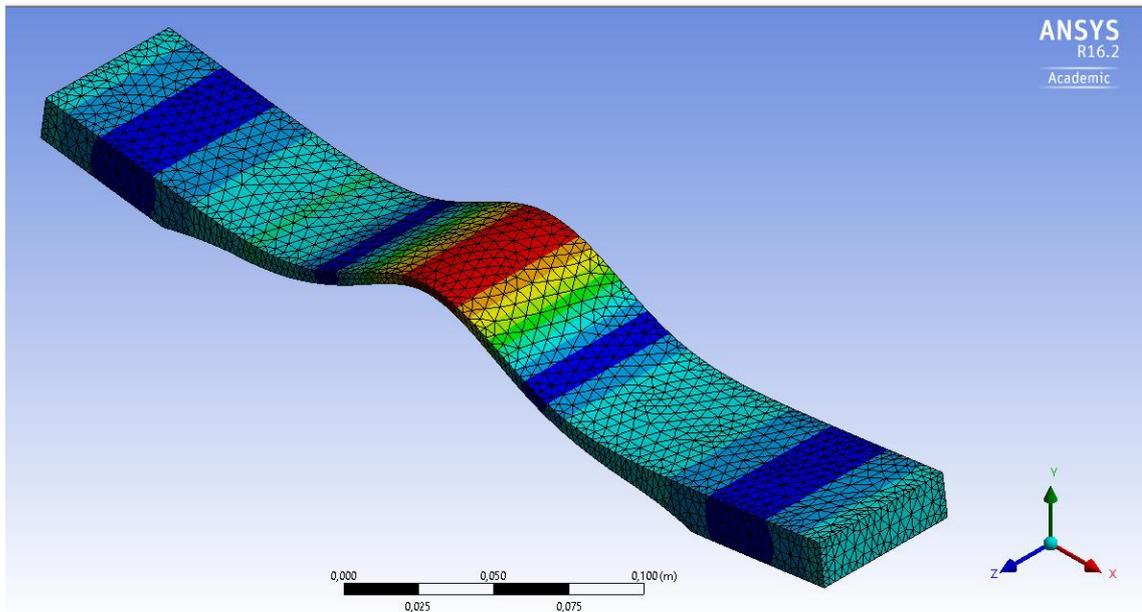


Abbildung 39: Modalanalyse 3. Mode Vibraphontaste Nico von der Plas

In den Abbildungen Abbildung 35-Abbildung 39 wird die dritte Mode der Vibraphontasten von Herrn Esper, Musser, Kosth, Studio49 und vanderPlas sowie die Vernetzung der FEM dargestellt. Auffällig dabei ist die starke Biegung in der Mitte der Vibraphontasten. Hier passiert die größte Auslenkung der dritten Mode. Je nach Hersteller ist die Auslenkung in der Mitte unterschiedlich stark ausgeprägt, so kann bei der Taste von Studio49 die größte Auslenkung beobachtet werden. Im Gegensatz dazu sind die beiden Enden der Tasten in ihrer Auslenkung verhältnismäßig klein. Bei Esper und Kosth findet jedoch eine stärkere Biegung der beiden Enden statt, hingegen bei den Tasten von Musser, Studio49 und vanderPlas biegen sich den Enden kaum. Dieser Unterschied der Auslenkung lässt sich an den Maßen der Vibraphontasten festmachen, die in Tabelle 5 aufgelistet werden:

Hersteller	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Aussehen
Esper	370	58	12	Silbern, matt metallisch
Musser	365	47	12,5	goldschimmernden Legierung
Kosth	320	26	8	Silbern, matt metallisch

Studio49	365	60	13,5	Silbern, matt metallisch
vanderPlas	367	58	17,5	Silbern, glänzend metallisch

Tabelle 5: Maße und Aussehen der Vibraphontasten (s. 9.7)

Die Taste von Kosth ist vor allem in ihrer Länge und Breite auffallend klein im Vergleich zu den anderen vier Tasten, welche eine ähnliche Länge und Breite besitzen. Die Höhe der Tasten variiert von $8-17,5\text{mm}$, wobei die Taste von Kosth auch hier den kleinsten Wert besitzt. Aufgrund der Simulation kann festgehalten werden, dass je kleiner die Höhe der Taste ist, desto mehr Auslenkung findet an den Enden der Taste statt. Die Länge und Breite der Taste ist die Auslenkung betreffend sekundär.

In den folgenden Tabellen werden jeweils die ersten zehn Moden der fünf Hersteller aufgelistet. Diese Werte wurden alle in ANSYS simuliert.

Mode	Frequenz [Hz]	Tonhöhe	Intervall
1.	175,51	F3 +9 cent	Prim
2.	688,31	F5 -26 cent	Oktave
3.	1700,5	A6 -60 cent	Große Terz
4.	2898,8	F7 +63 cent	Oktave
5.	4035	B7 +36 cent	Übermäßige Quart
6.	5206,7	E8 -20 cent	Große Septime
7.	5554,4	F8 -10 cent	Oktave
8.	7467,5	B ^b 8 +2 cent	Quart
9.	9408,3	D9 +8 cent	Kleine Sext
10.	11542	G9	Sekund

Tabelle 6: Mode 1-10 der Taste von Arnold Esper mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.

Mode	Frequenz [Hz]	Tonhöhe	Intervall
1.	173	F3 -15 cent	Prim
2.	709,86	F5 +27 cent	Oktav
3.	2099,6	C7 +5 cent	Quint
4.	3925	B7 -11 cent	Übermäßige Quart
5.	5024,7	E ^b 8 +16 cent	Kleine Septim
6.	6541,7	A ^b 8 -27 cent	Kleine Terz
7.	6926,3	A8 -28 cent	Große Terz
8.	9507,6	D9 +20 cent	Kleine Sext
9.	12152	G ^b 9+45 cent	Verminderte Sekund
10.	14958	B ^b 9 +4 cent	Quart

Tabelle 7: Mode 1-10 der Taste von Ludwig-Musser mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.

Mode	Frequenz [Hz]	Tonhöhe	Intervall
1.	176	F3 +13 cent	Prim
2.	672,93	F5 -67 cent	Oktav
3.	1553,9	G6 -15 cent	Sekund
4.	2578,3	E7 -38 cent	Große Septim
5.	3694,9	B ^b 7 -16 cent	Quart
6.	5070,2	E ^b 8 +31 cent	Kleine Septim
7.	5848	G ^b 8 -21 cent	Verminderte Sekund
8.	6800,5	A ^b 8 +40 cent	Kleine Terz
9.	8657,4	C [#] 9 -41 cent	Übermäßige Quint

10.	10648	E9 +16 cent	Große Septim
-----	-------	-------------	--------------

Tabelle 8: Mode 1-10 der Taste von Kosth mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.

Mode	Frequenz [Hz]	Tonhöhe	Intervall
1.	176	F3 +13 cent	Prim
2.	727,92	F5 +72 cent	Oktav
3.	2205,1	C#7 -9 cent	Übermäßige Quint
4.	4395,8	C#8 -15 cent	Übermäßige Quint
5.	6183,2	G8 -24 cent	Sekund
6.	7933,7	B8 +6 cent	Übermäßige Quart
7.	9103,1	C#9 +44 cent	Übermäßige Quint
8.	11760	F#9 -11 cent	Verminderte Sekund
9.	14584	B ^b 9 -39 cent	Quart
10.	18017	C#10 +26	Übermäßige Quint

Tabelle 9: Mode 1-10 der Taste von Studio49 mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.

Mode	Frequenz [Hz]	Tonhöhe	Intervall
1.	174,31	F3 -2 cent	Prim
2.	702,96	F5 +11 cent	Oktav
3.	2160	C7 +55 cent	Quint
4.	3939,9	B7 -4 cent	Übermäßige Quart
5.	5970,8	F#8 +14 cent	Verminderte Sekund
6.	6603,5	A ^b 8 +14 cent	Kleine Terz

7.	8574,6	C9 +41 cent	Quint
8.	11444	F9 +41 cent	Oktav
9.	14416	A9 +40 cent	Große Terz
10.	17542	C#10 -19 cent	Übermäßige Quint

Tabelle 10: Mode 1-10 der Taste von Van der Plas mit Frequenz, Tonhöhe und Intervall.

Der Grundton respektive erste Teilton der Tasten liegt in einem Bereich von 175 Hz, das einem F3 entspricht. Die zweite Mode entspricht bei Esper (F5 -26 cent), Musser (F5 +27 cent) und vanderPlas (F5 +11 cent) annähernd der Doppeloktave, bei Kosth (F5 -67 cent) und Studio49 (F5 +72 cent) weichen die Ergebnisse stärker von der Doppeloktave ab. Der Grund für das stärkere Abweichen der beiden Tasten ist die fehlende Kenntnis der genauen Materialeigenschaften, sowie die nicht exakte Ermittlung der Geometrie. Die Taste von Kosth weicht nämlich, wie oben schon erwähnt, deutlich von den Maßen der anderen Tasten ab und die Geometrie der Taste von Studio49 wurde mittels einem Foto eruiert, das zu Ungenauigkeiten geführt hat. Die dritte Mode liegt bei der Taste von Esper zwischen einer kleinen und großen Terz (A6 -60 cent), bei Musser bei einer Quint (C7 +5 cent), bei Kosth im Bereich einer Sekund (G6 -15 cent), bei Studio49 bei einer übermäßigen Quart (C#7 -9 cent) und bei vanderPlas bei einer zu hohen Quint (C7 +55 cent).

Daraus kann geschlossen werden, dass die Hersteller sich der Problematik des dritten Teiltens bewusst sind und jeder Hersteller versucht dies auf unterschiedliche Weise zu lösen. Lediglich bei der Taste von Herrn Esper kann es zu Problemen bei der Dur/Moll Differenzierung kommen, da der dritte Teilton im Bereich der Terz liegt.

Neben der Modalanalyse wurde für jede Taste der Hersteller eine Harmonische Analyse erstellt, die folgenden gegenübergestellt werden.

6.2.3. Harmonische Analysen

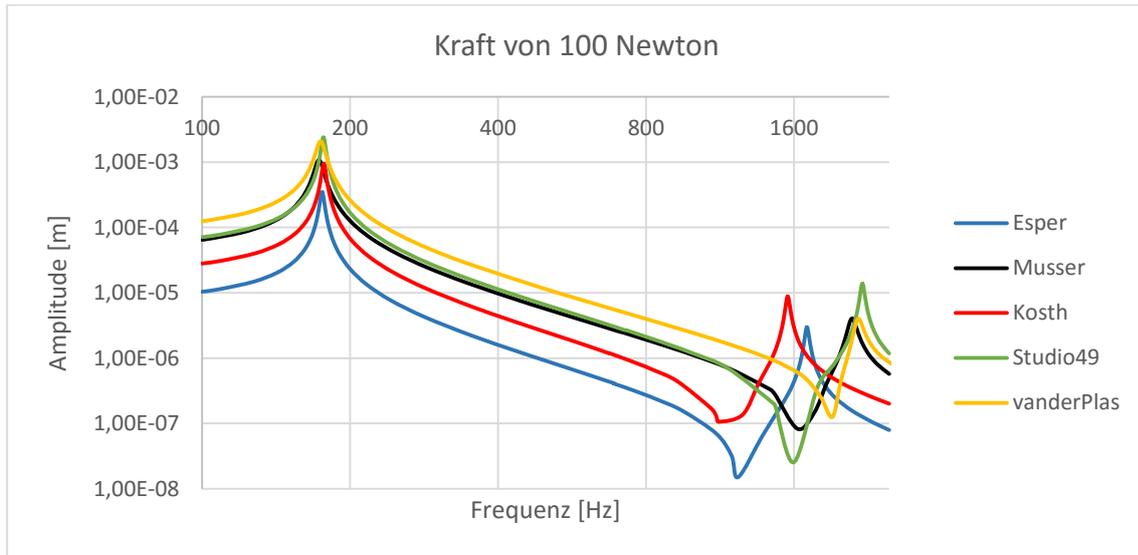


Abbildung 40: Harmonische Analysen aller Hersteller.

