

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Stimmton, Stimmgabelverifikation und
Stimmgabeexperimente“

verfasst von / submitted by

Julia Traint, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the
degree of

Master of Education (MEd)

Wien, 2022 / Vienna 2022

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

UA 199 520 523 02

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

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Lehrverbund
UF Mathematik Lehrverbund UF Physik Lehrverbund

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit ist aus dem Interesse heraus entstanden, ein musikalisches Thema physikalisch zu betrachten. Da ich selbst ein Instrument erlernt habe und die Musik mich schon mein ganzes Leben begleitet, war es mir ein großes Anliegen, die historischen Stimmgabelgeräte aus der physikalischen Sammlung der Universität Wien zu untersuchen. Im Studium habe ich ein Seminar besucht, in dem es um musikalische Akustik ging. Schon damals hat mich die Physik dahinter sehr interessiert. Verstärkt wurde das Gefühl, als ich zu unterrichten begonnen habe. Das Themengebiet Akustik wird im Lehrplan behandelt und damit für dieses Thema ein besseres Verständnis geschaffen werden kann, sollte der Unterricht auch mit Experimenten untermalt werden. Eine einfache Stimmgabel eignet sich perfekt, um grundlegende akustische Dinge zu erklären. Die meisten Schulen besitzen zwar einige Stimmgabeln, die jedoch für Demonstrationsversuche oft nicht eingesetzt werden. Deshalb war es mir in dieser Arbeit auch ein Anliegen, Experimente, die entweder als Demonstrations- oder auch als Schülerexperimente zu verwenden sind, aufzubereiten. In der vorliegenden Arbeit wird im Text die männliche Form verwendet. Gemeint ist jedoch auch die weibliche Form.

An dieser Stelle gilt meinem Betreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner ein großer Dank, da er mit seinen hilfreichen und unterstützenden Anregungen während des gesamten Betreuungszeitraums zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ein besonderer Dank gebührt auch der Musikologin Fanny Gribenski, die ihre Fotos des Ehrenhaft-Nachlasses der Österreichischen Zentralbibliothek für Physik, Franz Sachslehner und damit auch mir zur Verfügung gestellt hat.

Nun wünsche ich Ihnen beim Lesen der Arbeit viel Vergnügen!

Julia Traint

Aspang, 08.05.2022

Zusammenfassung

Mit der internationalen Stimmtonkonferenz in Wien im Jahre 1885 bekamen Physiker an der Universität Wien die Aufgabe der Stimmgabelverifikation. Dieses Amt existierte bis 1938. Die vorliegende Arbeit beschreibt und untersucht die Stimmgabeln und Stimmgabelapparate der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien. Diese Objekte sind um das Jahr 1900, teilweise auch ein bis zwei Jahrzehnte davor zu datieren. Es werden nicht nur einzelne Stimmgabel-Sets, sondern auch elektromagnetisch angeregte Stimmgabeln und unterschiedlichste Geräte erkundet, bei denen eine Stimmgabel ein Bestandteil ist, wie zum Beispiel die Stimmgabeluhr, das Vibrationsmikroskop, der Stimmgabelunterbrecher und der Stimmgabelresonator. Die Frequenzen der ausgewählten Stimmgabeln werden mittels Mikrofon und Oszilloskop oder auch mittels der Software Audacity überprüft. Die Beziehung zwischen Zinkenlänge und Frequenz wird für die große Stimmgabelkassette von Rudolph Koenig erfolgreich überprüft, ebenso gilt eine vergleichbare Beziehung für die Stahlstäbe zur Überprüfung der Hörgrenze. Leichte und schnelle Experimente sind beispielsweise mit zwei Stimmgabeln erzeugte Schwebungen oder die Verstärkung der Schwingung mit einem Resonator. Diese einfachen Experimente können leicht auch im Physikunterricht eingebaut werden. Aufwändiger sind die durchgeführten Experimente zur Erzeugung von Lissajous-Figuren mittels zweier verspiegelter Stimmgabeln und Laserstrahl oder auch mittels Vibrationsmikroskop.

Abstract

It was a consequence of the international pitch standard conference 1885 in Vienna that physicists at the University of Vienna got the task of calibrating tuning forks. This office existed until 1938. In this thesis the tuning forks and tuning fork apparatus from the physical-historical collection of the University of Vienna are described and examined. These objects can be dated around 1900, in some cases even one to two decades earlier. Not only individual tuning fork sets are explored, but also electromagnetically operated tuning forks and a wide variety of devices, in which a tuning fork is an integral part, such as the tuning fork watch,

the vibrating microscope, the tuning fork interrupter and the tuning fork resonator are studied. Using a microphone, an oscilloscope or the software Audacity, the frequencies of the selected tuning forks are reexamined. The existence of a correlation between tine length and frequency for Rudolph Koenig's large tuning fork cassette is successfully verified, as well as, comparably, for steel rods used for testing the limit of hearing. Simple and fast experiments that can easily be incorporated into physics lessons are, for example, beats generated with two tuning forks or the amplification of the vibration with a resonator. However, the experiments carried out to create Lissajous' figures using two mirrored tuning forks and a laser beam or a vibration microscope are more complex.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Historisches Umfeld	2
2.1 Viktor von Lang	2
2.2 Josef Stefan.....	3
2.3 Stimmtonkonferenz.....	4
2.4 Stimmgabelverifikationsstelle.....	5
3. Akustische Grundlagen	8
3.1 Grundlagen zur Stimmgabel.....	8
3.2 Die Schwebung.....	10
3.3 Lissajous-Figuren	11
3.4 Die Schallgeschwindigkeit und der Hörbereich des Menschen	13
3.4.1 Mögliche Testverfahren bei Schwerhörigkeit	13
3.5 Bestandsaufnahme der einfachen Stimmgabeln	14
3.5.1 Bestandsaufnahme – Stimmgabeln mit Zinnfuß	14
3.5.2 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne Resonanzkörper	17
3.5.3 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln mit hölzernem Resonanzkörper.....	17
3.5.4 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne aktuelle Inventarnummer	22
4. Experimenteller Teil	24
4.1 Experimentiermethodik.....	24
4.2 Große Stimmgabelkassette von Rudolph Koenig	28
4.3 Schwebungen.....	41
4.4 Untersuchung der Stimmgabeln V4, V11, V14, V21	46
4.5 Elektromagnetisch angeregte Stimmgabeln der HTL 16	47
4.6 Erzeugung von Lissajous-Figuren mit verspiegelten Stimmgabeln	56
4.6.1 Lissajous-Figuren mit kurzem Paar.....	59
4.6.2 Lissajousfiguren mit den Stimmgabeln V 72/3 und V 72/2	62
4.6.3 Langes Paar V 72/1 und V 72/2	65
4.6.4 Betrieb der Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2 mit zusätzlichen Massestücken	68
4.6.5 60 Hz – Versuch	69
4.7 Elektromagnetische Stimmgabel V 49	72
4.8 Stimmgabelresonatoren	74
4.9 Stimmgabelunterbrecher.....	78
4.10 Stimmgabeluhr V 44	85
4.11 Vibrationsmikroskop	88
4.12 Stahlzylinder zur Bestimmung der oberen Hörgrenze	94
5. Fazit	101
Abbildungsverzeichnis.....	103
Tabellenverzeichnis.....	108
Literaturverzeichnis	109
Anhang Ehrenhaft-Nachlass	114

1. Einleitung

Die internationale Stimmtonkonferenz in Wien und die Stimmgabelverifikationsstelle der Universität Wien gehören zu den interessanten Geschichten der Physik. Schon seit Jahrhunderten setzten sich viele Musiker und Physiker mit der Einführung eines einheitlichen Stimmtons auseinander. Zuvor wurde in Chören oder Orchestern je nach Stimmung der Orgel oder nach Instrumenten gestimmt, abhängig davon, in welchem Land man sich befand. Da ab dem 18. Jahrhundert auch immer mehr Musiker international unterwegs waren, entstand immer mehr das Bedürfnis, einen einheitlichen Stimmton zu schaffen, damit Ensembles aus Musikern mit unterschiedlichen Nationalitäten entstehen können (vgl. Reuter & Czedik-Eysenberg, 2017, S. 10). Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts existierten Kammertöne in einem umfassenden Bereich von bis zu einer Terz (vgl. Reuter & Czedik-Eysenberg, 2017, S.11). In der internationalen Stimmtonkonferenz, die 1885 in Wien unter der Leitung des Wiener Physikers Josef Stefan stattfand, einigte man sich auf einen Kammerton, der mit 870 einfachen Schwingungen in der Sekunde definiert ist, und somit 435 Hz beträgt. Die Einhaltung des Stimmtons wurde beim „Stimmgabelverifikationsamt“ überprüft (vgl. Reuter & Czedik-Eysenberg, 2017, S. 12). Dieses Amt existierte von 1885 bis 1938 und es hatten Physiker der Universität Wien inne. Geleitet wurde es zunächst von Viktor von Lang und (vermutlich) ab 1909 von Felix Ehrenhaft.

Ziele dieser Masterarbeit sind, nicht nur auf die Geschichte des Normalstimmtons und die diesbezügliche Rolle einiger bedeutender Physiker der Universität Wien hinsichtlich Stimmtonkonferenz und Stimmgabelverifikationsamt hinzuweisen, sondern auch einen Überblick über die zahlreichen Stimmgabeln und Stimmgabelapparate der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien zu geben und mit einigen dieser Objekte zu experimentieren. Damit gibt diese Arbeit auch Denkanstöße für Experimente und Theorie im Physikunterricht an Schulen.

Im zweiten Kapitel wird das Wirken von Josef Stefan und Viktor von Lang im Rahmen der Stimmtonkonferenz erwähnt. Der Ehrenhaft-Nachlass gibt Einblicke in die damalige Diskussion und aufgetretenen Schwierigkeiten bei der

Realisierung eines Normalstimmtons. Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit einigen physikalischen Grundlagen der Akustik, die für diese Arbeit relevant sind. Der Zusammenhang zwischen Zinkenlänge und Frequenz der Stimmgabeln wird beschrieben, ebenso die Bedeutung von Begriffen wie Schallgeschwindigkeit, Resonanz und Schwebung. Weiters wird das Zustandekommen von Lissajous-Figuren und der Hörbereich des Menschen erläutert. Anschließend wird der Bestand an Stimmgabeln in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien aufgelistet und die durchgeführten Experimente werden protokolliert und diskutiert. Wichtig ist, darauf hinzuweisen, dass die untersuchten Objekte um das Jahr 1900 zu datieren sind, manche können auch ein bis zwei Jahrzehnte älter sein.

2. Historisches Umfeld

2.1 Viktor von Lang

Der Physiker Viktor von Lang wurde im Jahr 1838 in Wiener Neustadt geboren. Er absolvierte das Akademische Gymnasium in Wien und studierte ab 1855 Physik an der Universität in Wien unter Josef Stefan (vgl. Angetter & Martischnig, 2005, S. 71). Sein Doktorat schloss er 1859 an der Universität Gießen ab. Seine Ausbildung vervollkommnete er unter Robert Kirchhoff und Robert Bunsen in Heidelberg sowie bei Renault in Paris. In Wien habilitierte er mit der Arbeit „Physik der Kristalle“. Danach war er zwei Jahre im Kensington Museum in London tätig, wo er auch Michael Faraday kennenlernte. Mit 26 Jahren wirkte er als außerordentlicher Professor in Graz, mit 28 Jahren erhielt er die Lehrkanzel Physik an der Universität Wien, die er 44 Jahre lang innehatte (vgl. Karlik & Schmid, 1892, S. 37). Viktor von Lang bemühte sich um die Ergänzung der Sammlung des „Physikalischen Kabinetts“, damit dort auch wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt werden konnten (vgl. Information Assistent, 2004, S. 9). Lang war in vielen wissenschaftlichen Bereichen tätig und gilt als Begründer der Kristallphysik in Österreich (vgl. Angetter & Martischnig, 2005, S. 72).

Lang war ein international erfahrener Physiker. Er nahm auch regelmäßig an Tagungen in Paris teil. Er setzte sich für die Einführung des metrischen Maß- und Gewichtssystems in Österreich ein und war auch in der Normaleichkommission

führend tätig (Karlik & Schmid 1982, S. 40). Auf dem akustischen Gebiet beteiligte er sich bei der Festlegung eines Normaltons (vgl. Karlik & Schmid, 1892, S. 38) und übernahm die Leitung des österreichischen „Stimmgabelverificationsbüros“, welches 1891 gegründet wurde. Ebenso war er der Vertreter Österreichs bei der in Wien stattfindenden Stimmtongkonferenz 1885, bei der die Frequenz für den Normalstimmtong „a“ definiert wurde (vgl. Angetter & Martischnig, 2005, S. 73). Viktor von Lang wurde 1870 zum Dekan und zweimal zum Rektor der Universität Wien gewählt (1884 und 1889). Er verstarb 1921 im 84. Lebensjahr. Im Arkadenhof der Wiener Universität wurde ihm acht Jahre später ein Denkmal errichtet (vgl. Karlik & Schmid, 1892, S. 40).

2.2 Josef Stefan

Josef Stefan wurde im Jahr 1835 in Klagenfurt geboren. Obwohl er aus ärmlichen Verhältnissen stammte und seine Eltern Analphabeten waren, konnte er das Gymnasium in Klagenfurt besuchen und maturierte 1853 mit Auszeichnung. Gleich darauf zog er nach Wien und begann ein Mathematik- und Physik-Studium an der Universität Wien. Im Jahre 1866 wurde er als Nachfolger von Andreas von Ettingshausen Direktor des Physikalischen Instituts in Wien-Erdberg. Neben ihm führten dort auch Joseph Loschmidt und Ludwig Boltzmann Untersuchungen und Forschungen durch, obwohl das Physikalische Institut nur mit sehr wenigen Mitteln ausgestattet war. (vgl. Angetter & Martischnig, 2005, S. 137). 1869/70 war Stefan Dekan und 1876/77 Rektor der Universität Wien (vgl. Information Assistent, 2004, S. 100). Er betätigte sich 1885 als Vorsitzender der Internationalen Stimmtongkonferenz in Wien, bei welcher der Normalton „a“ mit einer Frequenz von 435 Hertz definiert wurde (vgl. Karlik & Schmid, 1982, S. 32). Stefan ist mit einigen anderen bedeutenden Physikern der Universität Wien, aufgrund seiner zahlreichen hervorragenden Arbeiten, einer der Begründer der „Wiener Schule“ der Physik.

Er galt als ausgezeichnete Lehrer und pflegte eine freundschaftliche Beziehung mit den Studenten. Er führte aber ein eher einsames und zurückgezogenes Leben, und hatte oftmals den Wunsch, von der Presse nicht mit Namen genannt zu werden. Man könnte ihn auch bescheiden nennen. Er starb im Jahr 1893 im

Alter von 58 Jahren an einem Gehirnschlag (vgl. Information Assistent, 2004, S. 100). Zwei Jahre nach seinem Tod wurde ihm im Arkadenhof der Wiener Universität ein Denkmal errichtet, bei dem Ludwig Boltzmann, ein Schüler Josef Stefans, die Gedenkrede hielt (vgl. Karlik & Schmid, 1892, S. 32).

2.3 Stimmtonkonferenz

Bei der internationalen Stimmtonkonferenz, welche im November 1885 in Wien stattfand, wurde unter Einstimmigkeit beschlossen, dass ein einziger internationaler Normalstimmton bestehen darf. Dieser ist definiert als dasjenige a, dessen Tonhöhe durch 870 einfache Schwingungen in der Sekunde entsteht, was einer Frequenz von 435 Hz entspricht. Die Normal-Stimmgabel wird so konstruiert, dass bei einer Temperatur von 15°C der Normalton erklingt. Die Mitglieder der Konferenz gaben einige Maßregeln an, um die Durchführung des Normal-Stimmtons zu ermöglichen: Die Einführung der Normalstimmung für öffentliche und Privatanstalten, wie Musikvereine, Theater etc. ist verpflichtend. Die Militär-Musikkapellen sind dazu angewiesen, spätestens bei der nächsten Erneuerung der Holzblasinstrumente, die Normalstimmung einzuführen. Auch die Orgeln in Kirchen sollen künftig auf den Normalton gestimmt werden (Wiener Allgemeine Zeitung 21.11.1885, S. 5).

Um eine Abänderung des Stimmtones zu verhindern, werden die Bestände des Normalstimmtons von berufenen Organen überprüft. Deren Aufgabe ist es, die Normal-Stimmgabel zu bewahren, bestehende Stimmgabeln zu prüfen, unter Umständen richtigzustellen und durch eine besondere Stempelung zu beglaubigen. Beglaubigt werden dabei nur noch jene Stimmgabeln, die folgende Bedingungen erfüllen:

„1. Die Gabel muß aus nicht gehärtetem Gußstahl erzeugt sein. 2. Die Zinken müssen parallel stehen und mindestens einen halben Zentimeter breit sein. 3. Der zur Anbringung der Stempelungsmarke bestimmte Raum zwischen dem Ausschnitte der Zinken und dem Stiele muß mindestens einen Zentimeter betragen. 4. Die zu verifizierende Gabel muß rostfrei und weißglänzend polirt oder blau angelassen sein.“ (Wiener Allgemeine Zeitung 21.11.1885, S. 5).

Im Herbst 1892 wird berichtet:

„Behufs Durchführung der vom Ministerium für Kultus und Unterricht angeordneten Maßregeln zur Einführung der musikalischen Normalstimmung ist eine Stimmgabel-Verifikationsstelle beim physikalischen Kabinete der Wiener Universität eingerichtet worden. Diese unter der Leitung des Professors Hofrathes Dr. Viktor von Lang stehende Stelle hat seit 1891 5200 Stimmgabeln amtlich geprüft und beglaubigt. Für die Verifikationen wird eine Tare nicht erhoben. Rectificationen fehlerhafter Gabeln werden grundsätzlich nicht vorgenommen, doch wird bei Stimmgabeln, welche von öffentlichen Instituten oder Schulen zur Beglaubigung eingesendet werden, insofern eine Ausnahme gemacht, als dieselben innerhalb einer gewissen Fehlergrenze seitens der Organe des Verifikations-Amtes durch Feilen berichtigt werden können.“ (Linzer Tages Post, 13.11.1892, S. 4).

Dr. Viktor von Lang übernahm mit zwei seiner Assistenten die Prüfung der Stimmgabeln und machte dabei einen Unterschied zwischen den „gewöhnlichen Gebrauchsgabeln“ und den „Präzisionsgabeln“. Bei der Gebrauchsgabel lag die Fehlergrenze bei einer einfachen Schwingung über oder unter dem Sollwert des Normaltones. Bei der Präzisionsgabel war die Fehlergrenze bei 0.2 einer einfachen Schwingung festgelegt (Deutsches Volksblatt, 09.11.1892, S. 2).

Auch die Beschriftung der beiden Arten von Stimmgabeln unterschied sich. So wurde die Gebrauchsgabel mit einem Stempel versehen, auf dem die Zahl 870 (Normalstimmung) eine Ellipse umgab und neben der Jahreszahl der österreichische Reichsadler abgebildet war. Die Präzisionsgabel wurde stattdessen mit einem fünfstrahligen Stern inklusive fortlaufender Nummer gekennzeichnet (Innsbrucker Nachrichten, 16.11.1892, S. 5).

2.4 Stimmgabelverifikationsstelle

Die Quellen zu diesem Kapitel stammen aus dem Ehrenhaft-Nachlass (Ehrenhaft-Nachlass, ÖZBP), welcher Unterlagen und Korrespondenzen der staatlichen Kommission zur Prüfung und Beglaubigung von Stimmgabeln von 1885 bis 1938 enthält (siehe Anhang 1 und 2).

Nach Viktor von Lang war offensichtlich Felix Ehrenhaft der nächste und zugleich letzte Präsident (bis 1938) der staatlichen Kommission zur Beglaubigung von Stimmgabeln. Abbildung 1 zeigt das Briefpapier der Stimmgabelkommission, wo

auch die damals weiteren Mitglieder der Stimmgabelkommission aufgelistet sind (vergleiche auch Anhang 13).