In Abbildung 40 werden die harmonischen Analysen der fünf Hersteller übereinander dargestellt. Dabei kann festgehalten werden, dass der erste Peak den ersten Teilton darstellt und dieser bei allen Herstellern übereinstimmt. Der zweite Peak stellt den dritten Teilton dar und hier können größere Abweichungen festgestellt werden. Folgend werden die harmonischen Analysen der fünf Hersteller einzeln aufgelistet und beschrieben.

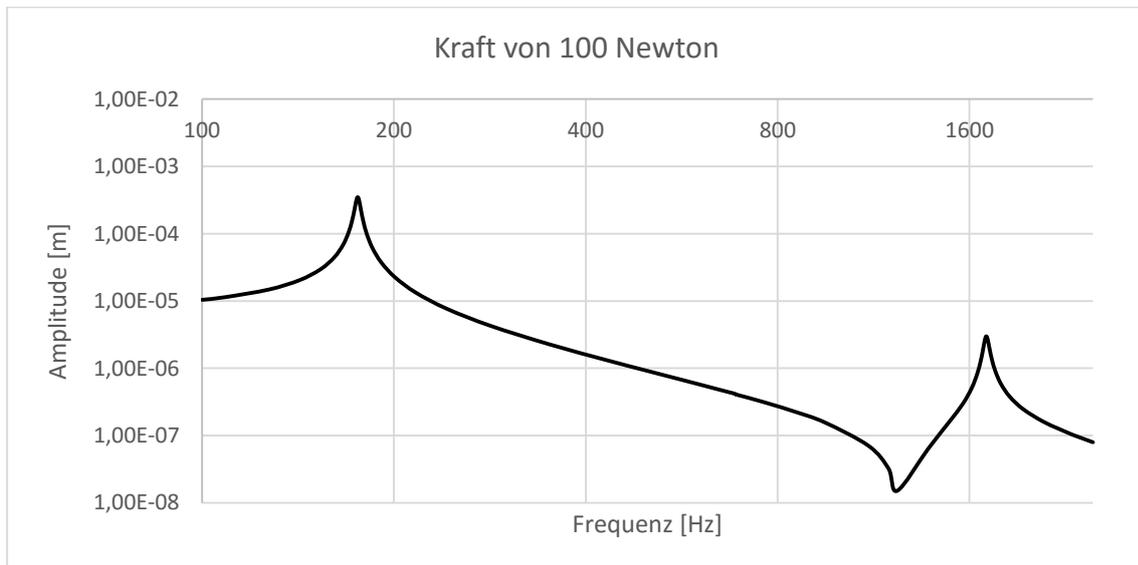


Abbildung 41: Harmonische Analyse Esper (Messdaten siehe 9.1)

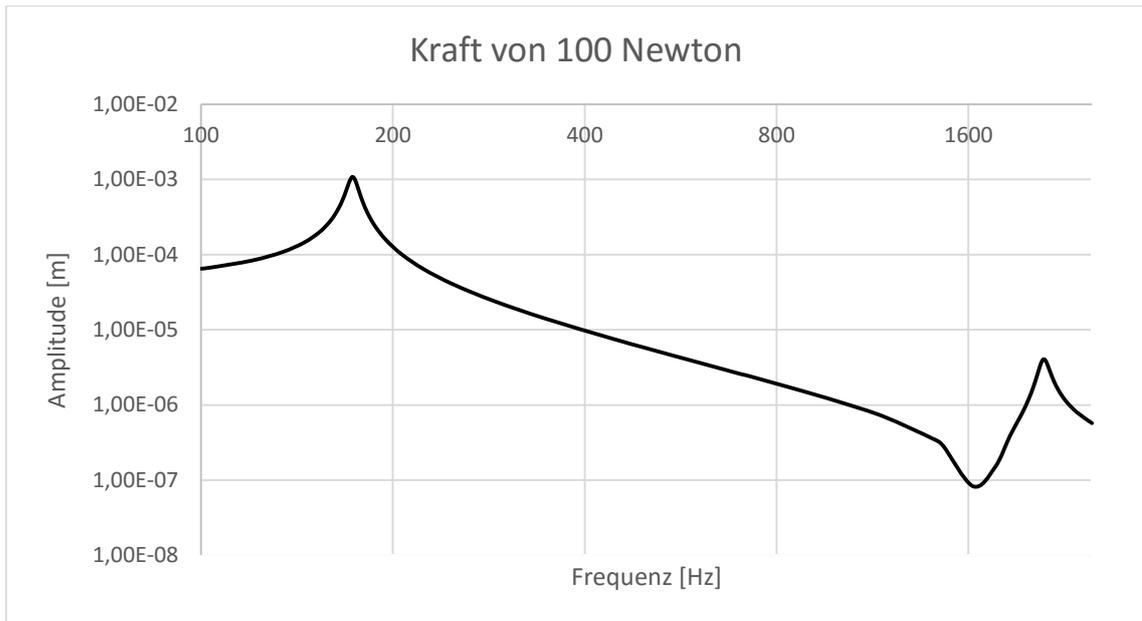


Abbildung 42: Harmonische Analyse Musser (Messdaten siehe 9.2)