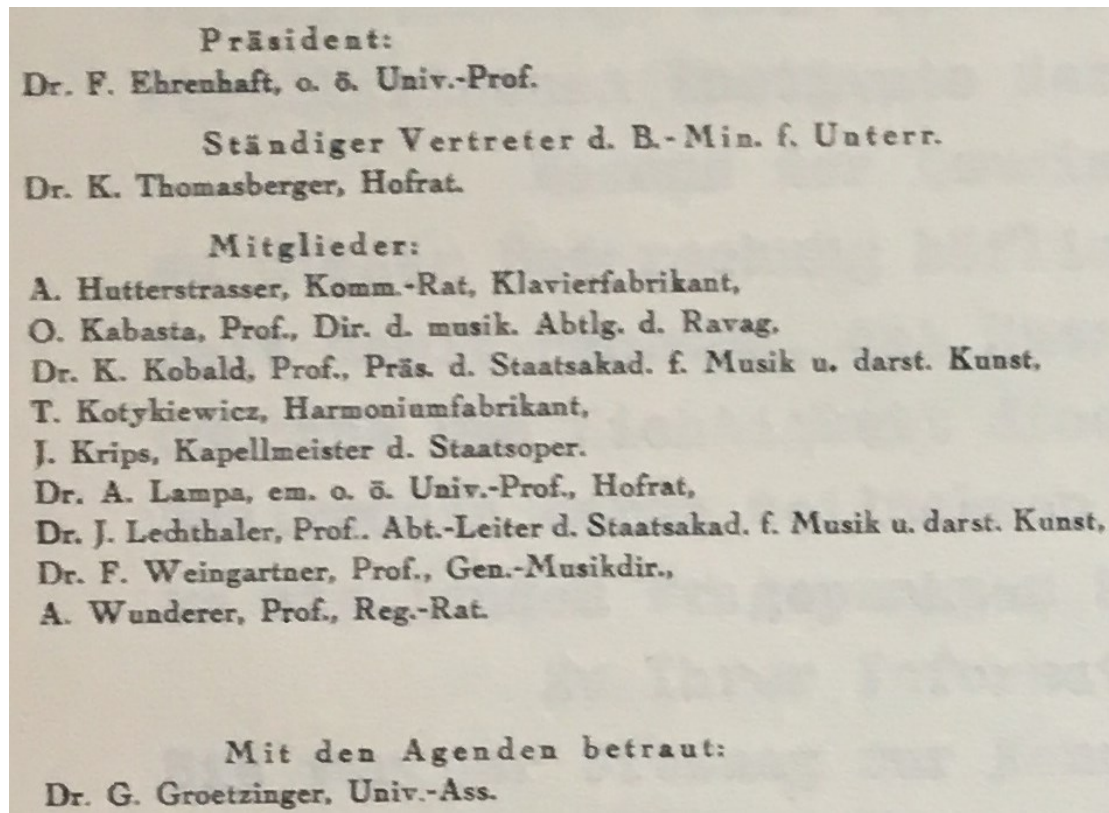


Abbildung 1: Briefpapier, Stimmgabelkommission (ÖZBP)

Aus dem Nachlass geht hervor, welche Herausforderungen die Umstellung auf eine Normalstimmung mit sich bringt und welche Experimente zur Verbesserung dieser durchgeführt wurden. Hier sind einige Auszüge aus dem Ehrenhaftnachlass, dessen Fotografien sich im Anhang befinden:

Einem Protokoll aus dem Jahre 1902 von Franz Kadeischka ist zu entnehmen, dass Veränderungen der Tönhöhen der Gabeln durch äußere Temperaturen oder durch Wärme geschehen. Dabei wurde mit Temperaturen von 17°C bis 18,25°C experimentiert. Veränderungen der Elastizität des Metalls, welche ebenfalls abhängig von der Temperatur sind, wurden dabei nicht berücksichtigt (siehe Anhang 3). Ebenfalls im Anhang befindet sich ein Protokoll, über die Eichung zweier Stimmgabeln mithilfe einer vergoldeten Normalgabel. Das Protokoll wurde am 29. Oktober 1923 von Konstantinovsky verfasst (siehe Anhang 4). Mehrere interessante Schriftstücke sind im Anhang zu betrachten, so zum Beispiel Honorarnoten zur Bezahlung des Mechanikers, der Tagelöhnerin und der Reinigungsfrau, ein Schreiben von Gustav Friedl bzgl. Fabrik und

Musikwaren-Versandhaus, Protokolle des „Stimmgabelverificationsamtes“ für 1891, Sammlungen von Eichprotokollen vom Jahr 1937 und ein Verzeichnis der geeichten Stimmgabeln (siehe Anhang 5-10). Einer Mappe des Ehrenhaft-Nachlasses sind Übersichten zu entnehmen, die Informationen über den gegenwärtigen Stand der Normalstimmung in anderen Kulturstaaten enthalten. Auf deren Titelseite ist auch die einheitliche Angabe der Schwingungszahl erläutert. Diese wird in einfache Schwingungen umgerechnet, so wird ein Hertz als eine Doppelschwingung bzw. zwei einfachen Schwingungen angegeben (siehe Anhang 11).

Am 8. Mai 1937 schrieb der Präsident der staatlichen Kommission und Beglaubigung von Stimmgabeln, Felix Ehrenhaft, im Namen der Kommission einen Brief, in dem er Komponisten, Dirigenten und Chorleiter bat, an einer Besprechung am 13. Mai 1937 teilzunehmen, um über die Wiedereinführung der alten Normalstimmung in Österreich zu diskutieren. Bei einer kurz zuvor abgehaltenen Orchesterprobe in der Staatsoper gingen nämlich die Meinungen der Fachleute auseinander, da die Wiedereinführung technische Herausforderungen hinsichtlich der Adaptierung der Blasinstrumente, insbesondere der Holzblasinstrumente mit sich brachte (siehe Anhang 12). Der ehemalige Dirigent des Berliner Philharmonischen Orchesters und vieler anderer, (vgl. Pinwinkler, 2020, S. 2), Dr. Wilhelm Furtwängler, schrieb dagegen in einem Brief an den ehemaligen Präsidenten der Wiener Philharmoniker, dass die Schwingungszahl mit 870 Schwingungen durchaus angemessen wäre, da es dem österreichischen und deutschen Musikempfinden mehr entspreche als eine höhere Schwingungszahl, wie sie beispielsweise in Amerika üblich sei (siehe Anhang 13).

Abschließend ist anzumerken, dass Felix Ehrenhaft und auch sein Mitarbeiter David Konstantinovsky wegen jüdischer Abstammung mit dem Anschluss Österreichs an das Deutsche Reich im März 1938 ihre Posten verloren und emigrierten (vgl. Angetter & Matischnig 2005, S.21 und S. 69). Damit verliert sich auch die Spur der Stimmgabelkommission. Bereits 1939 wurde bei der internationalen Stimmtongkonferenz in London (vgl. Reuter & Czedi-Eysenberg, 2017, S. 12) der Stimmtong auf 440 Hz geändert. Dieser Wert wurde im Jahr 1953

bei einer weiteren Konferenz in London bestätigt (vgl. Rosenberg, 2021, S. 143). Er ist auch heute noch gültig und kann z.B. als Kammerton a mit 440 Hz unter der Telefonnummer (Wien) 01-21110-82 15 07 gehört werden.

Nach dem Zweiten Weltkrieg fielen die Stimmgabeln nicht mehr unter das Eichgesetz (vgl. Bundesgesetzblatt Österreich Nr 152, 5. Juli 1950).

3. Akustische Grundlagen

3.1 Grundlagen zur Stimmgabel

John Shore, Trompeter und Lautenist von Henry Purcell und Georg Friedrich Händel, erfand 1711 in London die Stimmgabel. Die Stimmgabel wurde als Musikinstrument in Konzertsälen und Kirchen in ganz Europa bekannt. Beim Anschlagen und somit Schwingen der Stimmgabel erzeugt sie einen Ton mit konstanter Höhe, der als Maßstab für das Stimmen von Musikinstrumenten diente (vgl. Pearce, 1998, S. 728).

Eine erste Beschreibung der Stimmgabel stammt aus einem Buch von William Tans'ur, welches im Jahr 1746 veröffentlicht wurde. Dieser beschreibt unter anderem, dass die Stimmgabel, oder wie sie in diesem Werk auch genannt wird, der Intonator, aus gutem Stahl besteht, federleicht und gut poliert ist (vgl. Brickerton & Barr, 1987, S. 772).

Der deutsche Physiker Ernst Florens Friedrich Chladni war der Erste, der um 1800 die Schwingungsform der Stimmgabel untersuchte. Er versuchte mit anderen Physikern und Musikern, ein komplettes Musikinstrument auf der Grundlage von Stimmgabelsätzen zu konstruieren, welches jedoch allgemein nicht akzeptiert wurde. Jules Antoine Lissajous konstruierte eine Stimmgabel mit Resonanzkasten, die mit 435 Schwingungen pro Sekunde den internationalen Standard der Musiknote A darstellen sollte, was jedoch ebenfalls nicht akzeptiert wurde. Der deutsche Physiker K. R. Koenig erfand eine Stimmgabel, die von einem Uhrwerk in ständiger Bewegung gehalten wurde. Der Physiologe, Hermann von Helmholtz verwendete elektromagnetisch angetriebene Stimmgabeln für seine Experimente über die Tonempfindungen. Auch in der Otologie (Ohrenheilkunde) wurde die Stimmgabel zu diagnostischen Zwecken

eingesetzt, was in Kapitel 3.4 näher erläutert wird (vgl. Feldmann, 1997, S. 116 und S. 428).

Die Tonhöhe des Kammertons a veränderte sich im Laufe der Jahrhunderte immer wieder. Seit 1939 bzw. 1953 (siehe S. 13) gilt als internationaler Stimmton ein Ton mit einer Frequenz von 440 Hz. Heutzutage findet man Stimmgabeln noch in Schulen und Universitäten, bei Musikkonzerten werden sie eher von elektronischen Stimmgeräten abgelöst und kommen nur mehr selten zum Einsatz (vgl. Mathelitsch u.a., 2018, S. 71). Die Tonhöhe einer Stimmgabel hängt von der Dicke eines Zinkens, dessen Länge, dem Elastizitätsmodul und der Dichte des Zinkenmaterials ab. Der Zinken wird als Schallquelle auch Dipolstrahler genannt, da er abwechselnd auf einer Seite die Luft zusammendrückt und sie auf der anderen Seite entspannt. So werden akustische Wellen abgestrahlt. Die zwei Zinken schwingen gegensinnig, das heißt, sie sind um 180° phasenverschoben. Das hat zur Folge, dass sich die Wellen durch destruktive Interferenz größtenteils auslöschen und somit kein lauter Ton von einem Zinken ausgeht. Bei einer zweizinkigen Stimmgabel ist die Schallquelle nun ein sogenannter Quadrupolstrahler (vgl. Mathelitsch u.a., 2018, S. 72).

Für die Frequenz f einer Stimmgabel gilt (vgl. Russell, 2020, S.49):

$$f \propto \frac{A}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

L ist die Zinkenlänge, A hängt von der Form des Querschnitts und der Dicke der Zinken ab, E ist der Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Zinkenmaterials. Im Prinzip ist dies genau die Frequenz eines einzelnen schwingenden Stabes. Wird ein einzelner schwingender Stab in der Hand gehalten, wird die Schwingung sofort stark gedämpft, sodass kein Klang entsteht. Dies ist nicht der Fall bei der Form einer Stimmgabel, da der Fuß nahe der Schwingungsknoten nur schwach schwingt (vgl. Mathelitsch u.a., 2018, S.71).

Die Schallabstrahlung einer Stimmgabel kann verbessert werden, wenn sie auf einem Holzkästchen befestigt wird, welches als Resonanzkörper dient. Der Resonanzkörper bei einer Stimmgabel schwingt, sobald man die Stimmgabel

anregt, mit seiner Eigenfrequenz und gibt die Schwingungen verstärkt an die Umgebung ab (vgl. Gobrecht, 1974, S. 519). Meistens sind die Resonanzkästen einseitig geschlossen und daher ca. ein Viertel der Wellenlänge der Stimmgabel lang. Im Falle einer 440 Hz Stimmgabel wäre der Kasten ca. 20 cm lang (ein Viertel von rund 0,78 m). Für höher gestimmte Stimmgabeln werden oft beiderseits offene Resonanzkästen verwendet, wobei ihre Länge dann einer halben Wellenlänge entspricht (vgl. Mathelitsch, 2018, S. 72 und vgl. Gobrecht, S. 519).

Viele Stimmgabeln der physikhistorischen Sammlung stammen vom Hersteller Rudolph Koenig in Paris und sind daher mit den französischen Tonbezeichnungen markiert: die Silben UT, RÉ, MI, FA, SOL, LA, SI entsprechen der geläufigeren Tonfolge c, d, e, f, g, a, h (vgl. Pantalony 2009, S. xii).

3.2 Die Schwebung

Abbildung 2 zeigt zwei sinusförmige Schwingungen S_{10} und S_9 , deren Amplituden etwa gleich sind und deren Frequenzen im Verhältnis 10:9 zueinander stehen. Die resultierende Schwingung S_r ist die Überlagerung der beiden oberen Schwingungen. Diese Kurve nennt man Schwebung (vgl. Lüders & Pohl, 2017, S. 259):

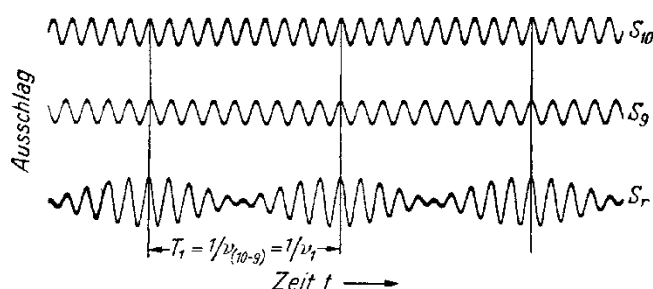


Abbildung 2: Überlagerung zweier Schwingungen annähernd gleicher Frequenz und Amplitude: Schwebungskurve (vgl. Lüders, 2017, S. 259)

Die resultierende Schwingung sieht wie eine Sinuskurve aus, mit einer sich periodisch verändernden Amplitude. Man sagt auch Schwebungskurve dazu. Da sich je nach Phasenlage die Schwingungen verstärken bzw. abschwächen, entsteht dieses Auf und Ab bei der Amplitude (vgl. Lüders & Pohl, 2017, S. 259).

Die Schwebungsfrequenz ergibt sich aus dem Betrag der Differenz der beiden Frequenzen (vgl. Lüders & Pohl, 2017, S. 259) oder aus dem Kehrwert der Schwebungsperiodendauer T_s :

$$f_s = |f_1 - f_2| = \frac{1}{T_s}$$

3.3 Lissajous-Figuren

Lissajous-Figuren entstehen, wenn zwei zueinander rechtwinklig stehende Schwingungen mit annähernd gleicher Frequenz überlagert werden. Das Aussehen der Figuren hängt von dem Verhältnis der Frequenz beider Einzelschwingungen und der Phasendifferenz, mit der beide Schwingungen zu Beginn des Experiments ihre Ruhelage verlassen, ab (vgl. Lüders & Pohl, 2017, S. 60).

Dabei geht man von zwei linearen, zueinander senkrechten Schwingungen gleicher Frequenz ω mit einer Phasenverschiebung φ aus, die wie folgt definiert sind (vgl. Demtröder, 2018, S. 341):

$$\begin{aligned}x &= a \cdot \cos(\omega t) \\y &= b \cdot \cos(\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

Mithilfe des Additionstheorems für Winkelfunktionen

$$\cos(\omega t + \varphi) = \cos(\omega t)\cos(\varphi) - \sin(\omega t)\sin(\varphi)$$

und durch Umformung, können die Gleichungen wie folgt angeschrieben werden:

$$\begin{aligned}\frac{x}{a} &= \cos(\omega t) \\ \frac{y}{b} &= \cos(\omega t)\cos(\varphi) - \sin(\omega t)\sin(\varphi) = \frac{x}{a}\cos(\varphi) - \sin(\omega t)\sin(\varphi)\end{aligned}$$

Durch weiteres Umformen ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned}\sin(\omega t)\sin(\varphi) &= \frac{x}{a}\cos(\varphi) - \frac{y}{b} \\ \cos(\omega t)\sin(\varphi) &= \frac{x}{a}\sin(\varphi)\end{aligned}$$

Die Zeit wird durch Quadrieren und anschließendes Addieren eliminiert. Es ergibt sich Folgendes:

$$\sin^2(\varphi) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos(\varphi)$$

Eingesetzt in die Ellipsengleichung ergibt sich Folgendes:

$$\frac{x^2}{a^{*2}} + \frac{y^2}{b^{*2}} - \frac{2xy}{a^*b^*} \cos(\varphi) = 1$$

$$a^* = a \cdot \sin(\varphi) \text{ und } b^* = b \cdot \sin(\varphi)$$

a und b ... sind die Amplituden

φ ... ist die Phasenverschiebung

Die folgende Abbildung 3 zeigt Schwingungskurven mit übereinstimmenden Amplituden, verschiedenen Frequenzverhältnissen $\omega_1:\omega_2$ und mit unterschiedlichen Phasenverschiebungen φ (vgl. Demtröder, 2018, S. 342):

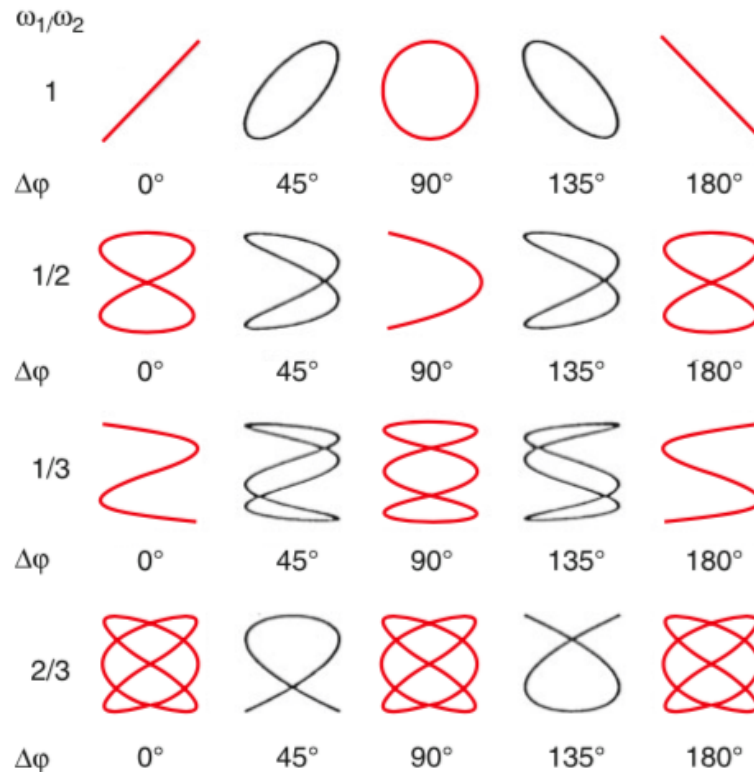


Abbildung 3: Lissajous-Figuren für verschiedene Frequenzverhältnisse und unterschiedlichen Phasenverschiebungen (vgl. Demtröder, 2018, S. 342)

Nur wenn das Frequenzverhältnis eine rationale Zahl ist, entstehen geschlossene Bahnkurven. Bei einem irrationalen Frequenzverhältnis entsteht mit der Zeit ein gefülltes Rechteck (vgl. Demtröder, 2018, S. 342).

3.4 Die Schallgeschwindigkeit und der Hörbereich des Menschen

Die Schallgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen in einem Medium ausbreiten. Das physikalische Zeichen ist das „ c “, welches sich aus dem lateinischen Wort „celeritas“ ableitet und mit den Worten „Eile“ oder „Schnelligkeit“ übersetzt werden kann. Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit sind das Medium, die Temperatur, der Wellentyp und die Frequenz.