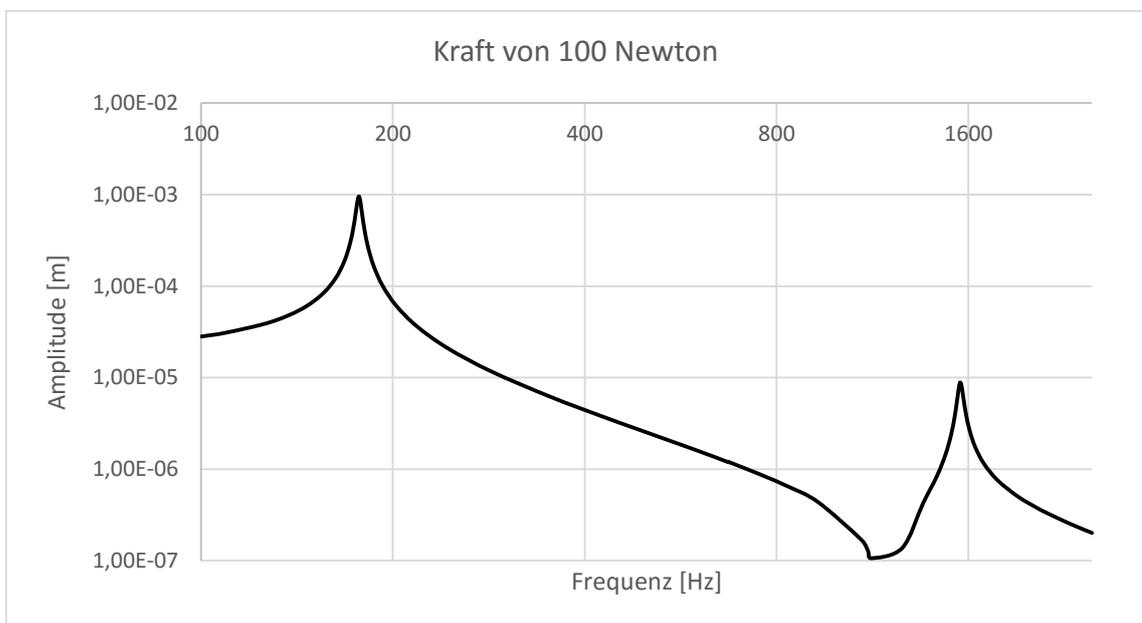


Abbildung 43: Harmonische Analyse Kosth

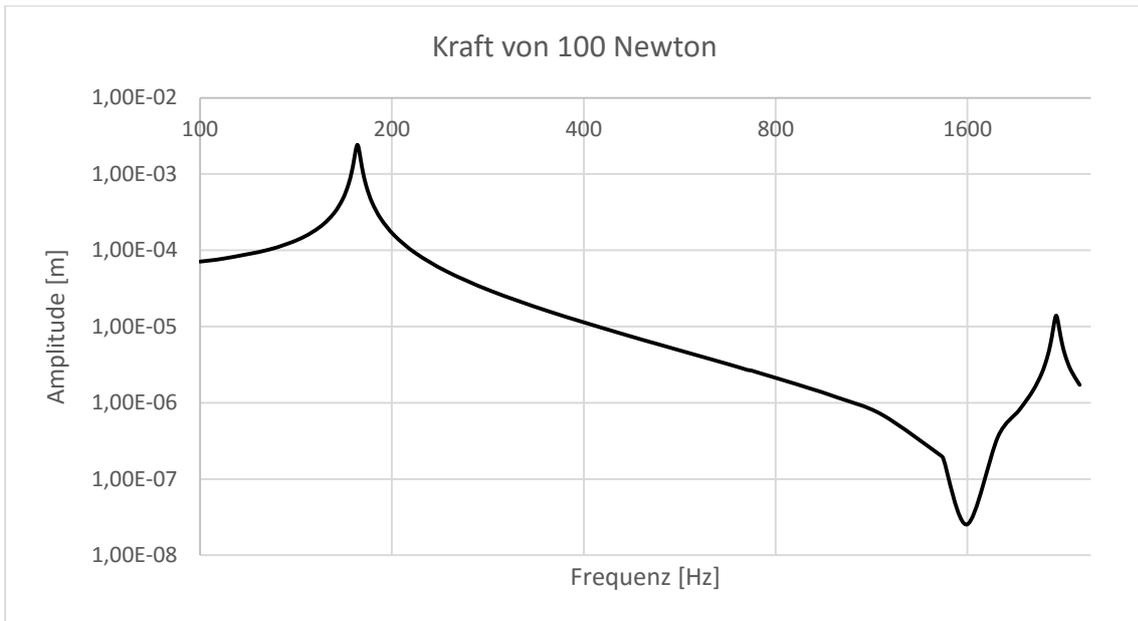


Abbildung 44: Harmonische Analyse Studio49

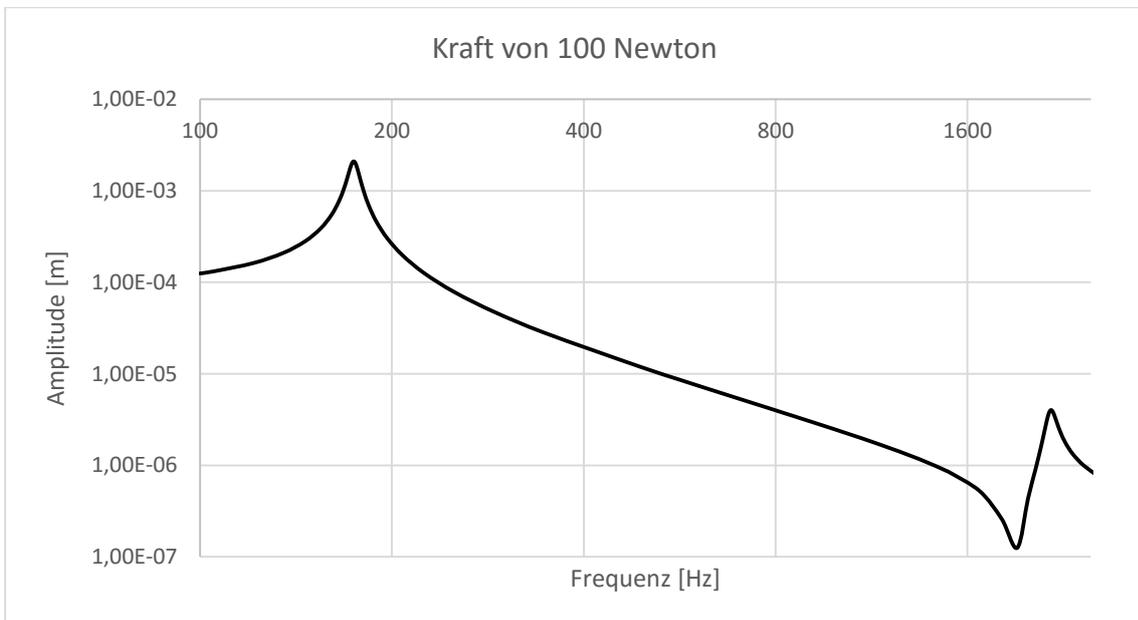


Abbildung 45: Harmonische Analyse Nico van der Plas

In den Abbildungen Abbildung 41-Abbildung 45 werden die harmonischen Analysen der Vibraphontasten der fünf Hersteller mit einer Kraftereinwirkung von 100 Newton dargestellt. Es wurde nur der Frequenzbereich bis 2500 Hz betrachtet, da die Teiltöne oberhalb von 2500 Hz nicht von Relevanz für diese Arbeit sind. Die beiden Peaks in den Grafiken stellen den ersten Teilton und den dritten Teilton der Tasten dar. Die Auslenkungen der Teiltöne [m] sowie die Differenz [dB] werden mit der Formel für die Schalldruckberechnung (s. Kapitel 3) berechnet. Exemplarisch wurde die Taste von Herrn Esper herangezogen:

$$\frac{3,49 * 10^{-4}m}{2,98 * 10^{-6}m} = 117,114m \hat{=} 41dB$$

Tabelle 11 zeigt die Werte aller fünf Hersteller.

Hersteller	1. Teilton [m]	3. Teilton [m]	Differenz [dB]
Esper	$3,49 * 10^{-4}$	$2,98 * 10^{-6}$	41
Musser	$1,08 * 10^{-3}$	$4,06 * 10^{-6}$	48
Kosth	$9,5 * 10^{-4}$	$8,83 * 10^{-7}$	40
Studio49	$2,41 * 10^{-3}$	$1,39 * 10^{-5}$	45
vanderPlas	$2,10 * 10^{-3}$	$4,02 * 10^{-6}$	54

Tabelle 11: Auslenkung der Teiltöne und ihre Differenz in dB.

Die Differenz der beiden Teiltöne ist in dieser Arbeit von maßgeblicher Bedeutung, da wie schon erwähnt, das Hauptaugenmerk auf dem dritten Teilton liegt. Die Ergebnisse werden in folgendem Kapitel gegenübergestellt.

6.3. Vergleich der Ergebnisse

Von fünf simulierten Vibraphontasten liegen vier mehr oder weniger in dem Bereich, der als Ausgangspunkt herangezogen wurde und der auch von Bork (1991, 1995) beschrieben wurde. Wie schon erwähnt wählt jeder Hersteller seinen eigenen Schliff, was zur Folge hat, dass spezielle der dritte Teilton stark variiert. Zum einen in seiner absoluten Tonhöhe und zum anderen in seiner Ausprägung im Verhältnis zum Grundton. Wie in den Analyse zu sehen ist, verhält sich der erste zum zweiten Teilton der Vibraphontasten in einem Verhältnis von 1:4, also die Doppeloktave. Der dritte Teilton weichte jedoch unter den Herstellern stark ab, er variiert zwischen A6 -60 cent bis C#7 -9 cent (vgl. Tabelle 12).

Bei der Vibraphontaste von Studio49 ist der dritte Teilton der höchste unter den Gemessenen. Dieser ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, wie oben beschrieben, jedoch könnte die Abweichung auch durch den einzigartigen Schliff bedingt sein. Offenkundig ist jedoch, dass der dritte Teilton bei den Herstellern und beim Stimmen der Stäbe besondere Beachtung findet.

Hersteller	1. Teilton	2. Teilton	3. Teilton	1.:3. Teilton [dB]
Arnold Esper	F3 +9 cent	F5 -26 cent	A6 -60 cent	41
Musser	F3 -15 cent	F5 +27 cent	C7 +5 cent	48
Studio49	F3 +13 cent	F5 +72 cent	C#7 -9 cent	45
vanderPlas	F3 -2 cent	F5 +11 cent	C7 +55 cent	54

Tabelle 12: Ergebnisse im Überblick der vier relevanten Hersteller

Lediglich bei der Taste von Herrn Esper befindet sich der dritte Teilton im Bereich der großen Terz, bei den anderen drei Herstellern befindet sich dieser im Bereich eine Quinte. Somit stellt die Ausprägung des dritten Teiltönen bei Herrn Esper das größte Problem bezüglich dem Tongeschlecht dar.

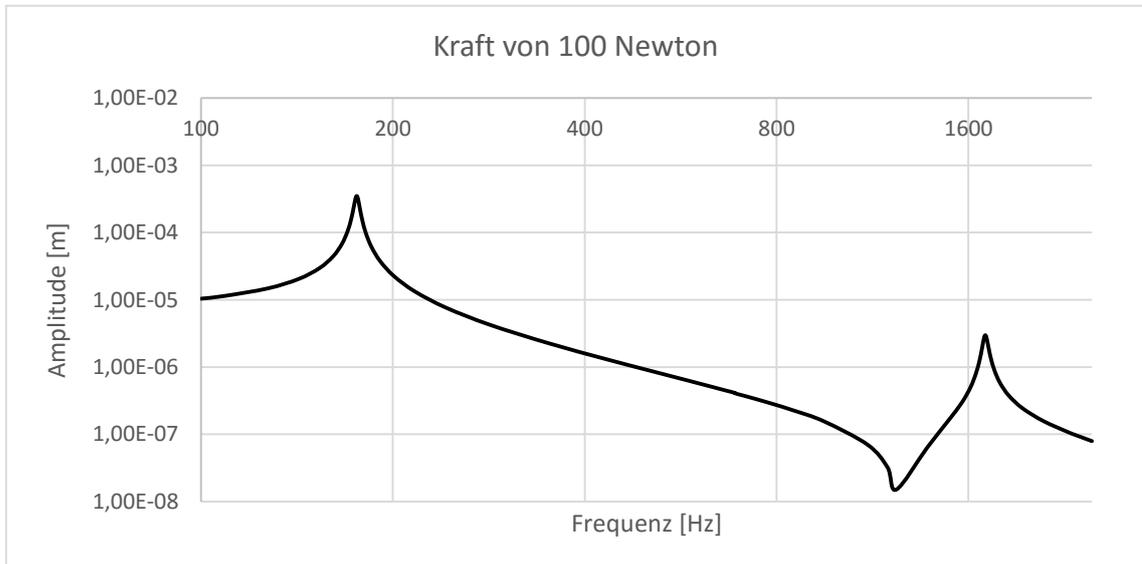
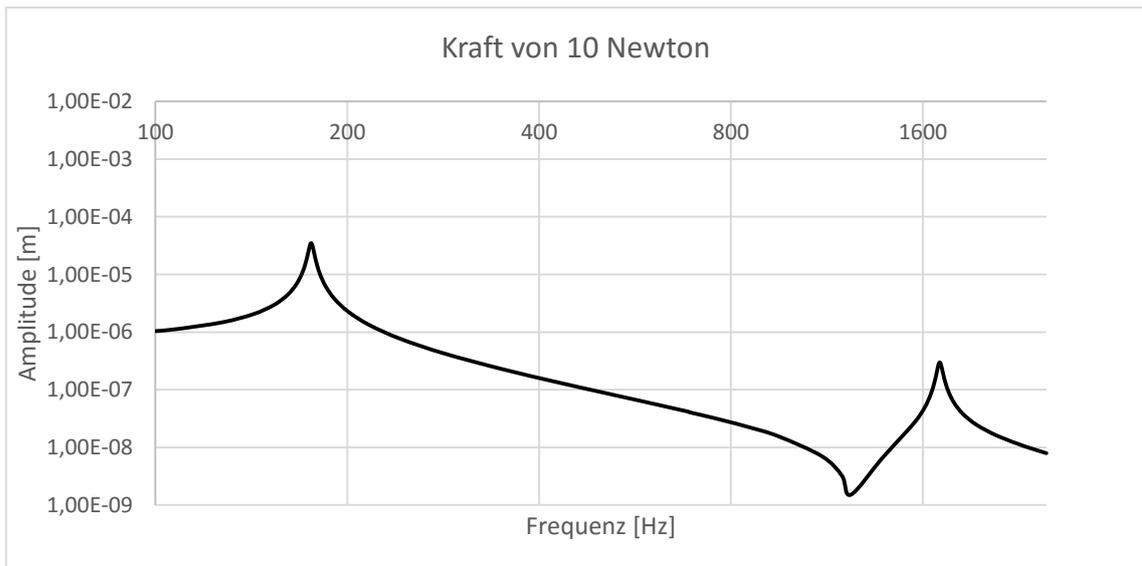
Neben der Tonhöhe des dritten Teiltönen ist die Ausprägung, das Verhältnis vom ersten zum dritten Teilton von großer Bedeutung. Je größer die Differenz der Teiltöne, umso stärker wird der dritte Teilton maskiert und ist von geringerer Bedeutung für den Klangeindruck. Nach diesem Gesichtspunkt ist die Vibraphontaste von vanderPlas mit einem Unterschied von 54 dB die idealste Taste, der dritte Teilton wird am meisten unterdrückt. Die Tasten von Musser (48 dB) und Studio49 (45 dB) liegen in einem ähnlichen Bereich und die Vibraphontaste mit dem kleinsten Abstand (41 dB) ist die von Herrn Esper.

Neben dem Schliff der Vibraphontaste hängt die Ausprägung der Teiltöne unweigerlich vom Vibraphonisten, spricht der Anschlagstelle der Taste, ab. Durch unterschiedliche Anschlagpunkte auf der Taste werden unterschiedlich Teiltöne oder Moden stärker oder weniger stark angeregt. Wird zum Beispiel die Taste bei einem Schwingungsknoten einer bestimmten Mode angeregt wird, diese Mode nicht angeregt und beginnt daher nicht zu schwingen. Diese unterschiedlichen

Anschlagpunkte wurden in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt, da in ANSYS immer der gleiche Punkt für das Anschlagen gewählt wurde.

Nach diesen Analysen wäre die Taste von vanderPlas zu bevorzugen, da diese die besten Werte in der Analyse besitzt.

6.4. Vergleich von unterschiedlichen Kräften



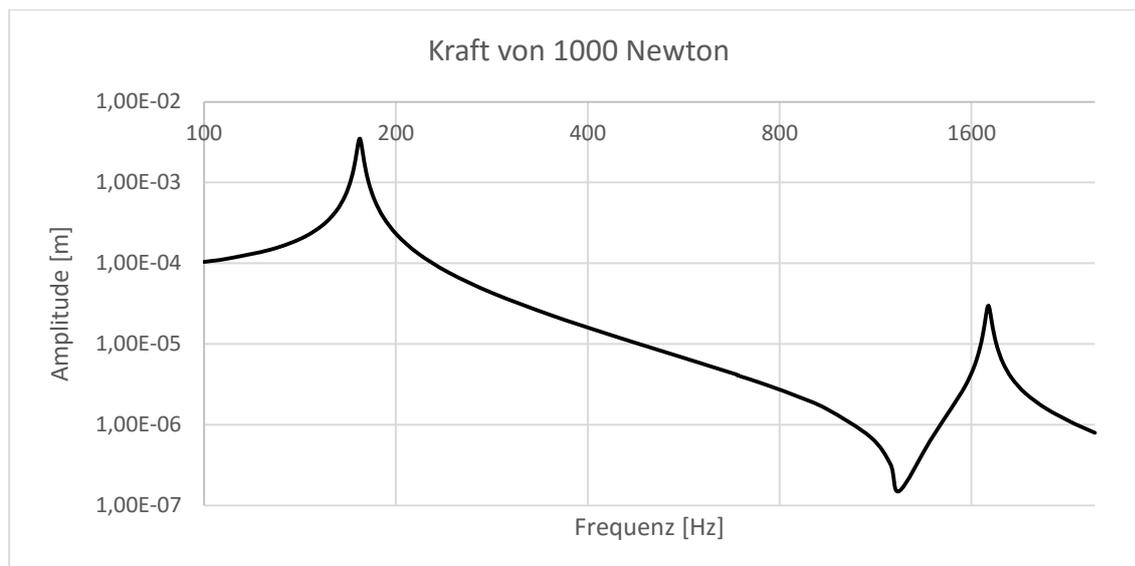


Abbildung 46: Vergleich von drei unterschiedlichen Kräfteinwirkungen auf eine Vibraphontaste. (Messdaten siehe 9.6)

In Abbildung 46 wurde die Vibraphontaste von Herrn Epser mit drei unterschiedlichen Kräfteinwirkungen (10, 100, 1000 N) simuliert. Der Grund für diese Simulation war es, dass die exakte Kraft, mit der ein Vibraphonist bzw. eine Vibraphonistin auf die Tasten schlägt durch meine Recherche nicht eruiert werden konnte und so wurde sie von mir mit 100N eingeschätzt. Um den Einfluss der Kraft auf die Messergebnisse zu verifizieren wurde diese Vibraphontaste mit unterschiedlichen Kräfteinwirkungen simuliert.

Das Ergebnis dieser Simulation lässt den Schluss zu, dass unterschiedliche Kräfte keinen Einfluss auf die harmonische Zusammensetzung besitzen. Die Messwerte ändern sich lediglich in demselben Ausmaß wie die Kraft selbst, also um 10^1 . Somit konnte ein Einfluss der Kraft auf die Auswertung der Vibraphontasten ausgeschlossen werden. In Tabelle 3 werden die Maxima der beiden Teiltöne gegenübergestellt.

Kraft [N]	f_1 (175,51 Hz)	f_2 (1700,5 Hz)
10	$3,49 * 10^{-5}$	$2,98 * 10^{-7}$
100	$3,49 * 10^{-4}$	$2,98 * 10^{-6}$
1000	$3,49 * 10^{-3}$	$2,98 * 10^{-5}$

Tabelle 13: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Kräfteinwirkung (Messdaten siehe 9.6)

6.5. Numerische versus experimenteller Modalanalyse

Um die Genauigkeit der Simulation und Berechnung in ANSYS zu verifizieren wird eine Vibraphontaste von Musser, welche experimentell analysiert wurde, mit den errechneten Werten gegenübergestellt. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf der harmonischen Analyse bzw. der FFT.

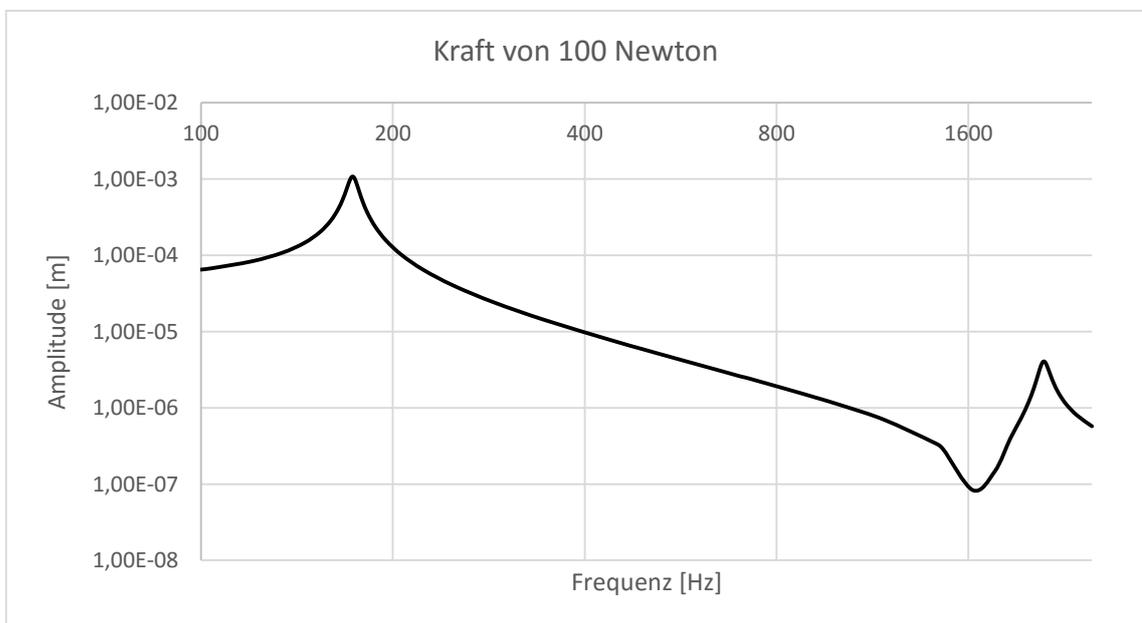
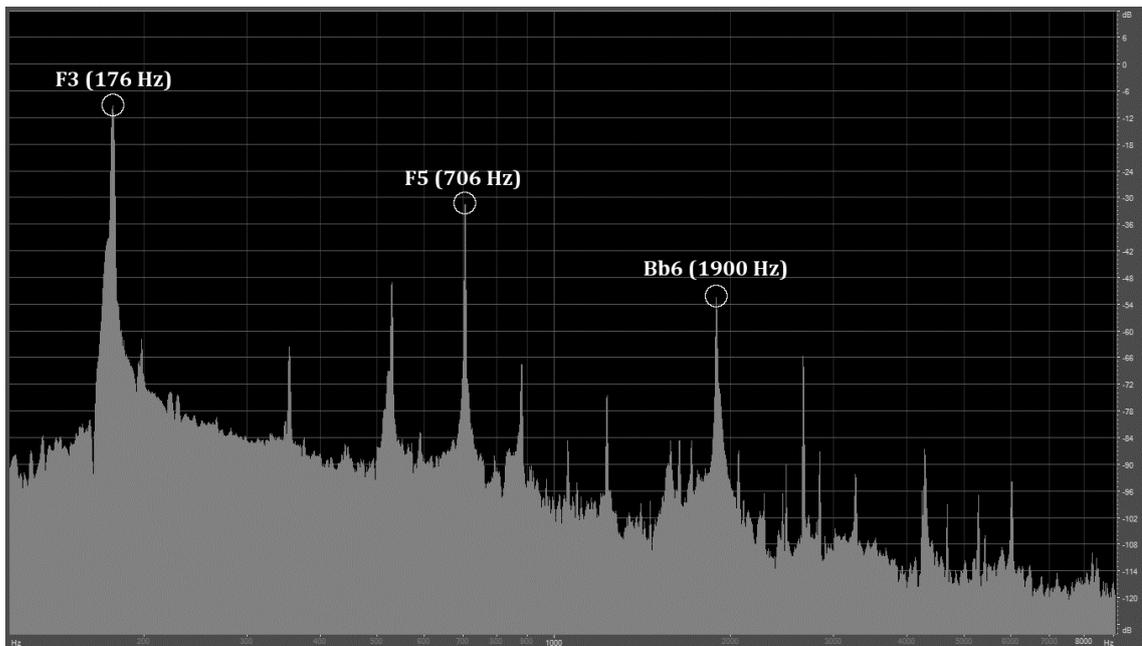


Abbildung 47: FFT (oben) und harmonische Analyse mit ANSYS (unten) von der Vibraphontaste von Musser.

Die experimentell ermittelten Werte der Vibraphontaste von Musser liegen bei F3 (176,55 Hz), F5 (706,5 Hz) und B^b6 (1900 Hz) (vgl. Abbildung 47). Der erste Teilton liegt bei -9 dB und der dritte Teilton bei -52 dB, das einer Differenz von 43 dB entspricht. Die in der harmonischen Analyse in ANSYS berechneten Werte liegen bei F3 (173 Hz), F5 (709,86 Hz) und C7 (2099,6 Hz) (vgl. Abbildung 47 und Tabelle 7).

Eine größere Abweichung lässt sich lediglich beim dritten Teilton feststellen, hier besteht eine Ungenauigkeit von rund 200 Hz, was ungefähr einem Ganzton entspricht. Diese Ungenauigkeit ist dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Umstand geschuldet und ist meiner Ansicht nach vernachlässigbar. Daher lassen sich die Ergebnisse sehr gut mit einander vergleichen, die Position als auch Ausprägung der Teiltöne entspricht der Berechnung in hohem Maß. Auffällig dabei ist, dass der zweite Teilton in der simulierten harmonischen Analyse nicht vorhanden ist. Der Grund dafür ist, dass ANSYS bei der Simulation die Vibraphontaste genau in der Mitte anregt und aufgrund dessen asymmetrische Moden nicht zu schwingen beginnen. Die zweite Mode ist eine asymmetrische Mode (vgl. Abbildung 23) und wird daher in der Simulation nicht angeregt.