In folgender Formel ist der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ , der Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c einer Welle gegeben:

$$c = \lambda \cdot f$$

Die Schallgeschwindigkeit in Luft bei einer Temperatur von 20°C beträgt 343 m/s (vgl. Kinsler, u.a., 2000, S. 528).

Der Mensch hört im Rahmen von 20 Hz bis 20 000 Hz. Das entspricht ca. 10 Oktaven, was einen sehr großen Bereich umfasst, wenn man bedenkt, dass viele Sänger einen Stimmumfang von 2 Oktaven haben. Mit zunehmendem Alter sinkt die obere Hörgrenze (vgl. Lüders & Pohl, 2017, S. 365).

3.4.1 Mögliche Testverfahren bei Schwerhörigkeit

In der Ohrenheilkunde gibt es zwei bekannte Testverfahren zur Erhebung von Schwerhörigkeit, bei denen eine Stimmgabel eingesetzt wird. Das ist zum einen der Weber-Versuch, und zum anderen der Rinne-Versuch. Sie geben Aufschluss darüber, ob es sich um eine Schallempfindungs- oder Schallleitungsstörung handelt (Gürkov & Krause, 2009, S. 35).

Beim Weber-Versuch wird dem Patienten eine angeregte Stimmgabel auf den Scheitel gesetzt. Ein normal hörender Mensch nimmt nun den Ton auf beiden Ohren gleich laut wahr. Hört der Patient den Ton auf dem erkrankten Ohr lauter, handelt es sich um eine Schallleitungsstörung. Hört der Patient den Ton am gesunden Ohr lauter, kann eine Schallempfindungsstörung vorliegen (Gürkov & Krause, 2009, S. 35).

Der Rinne-Versuch wird meist im Anschluss an den Weber-Versuch durchgeführt. Die schwingende Stimmgabel wird auf einen Knochenfortsatz hinter der Ohrmuschel gesetzt. Der Patient wird angewiesen, bei Verstummen des Tones Bescheid zu geben. Danach wird die Stimmgabel direkt vor die Ohrmuschel gehalten, ohne dabei neu angeregt zu werden. Der Rinne-Versuch fällt positiv aus, wenn der Ohrgesunde den Ton hören kann. Erst mit den Ergebnissen beider Tests kann eine sinnvolle Diagnose gestellt werden (Gürkov & Krause, 2009, S. 35-36).

Die Stimmgabeltests von Weber und Rinne galten lange Zeit als unsicher, da sie oft gegensätzliche Ergebnisse lieferten. Als jedoch die Fehlerquellen entdeckt wurden, wurden überarbeitete Instrumente und Techniken entwickelt. So wurden die Zinken der Stimmgabel mit Klemmen versehen, um die Obertöne bei Schwingungen zu dämpfen. Das Verschieben der Klemmen entlang der Zinken ermöglichte auch, den Ton der Stimmgabel in einem Bereich bis zu einer Oktave variieren zu können. Am Ende des Stiels wurde ein Knopf aus Metall befestigt, um beim Testen der Knochenleitung eine gute Kopplung mit dem Schädel zu gewährleisten. Mit einem kleinen Hammer wurde die Stimmgabel aktiviert. Durch einen Satz mit mehreren Stimmgabeln im Abstand von jeweils einer Oktave konnte zusätzlich der gesamte Hörbereich des Menschen abgedeckt und somit auch getestet werden (vgl. Feldmann, 1997, S. 116 und S. 428).

3.5 Bestandsaufnahme der einfachen Stimmgabeln

3.5.1 Bestandsaufnahme – Stimmgabeln mit Zinnfuß

In Abbildung 4 befindet sich ein Foto der aufgelisteten Stimmgabeln.

Tabelle 1: Bestandsaufnahme Stimmgabeln mit Zinnfuß

Nummer	Frequenz (in Hz)	Alte Nummer (direkt auf Stimmgabel geschrieben)
1	256	10
2	260	9
3	264	8
4	268	7
5	272	6
6	276	keine SG vorhanden
7	280	4
8	284	3
9	288	2
10	292	1
11	296	21
12	300	20
13	304	19
14	308	18
15	312	17
16	316	16
17	320	15
18	324	14
19	328	13
20	332	12
21	336	5
22	340	32
23	344	31
24	348	30
25	352	29
26	356	28
27	360	27
28	364	26
29	368	25
30	372	24
31	376	23
32	380	22
33	384	43
34	388	42
35	392	41
36	396	40
37	400	keine Angabe
38	404	38
39	408	37
40	412	36
41	416	35
42	420	34
43	424	33
44	428	54
45	432	53
46	436	keine SG vorhanden
47	440	keine SG vorhanden
48	444	keine SG vorhanden
49	448	keine SG vorhanden

Nummer	Frequenz (in Hz)	Alte Nummer (direkt auf Stimmgabel geschrieben)
50	452	48
51	456	47
52	460	46
53	464	45
54	468	44
55	472	65
56	476	64
57	480	63
58	484	62
59	488	61
60	492	60
61	496	59
62	500	keine SG vorhanden
63	504	57
64	508	56
65	512	55

Die kleinste Stimmgabel Nr. 65 hat eine Höhe von 17,5 cm, die größte Stimmgabel Nr. 1 hat eine Höhe von 22,5 cm. Die Stimmgabeln unterscheiden sich in der Größe somit höchstens um 5 cm. Die Stimmgabeln sind in Zinnfüßen befestigt, die eine Masse von 387 g aufweisen, eine Höhe von 6,74 cm und einen Durchmesser von 4,7 cm haben. Dieses Stimmgabelset mit 4 Hz-Abstufung stellt ein Tonometer im Sinne eines Tonmessers dar (vgl. Russell, 2020, S. 48). Offensichtlich ist es das im Anhang 3 beschriebene Tonometer.



Abbildung 4: Stimmgabeln mit Zinnfuß (Tonometer)

3.5.2 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne Resonanzkörper

Tabelle 2: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne Resonanzkörper

Inventarnummer	Bezeichnung	Beschreibung	Größe (inkl. Stiel)
Gelbes Pickerl: 1153	UT2 256 VS	SG mit Messing-Schrauben	ca. 30cm
Gelbes Pickerl: 1152	UT-1 64 VS	SG mit Messing- Schrauben	ca. 49,5cm
Gelbes Pickerl: 1150 Blaues Pickerl: B27	C 128	SG mit schwarzem Holzgriff	38cm
Gelbes Pickerl: 1146	Keine Angabe	zwischen SG und Halterung befindet sich Holz	Gesamthöhe: 14,5cm
Gelbes Pickerl: 1148	434	zwischen SG und Halterung befindet sich Holz	Gesamthöhe: 20cm
Gelbes Pickerl: 1145	MI3 640 VS	SG auf schwarzem Resonanzkörper	RK 12cm x 6cm
V/54/1	UT2 256 VS	SG mit Messing Schrauben	28,5cm
Keine Vorhanden	Keine vorhanden	SG zum Reinschrauben	23,5cm
SG 1	1 – „d“	-	19 cm
SG 2	2 – „dis“	-	18,3cm
SG 3	3 – „e“	-	17,8cm
SG 4	4 – „f“	-	18cm
SG 5	5 – „fis“	-	17,2cm
SG 6	6 – „g“	-	17,1cm
SG 7	7 – „gis“	-	16,3cm
SG 8	8 – a	-	16,2cm
SG 9	9 – h/b ?	-	15,4cm

3.5.3 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln mit hölzernem Resonanzkörper

Es handelt sich hierbei um halboffene Resonanzkörper. In Abbildung 5 befindet sich ein Foto der aufgelisteten Stimmgabeln.

Tabelle 3: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln mit hölzernem Resonanzkörper

Inv. Nr.	Bez. Resonanzkörper	Bez. SG	Beschriftung Unterseite	Alte Bez.	Größe (in cm)
V/1	UT ₃ Rudolph Koenig A.Paris	UT ₃ 512 VS	Stempel: II. Physikalisches Institut der Universität Wien IX/66 Boltzmann-gasse 5 V1	/	31 x 12

Inv. Nr.	Bez. Resonanzkörper	Bez. SG	Beschriftung Unterseite	Alte Bez.	Größe (in cm)
			V,18 durchgestrichen		
V/2	RE ₃ Rudolph Koenig A.Paris	RE ₃ 576VS	II. Physikalisches Institut der Universität Wien IX/66 Boltzmanngasse 5 V2 V, 19 durchgestrichen	/	27,5 x 11
V/3	MI ₃ Rudolph Koenig A.Paris	MI ₃ 640 VS	II. Physikalisches Institut der Universität Wien IX/66, Boltzmanngasse 5 V3 V,20 durchgestrichen	/	25 x 10,5
V/4	FA ₃	FA ₃ 682,6 VS	~"~ V4 V,21 durchgestrichen	/	23,5 x 10
V/ 5	FEHLEND				
V/6					
V/7	SI ₃ Rudolph Koenig A.Paris	SI ₃ 960 VS	~"~ V7 V,24 durchgestrichen	/	17 x 9
V/8	UT ₄ Rudolph Koenig A.Paris	UT ₄ 1024 VS	~"~ V8 V,25 durchgestrichen	/	16 x 8,5
V/9	LA ₃ Rudolph Koenig A.Paris	LA ₃ 870 VS	~"~ V9 V32 durchgestrichen	/	18 x 9
V/10	LA ₃	870 VS	~"~ V10 V33 durchgestrichen Normal-Stimmgabel (handgeschrieben)	/	18 x 9
V/11	MI ₄ Rudolph Koenig A.Paris	MI ₄ 1280 VS	~"~ V11 V44 durchgestrichen N:7 nicht durchgestrichen	/	12,5 x 8,5
V/12	SOL ₄ Rudolph Koenig A.Paris	SOL ₄ 1336 VS	Nur Stempel und V12	II 31 an der Oberseite durchgestrichen	10 x 8
V13	7 Rudolph Koenig A.Paris	7 1792 VS	Stempel und V13 N=10 mit blauer Farbe	/	8,5 x 7