Im Gegensatz dazu kann ein Vibraphonist bzw. eine Vibraphonistin die Vibraphontaste nicht exakt in der Mitte anschlagen und deshalb beginnt schwingt die zweite Mode zu schwingen (vgl. Abbildung 47). Dennoch ging es in der Analyse um das Verhältnis zwischen dem ersten und dem dritten Teilton und somit ist dieser Umstand vernachlässigbar.

Zudem beträgt der Pegelunterschied bei der experimentellen Analyse rund 43dB und der simulierte bei rund 48dB, was eine durchaus gute Übereinstimmung liefert. Somit konnten die Berechnungen von ANSYS experimentell überprüft werden und gute Ergebnisse erzielt werden.

7. Conclusio

Im Zuge dieser Arbeit wurden mehrere Problemstellungen erkennbar: Wie kann die exakte Geometrie der Vibraphontasten ermittelt werden? Wie kann die Materialeigenschaft definiert werden und wie kann eine Vibraphontasten in FreeCAD importiert, bearbeitet und für ein Programm wie ANSYS exportiert werden? Und was mit den Ergebnissen anfangen?

Die Antworten auf diese Fragen wurden im Verlauf dieser Arbeit thematisiert und im Folgenden diskutiert. Durch das Einscannen der Vibraphontasten konnte der Querschnitt der Tasten gut nachempfunden werden. Um jedoch genauere Aussagen bezüglich der Geometrie zu treffen bräuchte es eine 3D-Scanner, um Rundungen, Schrägen etc. genau zu ermitteln.

Zudem sind die Aushöhlungen bei den Stäben nicht symmetrisch von Mittelpunkt aus angeordnet, was in den Grafiken meist der Fall ist. Trotz dieser kleineren Ungenauigkeiten wurden mit Hilfe von ANSYS gute Ergebnisse erzielt.

Es wäre dennoch sinnvoll bei weiteren Untersuchungen, Forschungen oder Experimenten die Geometrie der Tasten exakt zu ermitteln, um genauere Ergebnisse generieren zu können.

Die Problemstellung der Materialeigenschaften stellt das größte Problem dar. Da kein Hersteller die genaue Materialzusammensetzung seiner Vibraphontasten preisgeben möchte, wäre es wohl in weiterer Folge ratsam eine Massenspektroskopie der Tasten durchzuführen. Da das Institut für Musikwissenschaft nicht über die Gerätschaften verfügt wäre eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit einem chemischen Institut von Nöten. Als Material wurde eine Aluminiumlegierung herangezogen (Al2024), das zur Folge hatte, dass die Grundtöne der Tasten variierten. Um die absoluten Tonhöhen der verschiedenen Vibraphontasten vergleichen zu können, wurden Änderungen in der Dichte des Materials vorgenommen. Dieser Aspekt könnte ein Kritikpunkt dieser Arbeit sein, jedoch auch ein zentraler Baustein, um weiterführende Forschung zu betreiben.

Die Ermittlung der Geometrie wurde oben schon erwähnt und konnte aufgrund der großen Hilfe von Elisabeth Hofer in Pfade umgewandelt werden. Diese Pfade

wurden anschließend in FreeCAD importiert und in ein für ANSYS lesbares Format exportiert.

Die Auswertung der Ergebnisse korreliert mit der Annahme von Bork (1991)(s. Kapitel 6), dass der dritte Teilton im Bereich der Terz liegt und dieser beim Zusammenklingen als störend empfunden werden kann, nur bei der Vibraphontaste von Herrn Esper. Bei den übrigen Herstellern ist der dritte Teilton anders ausgeprägt und besitzt zudem eine unterschiedliche Tonhöhe. Zudem variiert das Verhältnis von ersten zum dritten Teilton stark. Um hier einen weiteren Forschungsansatz zu beschreiben, wäre es möglich über Experimente mit der Geometrie der Vibraphontaste, eine Taste zu entwickeln, bei der die dritte Mode schwach bis kaum mehr wahrzunehmen ist. Hierfür müsste allerdings mehr Arbeit und Know-how in FreeCAD investiert werden, um die Geometrie des Schliffs minimal verändern zu können. Um nämlich die dritte Mode zu eliminieren oder in ihrer Schwingung zu hindern, müsste in der Mitte des Stabes, an der diese Mode die größte Auslenkung besitzt, Material hinzugefügt werden um die Schwingung dieser Mode zu unterbinden oder zu erschweren. Wird jedoch an einer Stelle Material hinzugefügt, dann müsste an einer anderen Stelle des Stabes Material abgetragen werden, um die Grundfrequenz nicht zu verändern. Ob sich dadurch bessere Ergebnisse generieren lassen, wäre Gegenstand einer weiteren Arbeit und setzt viel Kenntnis von CAD-Programmen voraus. Dennoch wäre es spannend in diesem Bereich weiterführende Forschungen zu betreiben.

8. Literaturverzeichnis

- Beck, John H. (Hrsg.). *Encyclopedia of percussion*. New York, NY: Garland 1995. (Garland reference library of the humanities, 947).
- Berendt, Joachim E. & Huesmann, Günther. *Das Jazzbuch: Von New Orleans bis in die achtziger Jahre ; mit ausführlicher Diskographie*. 4. Aufl., 9. - 10. Tsd. Frankfurt am Main: Krüger 1989.
- Blume, Friedrich & Finscher, Ludwig (Hrsg.). *Die Musik in Geschichte und Gegenwart: Allgemeine Enzyklopädie der Musik ; 21 Bände in zwei Teilen*. 2., neubearb. Ausg. Kassel: Bärenreiter 1994.
- Bork, Ingolf. Abstimmung von Xylophonstäben. *Instrumentenbau* 45(10) 1991, 51–59.
- Bork, Ingolf. Practical Tuning of Xylophone Bars and Resonators. *Applied Acoustics*(46) 1995, 103–127.
- Cremer, Lothar & Heckl, Manfred. *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer 1996.
- Dickreiter, Michael, u.a. *Handbuch der Tonstudioteknik: Bd. 1: Mit 173 Tabellen*. 8., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Boston, Mass: De Gruyter Saur 2014.
- Fletcher, Neville H. & Rossing, Thomas D. *The physics of musical instruments*. 2. ed., corr. 7. print. New York, NY: Springer 1998.
- Fouad, Nabil A. (Hrsg.). *Bauphysik-Kalender 2009*. Germany: Ernst & Sohn Verlag 2009.
- Hall, Donald E. (Hrsg.). *Musikalische Akustik: Ein Handbuch*. Mainz: Schott 2008.
- Heise Birgit. Vibraphon, in Blume, Friedrich & Finscher, Ludwig(Hrsg.): *Die Musik in Geschichte und Gegenwart: Allgemeine Enzyklopädie der Musik ; 21 Bände in zwei Teilen*. Kassel: Bärenreiter 1994, 1472–1474.
- Holland, James & Herrmann, Karl-Albrecht. *Das Schlagzeug*. 2., durchges. und aktualisierte Aufl. Frankfurt/M.: Ed. Bergh im Verl. Ullstein 1994. (Yehudi Menuhins Musikführer).

- Hornbostel, Erich M. & Sachs, Curt. Systematik der Musikinstrumente.: Ein Versuch. *Zeitschrift für Ethnologie*(Band 46, Nr. 4-5) 1914, 553–590.
- Kammer, Catrin. *Aluminium-Taschenbuch*. 17., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Beuth 2014. (Praxis Werkstoffe).
- Kampmann, Wolf & Jost, Ekkehard (Hrsg.). *Reclams Jazzlexikon*. 2., erw. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Reclam 2009.
- Kernfeld, Barry (Hrsg.). *The new Grove dictionary of jazz*. 2. ed. New York, London: Grove's Dictionaries Inc; Macmillan 2002.
- Klein, Bernd. *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 10., verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. (Lehrbuch).
- Kohlrausch, Friedrich, u.a. (Hrsg.). *Praktische Physik: Zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik*. 24., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner 1996.
- Kollmann, Franz G. *Maschinenakustik: Grundlagen, Meßtechnik, Berechnung, Beeinflussung*. 2., neubearb. Aufl. Berlin: Springer 2000.
- Montagu, Jeremy. *Timpani and percussion*. New Haven: Yale University Press 2002. (The Yale musical instrument series).
- Mortimer, Charles E. & Müller, Ulrich. *Chemie: Das Basiswissen der Chemie ; 520 Formelbilder, 126 Tabellen*. 9., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme 2007.
- Rossing, Thomas D. (Hrsg.). *Springer handbook of acoustics*. New York: Springer Science+Business Media LLC New York 2007.
- Rossing, Thomas D. *Science of percussion instruments*. Repr. Singapore: World Scientific 2008. (Series in popular science, 3).
- Sadie, Stanley (Hrsg.). *The New Grove dictionary of music and musicians*. Repr. London, Hong Kong, New York, NY: Macmillan; Grove's Dictionaries of Music 1995.
- Schlüter, Wolfgang. *Privatarchiv. Wolfgang Schlüter, Privatarchiv*.
- Seidl, Helmut. *Frequenztafeln Cent-Hertz*. Frankfurt a.M.: Verl. Das Musikinstrument 1970.

Spitzer, Manfred. *Musik im Kopf: Hören, musizieren, verstehen und erleben im neuronalen Netzwerk*. 10., unveränd. Nachdr. d. 1.Aufl. Stuttgart: Schattauer 2013.

Trommer, Hal. The Vibraphone, Vibraharp, and Vibes, in Beck, John H.(Hrsg.): *Encyclopedia of percussion*. New York, NY: Garland 1995. (Garland reference library of the humanities, 947), 339–343.

White, James T. & Derby, George. *The National Cyclopedia of American Biography: Being the history of the United States as illustrated in the lives of the founders, builders and defenders of the republic, and of the men and women who were doing the work and molding the thought of the present time*. Volume 43. New York: James T. White & Company 1961.

Internetquellen

Blumenthal, Bob. *Gary Burton and Berklee* 2010. URL:

<https://www.berklee.edu/news/1749/gary-burton-and-berklee> [Stand 2016-09-22].

Chinen Nate 2016. Bobby Hutcherson, Vibraphonist With Coloristic Range of

Sound, Dies at 75. *The New York Times* 16. August. Online im Internet: URL:

http://www.nytimes.com/2016/08/17/arts/music/bobby-hutcherson-dies-jazz.html?_r=1 [Stand 2016-09-28].

Deisenberger, Markus. *Porträt: Werner Pirchner*. Wien 2010. URL:

<http://www.musicaustria.at/portraet-werner-pirchner/> [Stand 2016-09-22].

Gabbert, Ulrich. *Finite-Element-Methode: Teil I (FEM-I)*. Magdeburg ca. 2000. URL:

<http://www.uni-magdeburg.de/ifme/l-numerik/fem-1-kapitel%201.pdf> [Stand 2016-09-12].

Huber, Christoph 2014. "D.U.D.A.": von Malte Ludin ist eine charmante

dokumentarische Hommage an den großen Musiker und Querkopf, der als "der Zappa von Tirol" für Aufregung und Jubel sorgte. *Die Presse* 27. März. Online im

Internet: URL: http://diepresse.com/home/kultur/popco/1583038/Werner-Pirchner_Genie-und-Irrsinn [Stand 2016-09-22].

James A. Strain. *John Calhoun Deagan* 1999. URL: [http://www.pas.org/About/the-society/halloffame/Deagan\]C.aspx](http://www.pas.org/About/the-society/halloffame/Deagan]C.aspx) [Stand 2016-09-20].

Liebmann, Nick 2002. Zum Tod des Jazzmusikers Lionel Hampton: Startläufer, Entdecker, Humanist. *Neue Zürcher Zeitung* 2. September. Online im Internet: URL: <http://www.nzz.ch/article8DCLE-1.420571> [Stand 2016-09-20].

Ludwig Drums. *About*. URL: <http://www.ludwig-drums.com/en-us/ludwig/about> [Stand 2016-09-26].

Mathiak, Friedrich U. *Die Methode der finiten Elemente (FEM): Einführung und Grundlagen*. Neubrandenburg 2010. URL: http://www.mechanik-info.de/dokumente/Skript_FEM.pdf [Stand 2016-09-12].

Michael Naura 1983. Wolfgang Schlüter wird fünfzig: Funkenstiebendes Vibraphon. *Die Zeit Online* 14. Oktober. Online im Internet: URL: <http://www.zeit.de/1983/42/funkenstiebendes-vibraphon> [Stand 2016-09-22].

Mike Mainieri. *Bio*. URL: http://nycrecords.com/?page_id=465 [Stand 2016-09-22].

Pirchner, Elfriede. *Biographie* 2002-2016. URL: <http://www.wernerpirchner.com/4DCGI/biografie> [Stand 2016-09-22].

reisser musik. *Studio49 Instrumentenbau: Studio49 RVC 4000 Vibraphon* 2016. URL: <https://www.reisser-musik.de/vibraphon-studio49-rvc-4000/> [Stand 2016-09-28].

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. *Lexikon der Optik: optische Glasarten*. Heidelberg 1999. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/optische-glasarten/2290> [Stand 2016-09-29].

Studio49 Musikinstrumentenbau. *Geschichte Studio 49*. URL: <http://www.studio49.de/de/ueber-uns/geschichte-studio-49/> [Stand 2016-09-28].

The Deagan Resource. *Deagan Vibraphars*. URL: <http://www.deaganresource.com/vibraphones.html> [Stand 2016-10-04].

vanderPlas muziekinstrumenten. *vanderPlas vibraphones* 2015. URL:

<http://www.vanderplastal.com/index.php/home> [Stand 28.09.216].

Wittel, Falk W. *FEM for 4: Eine kurze Einführung in die Fenite Elemente Methode* 2009. URL:

http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe3/fem_skript [Stand 2016-09-12].

Ziegenhals, Gunter. *Zum Stimmen von Klangstäben*. TU Dresden 2010. URL:

<http://www.ifm-zwota.de/stabspie.pdf> [Stand 2016-10-27].

9. Appendix

9.1. Messdaten Abbildung 41

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	1,04E-05
108,62	1,14E-05
127,25	1,48E-05
142,28	2,04E-05
153,44	2,96E-05
161,23	4,45E-05
166,43	6,81E-05
169,81	1,05E-04
171,96	1,56E-04
173,31	2,19E-04
174,15	2,77E-04
174,67	3,16E-04
174,99	3,36E-04
175,19	3,44E-04
175,32	3,47E-04
175,39	3,48E-04
175,44	3,49E-04
175,47	3,49E-04
175,49	3,49E-04
175,5	3,49E-04
175,51	3,49E-04
175,53	3,49E-04
175,54	3,49E-04
175,56	3,49E-04
175,59	3,49E-04
175,64	3,48E-04
175,71	3,46E-04
175,84	3,43E-04
176,04	3,34E-04
176,36	3,13E-04
176,89	2,73E-04
177,75	2,14E-04
179,15	1,50E-04
181,41	9,77E-05
185,09	6,11E-05
191,06	3,74E-05
200,76	2,25E-05
216,51	1,33E-05
242,08	7,67E-06
283,6	4,27E-06
351,03	2,26E-06

431,91	1,31E-06
499,04	9,16E-07
557,98	6,96E-07
601,75	5,77E-07
632,29	5,10E-07
652,7	4,71E-07
665,93	4,48E-07
674,35	4,35E-07
679,65	4,27E-07
682,95	4,21E-07
685	4,18E-07
686,26	4,15E-07
687,05	4,13E-07
687,53	4,12E-07
687,83	4,11E-07
688,01	4,11E-07
688,12	4,11E-07
688,19	4,10E-07
688,24	4,10E-07
688,31	4,10E-07
688,38	4,10E-07
688,42	4,10E-07
688,49	4,10E-07
688,6	4,09E-07
688,78	4,09E-07
689,08	4,08E-07
689,57	4,07E-07
690,36	4,05E-07
691,63	4,03E-07
693,71	3,99E-07
697,08	3,94E-07
702,55	3,86E-07
711,43	3,74E-07
725,86	3,55E-07
749,28	3,27E-07
787,32	2,85E-07
849,08	2,28E-07
949,36	1,56E-07
1112,2	6,99E-08
1194,4	3,23E-08
1232,9	1,51E-08
1378,6	6,35E-08

1486,7	1,58E-07
1562,2	2,95E-07
1612,6	5,03E-07
1645,3	8,19E-07
1666,1	1,27E-06
1679,2	1,81E-06
1687,3	2,32E-06
1692,4	2,66E-06
1695,5	2,84E-06
1697,4	2,92E-06
1698,6	2,95E-06
1699,4	2,97E-06
1699,8	2,97E-06
1700,1	2,98E-06
1700,3	2,98E-06
1700,4	2,98E-06
1700,5	2,98E-06
1700,7	2,98E-06
1700,8	2,98E-06
1701	2,98E-06
1701,3	2,98E-06
1701,7	2,97E-06
1702,5	2,96E-06
1703,7	2,94E-06
1705,6	2,87E-06
1708,8	2,70E-06
1713,9	2,37E-06
1722,2	1,88E-06
1735,7	1,34E-06
1757,7	8,97E-07
1793,3	5,83E-07
1851,2	3,77E-07
1945,2	2,44E-07
2097,8	1,58E-07
2299,7	1,07E-07
2349,9	9,85E-08
2500	7,93E-08

9.2. Messdaten Abbildung 42

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	6,50E-05
104,07	6,78E-05
120,24	8,36E-05
134,04	1,08E-04
145,07	1,45E-04

153,43	2,00E-04
159,52	2,80E-04
163,83	3,93E-04
166,82	5,39E-04
168,86	7,03E-04
170,23	8,53E-04
171,16	9,61E-04
171,78	1,02E-03
172,19	1,06E-03
172,46	1,07E-03
172,65	1,08E-03
172,77	1,08E-03
172,85	1,08E-03
172,9	1,08E-03
172,94	1,08E-03
173	1,08E-03
173,07	1,08E-03
173,11	1,08E-03
173,16	1,08E-03
173,24	1,08E-03
173,36	1,07E-03
173,55	1,06E-03
173,82	1,05E-03
174,24	1,01E-03
174,87	9,41E-04
175,82	8,26E-04
177,26	6,70E-04
179,42	5,01E-04
182,69	3,52E-04
187,63	2,38E-04
195,08	1,57E-04
206,32	1,01E-04
223,3	6,44E-05
248,93	4,01E-05
287,61	2,43E-05
346,01	1,42E-05
441,43	7,65E-06
493,35	5,86E-06
549,97	4,55E-06
595,22	3,79E-06
629,54	3,33E-06
654,54	3,04E-06
672,22	2,86E-06
684,47	2,74E-06
692,84	2,66E-06

698,49	2,61E-06
702,29	2,58E-06
704,83	2,56E-06
706,52	2,55E-06
707,64	2,54E-06
708,39	2,54E-06
708,89	2,54E-06
709,22	2,53E-06
709,43	2,53E-06
709,58	2,53E-06
709,86	2,53E-06
710,15	2,53E-06
710,29	2,53E-06
710,51	2,52E-06
710,84	2,52E-06
711,34	2,52E-06
712,09	2,51E-06
713,22	2,51E-06
714,93	2,49E-06
717,52	2,48E-06
721,42	2,45E-06
727,3	2,40E-06
736,19	2,33E-06
749,61	2,24E-06
769,86	2,10E-06
800,43	1,91E-06
846,58	1,68E-06
916,24	1,38E-06
1021,4	1,05E-06
1180,1	6,97E-07
1404,7	3,58E-07
1459,2	2,89E-07
1626,7	8,29E-08
1760,5	1,47E-07
1862	3,98E-07
1935,9	7,32E-07
1988,2	1,18E-06
2024,5	1,76E-06
2049,2	2,42E-06
2065,9	3,03E-06
2077,2	3,48E-06
2084,7	3,75E-06
2089,7	3,90E-06
2093	3,97E-06
2095,2	4,01E-06

2096,7	4,03E-06
2097,7	4,04E-06
2098,3	4,05E-06
2098,7	4,05E-06
2099,6	4,05E-06
2100,4	4,06E-06
2100,8	4,06E-06
2101,5	4,06E-06
2102,5	4,06E-06
2103,9	4,05E-06
2106,1	4,04E-06
2109,5	3,99E-06
2114,6	3,88E-06
2122,2	3,66E-06
2133,7	3,27E-06
2151,2	2,72E-06
2177,4	2,11E-06
2217,1	1,55E-06
2277	1,12E-06
2367,4	7,99E-07
2500	5,73E-07

9.3. Messdaten Abbildung 43

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	2,81E-05
109,48	3,10E-05
128,26	4,02E-05
143,4	5,56E-05
154,65	8,06E-05
162,5	1,21E-04
167,75	1,85E-04
171,15	2,85E-04
173,31	4,26E-04
174,67	5,97E-04
175,52	7,55E-04
176,05	8,60E-04
176,38	9,14E-04
176,58	9,36E-04
176,7	9,45E-04
176,78	9,49E-04
176,82	9,50E-04
176,85	9,50E-04
176,87	9,50E-04
176,88	9,50E-04
176,9	9,50E-04

176,92	9,50E-04
176,93	9,50E-04
176,95	9,50E-04
176,98	9,49E-04
177,02	9,47E-04
177,1	9,43E-04
177,22	9,33E-04
177,43	9,08E-04
177,76	8,52E-04
178,29	7,43E-04
179,15	5,81E-04
180,56	4,08E-04
182,84	2,66E-04
186,55	1,66E-04
192,57	1,02E-04
202,35	6,13E-05
218,22	3,62E-05
243,99	2,09E-05
285,84	1,16E-05
353,8	6,14E-06
424,91	3,79E-06
487,89	2,68E-06
545,51	2,03E-06
588,3	1,68E-06
618,16	1,48E-06
638,11	1,36E-06
651,05	1,29E-06
659,28	1,25E-06
664,46	1,22E-06
667,69	1,21E-06
669,69	1,20E-06
670,93	1,20E-06
671,69	1,19E-06
672,17	1,19E-06
672,46	1,19E-06
672,64	1,19E-06
672,75	1,19E-06
672,82	1,19E-06
672,86	1,19E-06
672,93	1,19E-06
672,99	1,19E-06
673,03	1,19E-06
673,1	1,19E-06
673,21	1,19E-06
673,39	1,19E-06