Inv. Nr.	Bez. Resonanzkörper	Bez. SG	Beschriftung Unterseite	Alte Bez.	Größe (in cm)
V/14	UT ₅ Rudolph Koenig A.Paris	UT ₅ 2048 VS	Stempel und V14 F1 (sehr schwer zu entziffern) mit blauer Farbe	II. 3 (sehr schwer lesbar)	7,5 x 6,5
V/15	FEHLEND				
V/16					
V/17					
V/18					
V/19					
V/20					
V/21	C1 258,652 Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	UT3 S17,305 VS MK	Stempel + V21	/	30,5 x 11,5
V/22	C#1 274,033 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	UT#3 548,066 VS MK	Stempel + V22	/	29 x 11
V/23	d ¹ 290,327 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	RE ₃ 580,655 VS MK	Stempel + V23	/	27,5 x 11
V/24	d# ₁ 307,592 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	RE# ₃ 615,183 VS	Stempel + V24	/	26 x 11
V/25	e ¹ 325,881 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G.	MI ₃ 651,763 VS	Stempel + V25	/	24,5 x 11

Inv. Nr.	Bez. Resonanzkörper	Bez. SG	Beschriftung Unterseite	Alte Bez.	Größe (in cm)
	CHEMNITZ				
V/26	FEHLEND				
V/27	$f^{\#1}$ 365,790 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	FA $^{\#}_3$ 731,580 VS	Stempel + V27	/	22 x 10,5
V/28	g^1 387,541 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	SOL3 775,082 VS MK	Stempel + V28	/	20,5 x 9,5
V/29	$g^{\#1}$ 410,585 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A.-G. CHEMNITZ	SOL $^{\#}_3$ 821,171 VS MK	Stempel + V29	/	19,5 x 9,5
V/30	a^1 436 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A-G CHEMNITZ	LA3 870 VS MK	Stempel + V/30	/	18,5 x 9,5
V/31	b^1 460,866 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A-G CHEMNITZ	LA3 921,733 VS MK	Stempel + V31	/	17,5 x 9
V/32	h^1 488,271 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A-G CHEMNITZ	SI3 976,542 VS MK	Stempel + V32	/	16,5 x 8,5

Inv. Nr.	Bez. Resonanzkörper	Bez. SG	Beschriftung Unterseite	Alte Bez.	Größe (in cm)
V/33	C ² 517,305 Schw. Internationale Stimmung MAX KOHL A-G CHEMNITZ	UT4 1034,610 VS MK		/	15,5 x 8,5
V/34	FEHLEND				
V/35	Womöglich ein eingeritztes T	Auf der einen Seite: Symbol und daneben 891 Auf der anderen Seite: Noir & Forster Wien 870 eingekreist	Stempel + V/35 V9 durchgestrichen mit blauer Farbe	/	18,5 x 10



Abbildung 5: Stimmungsgabeln mit hölzernen halboffenen Resonanzkörper

3.5.4 Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne aktuelle Inventarnummer

Tabelle 4: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne aktuelle Inventarnummer

Nummer	Bez. am Holz-Resonanzkörper	Alte Bez.	Bez. unterhalb	Bez. auf der SG	Größe des Resonanzkörpers (in cm)
1	UT4 Rudolph Koenig A. Paris	II. 6/10	V44 N 6 (blaue Schrift)	keine vorhanden	15 x 8,5
2	UT4 Rudolph Koenig A. Paris	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1140	keine vorhanden	UT4 1024 VS	16 x 8,5
3	LA3 Rudolph. Koenig A. Paris	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1138	nicht leserlich	Auf der einen Seite: Symbol und 918 Auf der anderen Seite: 870 eingekreist	19 x 9,5
4	LA3 Rudolph Koenig A. Paris	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1141 Weißes Pickerl: 1628	Lang (alles weitere ist unleserlich)	keine vorhanden	18,5 x 9,5
5	UT3	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1137	C	keine vorhanden	30,5 x 11,5
6	keine vorhanden	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1144 II.1. ½ (weiße Schrift)	V.75. ½ (blaue Schrift)	MARLOT A.PARIS	32 x 11,5
7	keine vorhanden	Gelbes Pickerl: I. Phys.Inst.Univ.Wien 1136 Weißes Pickerl: K 1628	keine vorhanden	UT3 512 VS	30,5 x 11,5
8	A	keine vorhanden	V1 (4)	keine vorhanden	18 x 9,5

Im Zuge dieser Bestandsaufnahme wurde der Akustik-Kasten der physikhistorischen Sammlung neu sortiert und geordnet (siehe Abbildung 6). Im obersten und dritten Fach befinden sich die Stimmgabeln mit Resonanzkörper, die in Tabelle 3 aufgelistet sind. Im zweiten Fach sind die Stimmgabeln mit Zinnfuß, die in Tabelle 1 aufgelistet sind, geordnet. Rechts daneben lagert ein Vibrationsmikroskop (Inv.-Nr. 2109), das in dieser Arbeit untersucht wird. Ganz rechts befinden sich zwei Holzkisten übereinander.

In der unteren Holzkiste sind vier Stimmgabeln mit je einem verspiegelten Zinkenende enthalten, in der oberen die Stahlzylinder zur Bestimmung der Hörgrenze. Auf dieser Kiste liegt eine elektromagnetische Stimmgabel der HTL 16, die im Kapitel 4.4 behandelt wird.



Abbildung 6: Akustik-Kasten der physikhistorischen Sammlung

Eine weitere anregbare Stimmgabel der HTL 16 ist im dritten Fach rechts zu sehen. Ganz vorne im dritten Fach befinden sich gelb markierte Stimmgabeln ohne Resonanzkörper, die als SG 1 bis SG 9 in Tabelle 2 beschrieben sind. Im untersten Fach befinden sich hauptsächlich Pfeifen, die Stative zur Befestigung von Stimmgabeln, ein Intervallapparat und ganz im Hintergrund verdeckt ein Monochord. Weiters sind in Abbildung 6 einige Sirenen und Lochscheiben für Sirenen (Mitte und unten) und eine Savart'sche Glocke (oben rechts) zu sehen.

4. Experimenteller Teil

4.1 Experimentiermethodik

Audacity

Die Software Audacity ist ein kostenloses Programm, mit dem man Audio-Aufnahmen tätigen kann. Die Software wurde für den folgenden experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit verwendet, um Frequenzspektren oder Schwebungen darzustellen. Die errechneten Frequenzspektren sind auf ± 1 Hz genau, wobei sich die Lautstärke-Pegel auf den maximalen Lautstärkepegel des verwendeten Notebooks beziehen (vgl. Hobel, 2020, S. 32).

Mikrofon für Computeraufnahmen

Für die Aufnahmen mit der Software Audacity wurde ein RODE USB-Mikrofon verwendet. Das Mikrofon hat die Maße $184 \times 62 \times 50$ mm. Der Übertragungsbereich des Mikrofons liegt zwischen 20 Hz und 20 000 Hz (vgl. Bedienungsanleitung, o. J., S. 31). Das Mikrofon ist leicht verstellbar, mit einer Einstellschraube kann man es auch in Schräglage bringen (vgl. Rode Bedienungsanleitung, o. J., S. 35).



Abbildung 7: Mikrofon mit den beiden Reglern

Am Mikrofon selbst gibt es zwei Regler, oben den Mischregler und unten den Lautstärkenregler (Abbildung 7).

Der Mischregler ist für das Zusammenspiel zwischen dem Signal, das direkt in das Mikrofon trifft (z.B. der Ton einer Stimmgabel) und einer weiteren Schallquelle aus dem Hintergrund (z.B. Playback-Pegel vom Computer) nötig. Im Allgemeinen wird eine Mittelstellung des Reglers empfohlen. Wie Abb. 7 und 8 zeigen, ist der Einfluss dieses Reglers für die vorliegende Untersuchung nicht bedeutend (vgl. Rode Bedienungsanleitung, o. J., S. 37).

Mit dem unteren Regler, dem Lautstärkenregler, kann die Lautstärke variiert werden, wenn ein Kopfhörer angeschlossen wird. Dieser Regler wurde für die Aufnahmen nicht benötigt. Bei allen Experimenten wurde der Mischregler auf den ersten Punkt rechts neben dem mittigen Strich eingestellt (siehe Abbildung 7) (vgl. Rode Bedienungsanleitung, o. J., S. 37).

Das Eigenrauschen des Mikrofons

Das Eigenrauschen des Mikrofons wurde untersucht, indem Aufnahmen mit Audacity zu jeder Einstellung des Mischreglers gemacht wurden. Befindet sich der Regler ganz links, wird das in Abbildung 8 gezeigte Eigenrauschen festgestellt. Der Pfeil weist auf den Cursor hin, die durch ihn markierten Werte werden in der unteren Zeile der Abbildung 8 angezeigt.

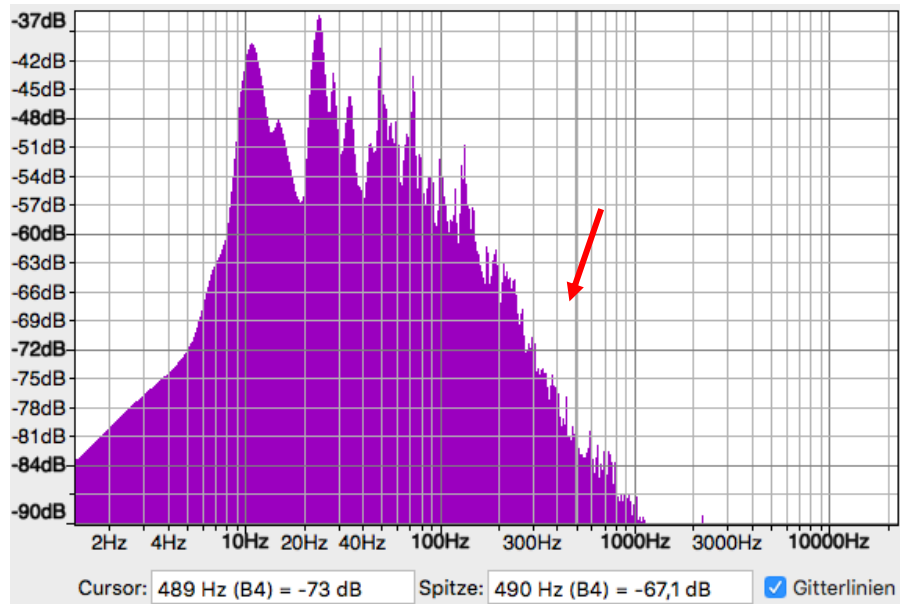


Abbildung 8: Eigenrauschen des Rode-Mikrofons, Regler befindet sich ganz links.