673,68	1,19E-06
674,16	1,19E-06
674,93	1,18E-06
676,18	1,18E-06
678,21	1,17E-06
681,5	1,16E-06
686,85	1,13E-06
695,53	1,09E-06
709,64	1,04E-06
732,54	9,48E-07
769,72	8,23E-07
830,1	6,54E-07
928,14	4,39E-07
1087,3	1,68E-07
1113,4	1,27E-07
1126,6	1,06E-07
1259,6	1,37E-07
1358,5	4,24E-07
1427,4	8,33E-07
1473,5	1,45E-06
1503,4	2,39E-06
1522,4	3,72E-06
1534,3	5,34E-06
1541,8	6,86E-06
1546,4	7,89E-06
1549,3	8,42E-06
1551	8,66E-06
1552,1	8,76E-06
1552,8	8,80E-06
1553,2	8,82E-06
1553,5	8,82E-06
1553,6	8,83E-06
1553,7	8,83E-06
1553,9	8,83E-06
1554	8,83E-06
1554,1	8,83E-06
1554,3	8,83E-06
1554,5	8,83E-06
1554,9	8,82E-06
1555,6	8,79E-06
1556,7	8,71E-06
1558,5	8,51E-06
1561,4	8,02E-06
1566,1	7,05E-06
1573,7	5,59E-06

1586	4,01E-06
1606,1	2,69E-06
1638,6	1,76E-06
1691,5	1,15E-06
1777,4	7,57E-07
1916,8	4,97E-07
2066,1	3,65E-07
2090,1	3,50E-07
2254,1	2,72E-07
2368,5	2,34E-07
2445	2,14E-07
2494,5	2,02E-07
2500	2,01E-07

177,13	2,30E-03
177,45	2,16E-03
177,99	1,88E-03
178,85	1,47E-03
180,25	1,03E-03
182,53	6,74E-04
186,23	4,22E-04
192,24	2,58E-04
202	1,55E-04
217,85	9,19E-05
243,58	5,30E-05
285,36	2,96E-05
353,2	1,57E-05
452,26	8,34E-06
527,76	5,75E-06
590,09	4,41E-06
636,38	3,68E-06
668,69	3,27E-06
690,27	3,03E-06
704,26	2,88E-06
713,17	2,79E-06
718,77	2,74E-06
722,26	2,70E-06
724,42	2,69E-06
725,76	2,68E-06
726,59	2,68E-06
727,1	2,68E-06
727,42	2,68E-06
727,61	2,68E-06
727,73	2,67E-06
727,81	2,67E-06
727,85	2,67E-06
727,92	2,67E-06
728	2,67E-06
728,04	2,67E-06
728,12	2,67E-06
728,24	2,67E-06
728,43	2,67E-06
728,75	2,67E-06
729,26	2,67E-06
730,09	2,67E-06
731,44	2,66E-06
733,64	2,64E-06
737,2	2,61E-06
742,99	2,56E-06

9.4. Messdaten Abbildung 44

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	7,12E-05
109,29	7,83E-05
128,04	1,02E-04
143,16	1,41E-04
154,39	2,04E-04
162,23	3,07E-04
167,46	4,70E-04
170,86	7,21E-04
173,02	1,08E-03
174,38	1,51E-03
175,22	1,91E-03
175,75	2,18E-03
176,08	2,31E-03
176,28	2,37E-03
176,4	2,39E-03
176,48	2,40E-03
176,52	2,41E-03
176,55	2,41E-03
176,57	2,41E-03
176,58	2,41E-03
176,6	2,41E-03
176,62	2,41E-03
176,63	2,41E-03
176,65	2,41E-03
176,68	2,40E-03
176,72	2,40E-03
176,8	2,39E-03
176,92	2,36E-03

752,38	2,48E-06
767,64	2,36E-06
792,41	2,18E-06
832,63	1,92E-06
897,95	1,58E-06
1004	1,16E-06
1176,2	6,97E-07
1455,8	2,01E-07
1466,5	1,85E-07
1598,7	2,54E-08
1787,5	3,62E-07
1927,8	7,95E-07
2025,6	1,43E-06
2091	2,39E-06
2133,4	3,86E-06
2160,4	5,94E-06
2177,3	8,47E-06
2187,9	1,08E-05
2194,5	1,24E-05
2198,5	1,32E-05
2201	1,36E-05
2202,6	1,38E-05
2203,5	1,38E-05
2204,1	1,38E-05
2204,5	1,39E-05
2204,7	1,39E-05
2204,8	1,39E-05
2205,1	1,39E-05
2205,3	1,39E-05
2205,4	1,39E-05
2205,6	1,39E-05
2206	1,39E-05
2206,6	1,38E-05
2207,5	1,38E-05
2209,1	1,37E-05
2211,6	1,33E-05
2215,7	1,25E-05
2222,4	1,10E-05
2233,2	8,70E-06
2250,7	6,20E-06
2279,1	4,13E-06
2325,4	2,68E-06
2400,4	1,72E-06
2500	1,18E-06

9.5. Messdaten Abbildung 45

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	1,25E-04
104,85	1,32E-04
121,15	1,62E-04
135,05	2,09E-04
146,16	2,81E-04
154,59	3,88E-04
160,73	5,44E-04
165,07	7,63E-04
168,08	1,05E-03
170,13	1,37E-03
171,52	1,66E-03
172,45	1,87E-03
173,08	1,99E-03
173,49	2,05E-03
173,77	2,08E-03
173,95	2,09E-03
174,07	2,10E-03
174,15	2,10E-03
174,21	2,10E-03
174,24	2,10E-03
174,31	2,10E-03
174,38	2,10E-03
174,42	2,09E-03
174,47	2,09E-03
174,55	2,09E-03
174,67	2,08E-03
174,86	2,07E-03
175,14	2,03E-03
175,56	1,96E-03
176,19	1,83E-03
177,15	1,61E-03
178,6	1,30E-03
180,78	9,73E-04
184,07	6,84E-04
189,05	4,62E-04
196,55	3,05E-04
207,88	1,97E-04
224,99	1,25E-04
250,81	7,81E-05
289,79	4,74E-05
348,62	2,78E-05
490,5	1,20E-05
560,64	8,80E-06

624,99	6,90E-06
676,41	5,79E-06
715,41	5,11E-06
743,82	4,69E-06
763,91	4,42E-06
777,83	4,25E-06
787,34	4,14E-06
793,77	4,06E-06
798,08	4,02E-06
800,96	3,98E-06
802,89	3,96E-06
804,17	3,95E-06
805,01	3,94E-06
805,58	3,93E-06
805,95	3,93E-06
806,2	3,92E-06
806,36	3,92E-06
806,69	3,92E-06
807,01	3,91E-06
807,17	3,91E-06
807,42	3,91E-06
807,8	3,91E-06
808,36	3,90E-06
809,22	3,89E-06
810,5	3,88E-06
812,45	3,86E-06
815,39	3,82E-06
819,82	3,78E-06
826,51	3,71E-06
836,61	3,61E-06
851,85	3,47E-06
874,87	3,27E-06
909,61	3,00E-06
962,05	2,64E-06
1041,2	2,21E-06
1160,7	1,71E-06
1341,1	1,18E-06
1483,3	8,70E-07
1501,2	8,35E-07
1673,5	5,21E-07
1811,2	2,59E-07
1915,6	1,25E-07
1991,6	4,32E-07
2045,5	8,94E-07
2082,7	1,49E-06

2108,2	2,17E-06
2125,4	2,81E-06
2136,9	3,30E-06
2144,7	3,61E-06
2149,8	3,78E-06
2153,2	3,87E-06
2155,5	3,92E-06
2157	3,95E-06
2158	3,97E-06
2158,7	3,98E-06
2159,1	3,98E-06
2160	3,99E-06
2160,9	4,00E-06
2161,3	4,00E-06
2162	4,01E-06
2163	4,01E-06
2164,5	4,02E-06
2166,8	4,02E-06
2170,2	3,99E-06
2175,4	3,91E-06
2183,3	3,73E-06
2195,1	3,38E-06
2213,1	2,87E-06
2240,1	2,29E-06
2280,9	1,75E-06
2342,6	1,32E-06
2435,6	9,97E-07
2576	7,50E-07
2600	7,21E-07

9.6. Messdaten Abbildung 46

9.6.1. Kraft von 10 Newton

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	1,04E-06
108,62	1,14E-06
127,25	1,48E-06
142,28	2,04E-06
153,44	2,96E-06
161,23	4,45E-06
166,43	6,81E-06
169,81	1,05E-05
171,96	1,56E-05
173,31	2,19E-05
174,15	2,77E-05

174,67	3,16E-05
174,99	3,36E-05
175,19	3,44E-05
175,32	3,47E-05
175,39	3,48E-05
175,44	3,49E-05
175,47	3,49E-05
175,49	3,49E-05
175,5	3,49E-05
175,51	3,49E-05
175,53	3,49E-05
175,54	3,49E-05
175,56	3,49E-05
175,59	3,49E-05
175,64	3,48E-05
175,71	3,46E-05
175,84	3,43E-05
176,04	3,34E-05
176,36	3,13E-05
176,89	2,73E-05
177,75	2,14E-05
179,15	1,50E-05
181,41	9,77E-06
185,09	6,11E-06
191,06	3,74E-06
200,76	2,25E-06
216,51	1,33E-06
242,08	7,67E-07
283,6	4,27E-07
351,03	2,26E-07
431,91	1,31E-07
499,04	9,16E-08
557,98	6,96E-08
601,75	5,77E-08
632,29	5,10E-08
652,7	4,71E-08
665,93	4,48E-08
674,35	4,35E-08
679,65	4,27E-08
682,95	4,21E-08
685	4,18E-08
686,26	4,15E-08
687,05	4,13E-08
687,53	4,12E-08
687,83	4,11E-08

688,01	4,11E-08
688,12	4,11E-08
688,19	4,10E-08
688,24	4,10E-08
688,31	4,10E-08
688,38	4,10E-08
688,42	4,10E-08
688,49	4,10E-08
688,6	4,09E-08
688,78	4,09E-08
689,08	4,08E-08
689,57	4,07E-08
690,36	4,05E-08
691,63	4,03E-08
693,71	3,99E-08
697,08	3,94E-08
702,55	3,86E-08
711,43	3,74E-08
725,86	3,55E-08
749,28	3,27E-08
787,32	2,85E-08
849,08	2,28E-08
949,36	1,56E-08
1112,2	6,99E-09
1194,4	3,23E-09
1232,9	1,51E-09
1378,6	6,35E-09
1486,7	1,58E-08
1562,2	2,95E-08
1612,6	5,03E-08
1645,3	8,19E-08
1666,1	1,27E-07
1679,2	1,81E-07
1687,3	2,32E-07
1692,4	2,66E-07
1695,5	2,84E-07
1697,4	2,92E-07
1698,6	2,95E-07
1699,4	2,97E-07
1699,8	2,97E-07
1700,1	2,98E-07
1700,3	2,98E-07
1700,4	2,98E-07
1700,5	2,98E-07
1700,7	2,98E-07

1700,8	2,98E-07
1701	2,98E-07
1701,3	2,98E-07
1701,7	2,97E-07
1702,5	2,96E-07
1703,7	2,94E-07
1705,6	2,87E-07
1708,8	2,70E-07
1713,9	2,37E-07
1722,2	1,88E-07
1735,7	1,34E-07
1757,7	8,97E-08
1793,3	5,83E-08
1851,2	3,77E-08
1945,2	2,44E-08
2097,8	1,58E-08
2299,7	1,07E-08
2349,9	9,85E-09
2500	7,93E-09

9.6.2. Kraft von 100 Newton

Siehe 9.1

9.6.3. Kraft von 1000 Newton

Frequenz [Hz]	Amplitude [m]
100	1,04E-04
108,62	1,14E-04
127,25	1,48E-04
142,28	2,04E-04
153,44	2,96E-04
161,23	4,45E-04
166,43	6,81E-04
169,81	1,05E-03
171,96	1,56E-03
173,31	2,19E-03
174,15	2,77E-03
174,67	3,16E-03
174,99	3,36E-03
175,19	3,44E-03
175,32	3,47E-03
175,39	3,48E-03
175,44	3,49E-03
175,47	3,49E-03
175,49	3,49E-03
175,5	3,49E-03

175,51	3,49E-03
175,53	3,49E-03
175,54	3,49E-03
175,56	3,49E-03
175,59	3,49E-03
175,64	3,48E-03
175,71	3,46E-03
175,84	3,43E-03
176,04	3,34E-03
176,36	3,13E-03
176,89	2,73E-03
177,75	2,14E-03
179,15	1,50E-03
181,41	9,77E-04
185,09	6,11E-04
191,06	3,74E-04
200,76	2,25E-04
216,51	1,33E-04
242,08	7,67E-05
283,6	4,27E-05
351,03	2,26E-05
431,91	1,31E-05
499,04	9,16E-06
557,98	6,96E-06
601,75	5,77E-06
632,29	5,10E-06
652,7	4,71E-06
665,93	4,48E-06
674,35	4,35E-06
679,65	4,27E-06
682,95	4,21E-06
685	4,18E-06
686,26	4,15E-06
687,05	4,13E-06
687,53	4,12E-06
687,83	4,11E-06
688,01	4,11E-06
688,12	4,11E-06
688,19	4,10E-06
688,24	4,10E-06
688,31	4,10E-06
688,38	4,10E-06
688,42	4,10E-06
688,49	4,10E-06
688,6	4,09E-06

688,78	4,09E-06
689,08	4,08E-06
689,57	4,07E-06
690,36	4,05E-06
691,63	4,03E-06
693,71	3,99E-06
697,08	3,94E-06
702,55	3,86E-06
711,43	3,74E-06
725,86	3,55E-06
749,28	3,27E-06
787,32	2,85E-06
849,08	2,28E-06
949,36	1,56E-06
1112,2	6,99E-07
1194,4	3,23E-07
1232,9	1,51E-07
1378,6	6,35E-07
1486,7	1,58E-06
1562,2	2,95E-06
1612,6	5,03E-06
1645,3	8,19E-06
1666,1	1,27E-05
1679,2	1,81E-05
1687,3	2,32E-05
1692,4	2,66E-05
1695,5	2,84E-05
1697,4	2,92E-05
1698,6	2,95E-05
1699,4	2,97E-05
1699,8	2,97E-05
1700,1	2,98E-05
1700,3	2,98E-05
1700,4	2,98E-05
1700,5	2,98E-05
1700,7	2,98E-05
1700,8	2,98E-05
1701	2,98E-05
1701,3	2,98E-05
1701,7	2,97E-05
1702,5	2,96E-05
1703,7	2,94E-05
1705,6	2,87E-05
1708,8	2,70E-05
1713,9	2,37E-05

1722,2	1,88E-05
1735,7	1,34E-05
1757,7	8,97E-06
1793,3	5,83E-06
1851,2	3,77E-06
1945,2	2,44E-06
2097,8	1,58E-06
2299,7	1,07E-06
2349,9	9,85E-07
2500	7,93E-07

9.7. Bilder



Abbildung 48: Vibraphontaste Arnold Esper I



Abbildung 49: Vibraphontaste Arnold Esper II



Abbildung 50: Vibraphontaste Arnold Esper III (Pfadefdatei)



Abbildung 51: Vibrapohntaste Musser I



Abbildung 52: Vibrapohntaste Musser II



Abbildung 53: Vibrapohntaste Musser III (Pfadefdatei)

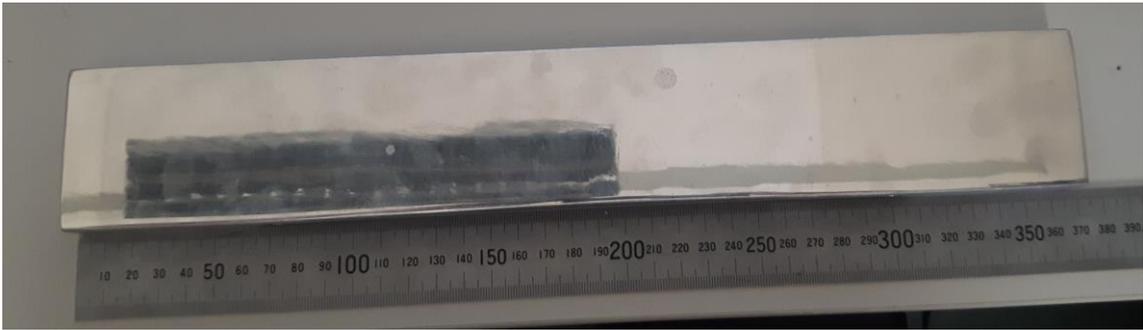


Abbildung 54: Vibraphontaste Nico Van der Plas I

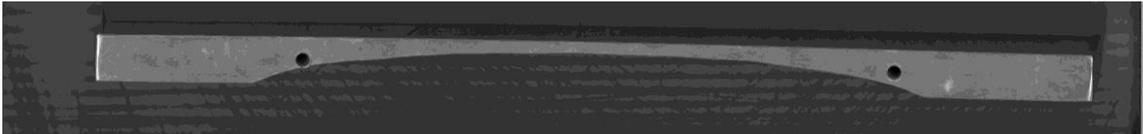


Abbildung 55: Vibraphontaste Nico Van der Plas II



Abbildung 56: Vibraphontaste Nico Van der Plas III (Pfadefdatei)



Abbildung 57: Vibraphontaste Kosth I



Abbildung 58: Vibraphontaste Kosth II



Abbildung 59: Vibraphontaste Kosth III (Pfadefdatei)



Abbildung 60: Vibraphontaste Studio49 I



Abbildung 61: Vibraphontaste Studio49 (Pfadefdatei)

Abstract

This Thesis “Finite Elemente Methode für die Berechnung von Vibraphontasten” consists of two major parts. On the one hand the vibraphone itself with an historical approach and the other hand the measurements using the finite element method. The vibraphone plates have a special harmonic series of sounds. The ratio of a tuned plate is nearly 1:4:10, so to say the root note, the double octave and the third. To compare it with the harmonic series of sounds of a string (1:2:3:4...) it's quite different. In addition the third partial of plates is compared to the root note very distinctive. Furthermore the third is a problematic tone because of major and minor. Therefore it is important to have a specific look on the third partial.

To analyse the harmonic series of sounds of vibraphone plates it was necessary to do a modal analysis with finite element method in ANSYS. Therefore five different plates of different producers were measured, scanned, transformed into ANSYS and finally simulated to get their natural frequency. In addition all five plates were measured with a harmonic analysis in ANSYS. To verify the results of ANSYS one plate was also recorded with a microphone and this “real” measurement was compared with the simulated measurement of the specific plate.

The simulation shows that four out of five producers are aware of the third partial. Only one producer has the third in the harmonic series of sounds, the others tend to have the third partial in the range of the fifth. The difference between the root note and the third partial in the harmonic analysis varies between *54-41dB*. The comparison between the “real” measurement and simulated measurement was pleasant. The simulated data for the first three partial was *173 Hz, 709,86 Hz and 2099,6 Hz*. For the experimental measurement *176,55 Hz, 706,5 Hz and 1900 Hz*. The difference between the root note and the third partial was *48dB* simulated and *43dB* in the experimental measurement.

The deviations from the measurements are conditioned by the geometry and the material property, which couldn't be determine exactly. This two factors could be the main focus for further research to gain more precise results.

Abstract

Die Masterarbeit „Finite Elemente Methode für die Berechnung von Vibraphontasten“ lässt sich in zwei Hauptteile gliedern. Der erste Teil beschäftigt sich mit dem Vibraphon per se und einer historischen Annäherung. Der zweite Teil besteht aus den Messungen, welche mittels der Finite Elemente Methode (FEM) berechnet wurden. Vibraphontasten besitzen eine spezielle Teiltonreihe. Diese hat ein Verhältnis von 1:4:10, also Grundton, Doppeloktave und die Terz. Im Vergleich zu einer schwingenden Seite (1:2:3:4) ist die Teiltonreihe von Vibraphontasten sehr unterschiedlich. Zusätzlich ist der dritte Teilton im Verhältnis zum ersten Teilton stark ausgeprägt und kann die Differenzierung von Dur und Moll erschweren. Aufgrund dessen liegt das Hauptaugenmerk auf dem dritten Teilton.

Um die Teiltonreihe von Vibraphontasten simulieren und analysieren zu können, wurde eine Modalanalyse mit FEM im Programm ANSYS erstellt. Dafür wurden fünf verschiedenen Tasten von unterschiedlichen Herstellern gemessen, eingescannt und in ANSYS importiert und anschließend simuliert, um ihre Eigenschwingungen zu erhalten. Zusätzlich wurden alle fünf Tasten einer Harmonischen Analyse unterzogen und eine Simulation wurde mit einer „real“ gemessenen Vibraphontaste verglichen.

Die Simulationen zeigen, dass sich vier der fünf Hersteller dem Problem des dritten Teiltons bewusst sind. Nur eine Taste hat die Terz als dritten Teilton in ihrer Teiltonreihe, bei den anderen Tasten liegt der dritte Teilton im Bereich einer Quint. Die Differenzen zwischen dem Grundton und dem dritten Teilton lagen in einem Bereich von $54\text{-}41\text{ dB}$. Der Vergleich zwischen der „realen“ Messung und der Simulation war sehr zufriedenstellend. Die simulierten Werte für die ersten drei Teiltöne waren 173 Hz , $709,86\text{ Hz}$ und $2099,6\text{ Hz}$ und für die experimentell ermittelten Werte $176,55\text{ Hz}$, $706,5\text{ Hz}$ und 1900 Hz . Die Differenz zwischen dem Grundton und dem dritten Teilton war 48 dB bei der Simulation und 43 dB bei den experimentell ermittelten Werte. Die Abweichungen bei den Messungen hängen von der Geometrie und der Materialeigenschaft ab, welche nicht exakt definiert werden konnten. Diese beiden Faktoren könnten ein Hauptaugenmerk für weitere Forschungen sein, um genauere Ergebnisse zu erhalten.