Befindet sich der Regler ganz rechts, entsteht das Spektrum der Abbildung 9.

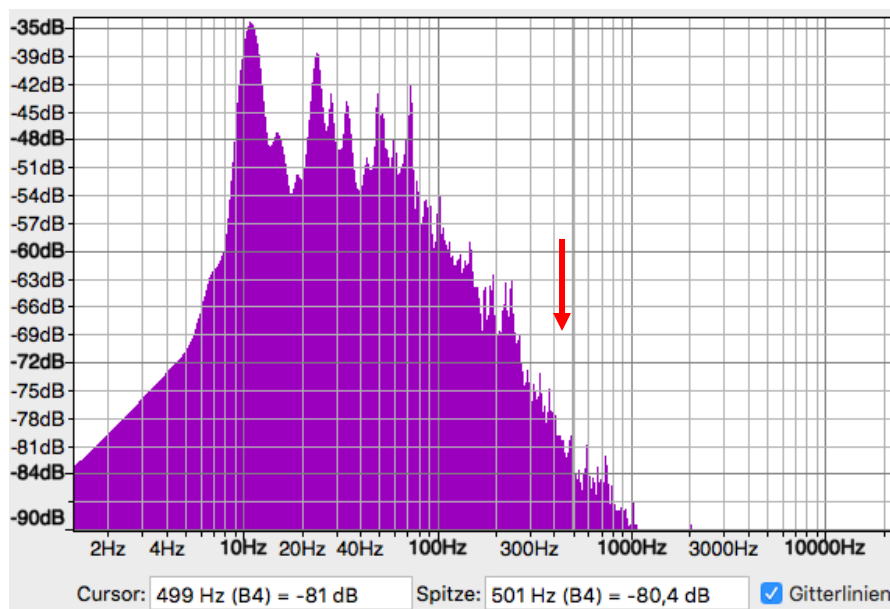


Abbildung 9: Eigenrauschen des Rode-Mikrofons, Regler befindet sich ganz rechts.

Der Dynamikbereich des RODE Mikrofons ist mit 96 dB angegeben. Der Grenzschalldruck beträgt 110 dB, das lässt darauf schließen, dass ein Eigenrauschen von 14 dB vorherrscht (vgl. Rode Bedienungsanleitung, o.J., S. 31).

Das Oszilloskop

Als Oszilloskop wurde folgendes Modell verwendet: Oszilloskop Tektronix TBS 1102B-EDU. Damit können Momentaufnahmen der Schwingungen gemacht und gespeichert werden. Die gespeicherten Bilder dienen zum Auswerten und Berechnen von Frequenzen.

Mikrofon für Oszilloskopaufnahmen

Für Messungen mit dem Oszilloskop wurde ein Universalmikrofon (Abbildung 10) verwendet, das sowohl für den Frequenzbereich 30 Hz bis 20 kHz und mit verminderter Empfindlichkeit auch bis 40 kHz eingesetzt werden kann (Leybold Didactic Gebrauchsanweisung 58626). Das Mikrofon wird direkt am Oszilloskop angeschlossen, um Audioaufnahmen durchzuführen (vgl. Gebrauchsanweisung, o. J., S. 1).



Abbildung 10: Universalmikrofon

Hinweise zu den Messfehlern

Oszilloskop: Die automatische Frequenzmessung des Oszilloskops hat eine Genauigkeit von 50 ppm + 1 count (1 count ist die Einheit der kleinsten angezeigten Stelle). Die Unsicherheit von 50 ppm wird erst im kHz-Bereich relevant (z.B. für die Frequenzen der Stahlstäbe im Abschnitt 4.12). Für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Stimmgabeln mit Frequenzen $f < 1$ kHz ist diese Auflösung nicht relevant, weil die erzeugten Signale meist nicht ganz stabil

und gleichmäßig sind. Speziell Stimmgabeln reagieren sehr empfindlich darauf, wie und in welche Richtung sie angeschlagen werden bzw. wie die Richtung zum Mikrofon ist. Für die Messung von Periodendauern bzw. Frequenzen mit den beiden Cursors ist zu beachten, dass der Bildschirm des verwendeten Oszilloskops eine 8-Bit-Auflösung besitzt, d.h., die Zeitauflösung ΔT mittels Cursor durch die jeweils eingestellte gesamte Länge der Zeitachse geteilt durch 256 gegeben ist. Für ein ausgewähltes Signal mit n Periodendauern T kann der statistische Frequenzfehler Δf wie folgt abgeschätzt werden:

$$\Delta f = \frac{1}{(nT)^2} \cdot n \cdot 2\Delta T \quad \text{mit} \quad \Delta T = \frac{10t_{div}}{256}$$

t_{div} ist die eingestellte Zeit pro Division. Der Faktor 2 wird genommen, weil das Zeitintervall mit 2 Cursors markiert wird. Typisch für die Auswertung mit der Cursormethode sind z.B. folgende Fehler: $\pm 0,1$ Hz bei $f = 6$ Hz; $\pm 0,6$ Hz bei $f = 50$ Hz; $\pm 1,2$ Hz bei $f = 250$ Hz; ± 4 Hz bis ± 5 Hz im Bereich $f = 500$ Hz bis 750 Hz (je nach gewählter Periodenzahl n). Der Übersichtlichkeit halber werden die Frequenzfehler und auch folgende Fehler nicht immer angegeben. Gemessene Frequenzen wurden nicht gerundet, um die Zuordnung zu den entsprechenden Oszilloskopbildern zu vereinfachen.

Wägefehler: Massestücke für die Stimmgabeln werden auf ± 1 g bestimmt.

Standmaße von Objekten: sind auf $\pm 0,5$ cm zu verstehen.

4.2 Große Stimmgabelkassette von Rudolph Koenig

Die große Kassette (Abbildung 11) besteht aus einem Satz elektromagnetisch betriebener Stimmgabeln von Rudolph Koenig, Paris, ca. 1913. Die Maße der Kassette betragen 59 x 47 x 13 cm. In der Kassette sind 10 Stück Stimmgabeln enthalten, die einen Frequenzbereich von 32 Hz – 256 Hz aufweisen (siehe Tabelle 5), was ungefähr drei Oktaven entspricht. Jedes Zinkenende dieser zehn Stimmgabeln ist mit einer Messingschraube versehen. Zu jeder Stimmgabel gehören auch zwei verschiebbare Massenstücke, um die Frequenzen laut der eingravierten Markierungen einstellen zu können. Bei der kleinsten Stimmgabel

fehlen die beiden Massenstücke (Abbildung 12). Weiters enthält die Kassette einiges an Zubehör, so findet man zwei Spulen zur elektromagnetischen Anregung, Montagezubehör für Stative und einen Hammer zum Anschlagen. In der Kassette liegen auch sechs dünne Bleche mit unterschiedlich dicken Beleuchtungsschlitzten (Abbildung 13). Diese können auf die Stimmgabeln mittels Schrauben montiert werden und dienen für stroboskopische Untersuchungen.

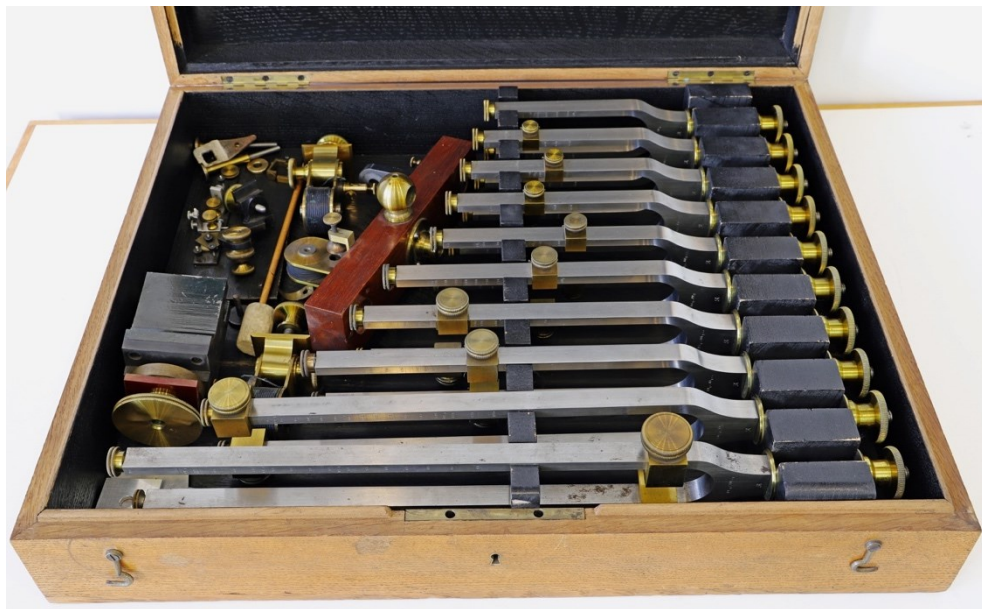


Abbildung 11: Große Stimmgabel-Kassette von Rudolph Koenig

Tabelle 5: Auflistung der Stimmgabeln in der Stimmgabelkassette. Die 2. Maßzahl bei der Größe ist ohne runden Fuß zu verstehen.

Stimmgabel	Größe (in cm)	Frequenz- bereich	Frequenz in Hz	Gewichte	Bez.	Schritte
1	26,5/17,0	-- Sl ₂ -UT ₃	512-460	nein	VS	4er
2	28,0/18,0	-- LA ₂ --	460-404	ja	VS	4er
3	29,0/19,0	-- SOL ₂ --	404-356	ja	VS	4er
4	30,5/20,1	--MI ₂ -FA ₂ - -	356-304	ja	VS	4er
5	31,0/21,3	UT ₂ -RE ₂ --	300-256	ja	VS	4er
6	34,5/24,6	--LA ₁ -UT ₂	256-212	ja	VS	4er

Stimmgabel	Größe (in cm)	Frequenz- bereich	Frequenz in Hz	Gewichte	Bez.	Schritte
7	37,0/26,7	--FA ₁ - SOL ₁	212-168	ja	VS	4er
8	39,5/29,7	UT ₁ -MI ₁ --	170-128	ja	VS	4er
9	46,0/35,7	--SOL ₁ -1- UT ₁	128-94	ja	VS	2er
10	50,5/40,8	UT ₁ -1-SOL- 1	96-64	ja	VS	2er



Abbildung 12: Stimmgabel mit Skala SI₂ bis UT₃

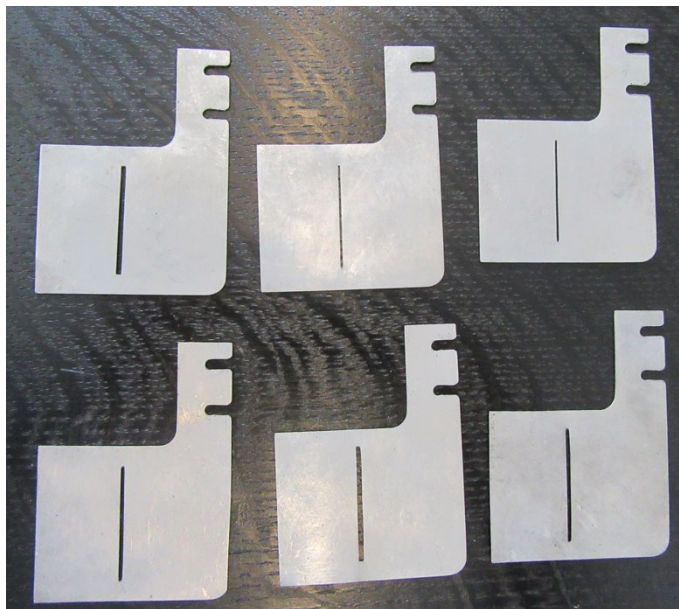


Abbildung 13: Spaltblenden für stroboskopische Untersuchungen

Gemäß Formel in Kapitel 3.1 ist die Frequenz einer Stimmgabel dem Kehrwert der quadrierten Zinkenlänge L proportional. Abbildung 14 zeigt diese Beziehung

sehr schön für die zehn Stimmgabeln der Tabelle 5. Zu beachten ist, dass für die genannte Beziehung nur die gerade Zinkenlänge zu nehmen ist. D.h., von der Größe der Stimmgabeln ohne runden Schaft (2. Zahl unter Größe in Tabelle 5) sind noch 40 mm für den unteren u-förmigen Teil abzuziehen. Dieser Abzug ist, wie in Abbildung 11 ersichtlich, für alle 10 Stimmgabeln gleichartig.

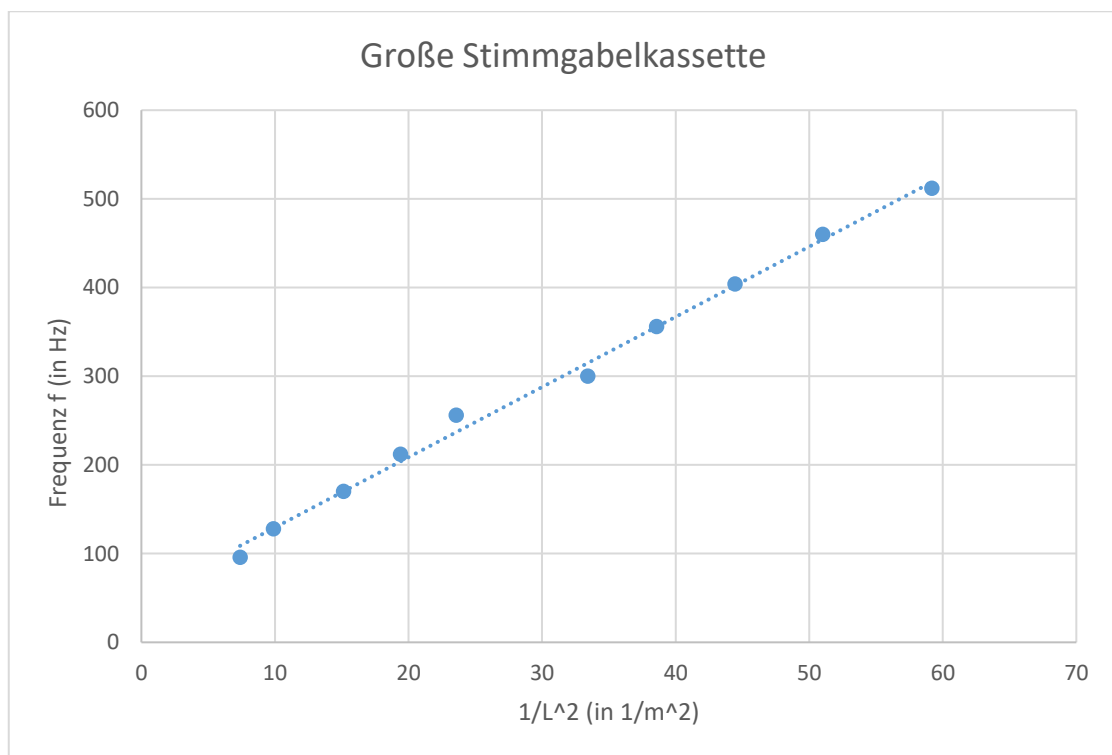


Abbildung 14: Frequenz vs. $1/L^2$

Zusätzlich zu der großen Kassette gibt es zwei massive Stative (Abbildung 15), die laut Inventarnummer zur Stimmgabeluhr V/44 gehören. Sie haben eine Höhe von 60 cm und an ihnen können Stimmgabeln entweder horizontal oder vertikal justiert und in der drehbaren Montagenut verschoben werden. Auch die Höhe kann verstellt werden, was bei Messungen sehr hilfreich ist, um das Mikrofon gut positionieren zu können (Abbildung 16).



Abbildung 15: Stative zur Befestigung der Stimmgabel

Für die folgenden Experimente wird die jeweils ausgewählte Stimmgabel horizontal auf dem Stativ befestigt und mit dem zugehörigen Hammer, der sich in der Kassette befindet, angeregt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 16 zu sehen.



Abbildung 16: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT₁ - SOL₁

Überprüfung der Stimmgabel UT-1 - SOL-1

Dies ist die größte Stimmgabel in der Kassette. Die Frequenz dieser Stimmgabel reicht von SOL-1 bis UT-1, das entspricht 96 Hz bis 64 Hz. Die Werte der Skala sind in VS angegeben, was „Vibration Simple“ bedeutet (vgl. Pantalony, 2009, S. xii). Der Wert 96 entspricht beispielsweise 48 Hz, der Wert 64 entspricht 32 Hz, die VS-Werte sind also zu halbieren, um die heute übliche Frequenzangabe zu erhalten. Die Frequenz der genannten Stimmgabel kann mit unterschiedlicher Anbringung der beiden Massestücke über einen Bereich von 16 Hz variiert werden.

Zunächst wird die Stimmgabel ohne Gewichte und ohne Endschrauben untersucht. Bei Anregung der Stimmgabel durch den Hammer ergibt sich laut Oszilloskop (verbunden mit dem Universalmikrofon) mittels Cursor-Funktion eine Frequenz von **53,19 Hz** (Abbildung 17).

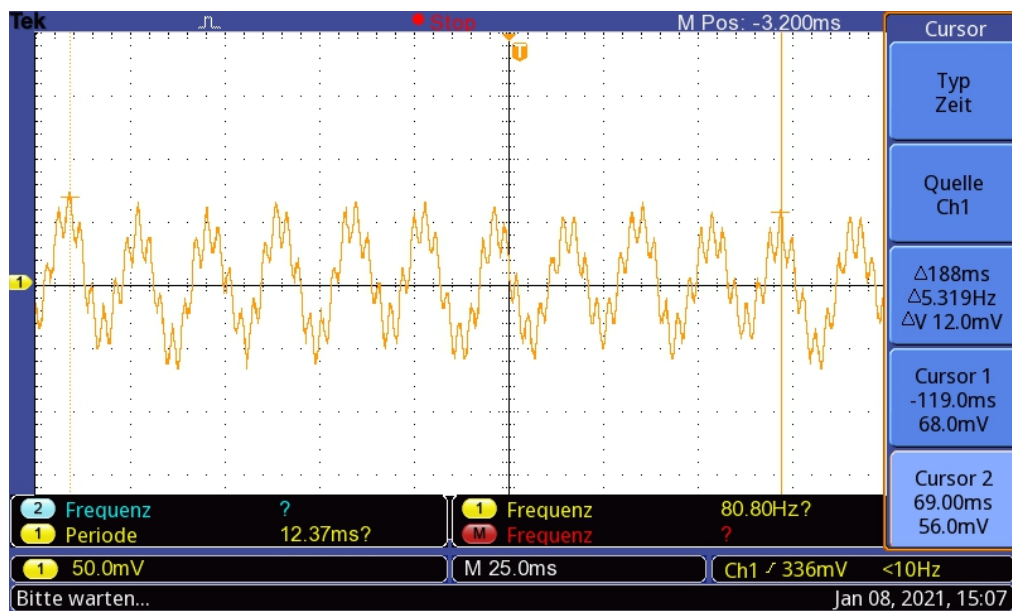


Abbildung 17: Oszilloskopbild für die Stimmgabel UT-1 - SOL-1 ohne Gewichte und Endschrauben (10 Perioden).

Für die nächste Messung wird die Stimmgabel mit den beiden unterschiedlich schweren Endschrauben versehen. Die Masse der Endschraube, welche an der oberen Zinke befestigt wurde, beträgt 16 g. Die Masse derjenigen, die an der unteren Zinke angebracht wurde, beträgt 9 g.

Die Auswertung mit der Cursor-Funktion des Oszilloskops ergibt eine Frequenz von **49,72 Hz**. Die automatische Funktion des Oszilloskops zeigt eine Frequenz von **49,27 Hz** an. Die Aufnahme mit der Software Audacity ergibt eine Frequenz von **50 Hz** (Abbildung 18), welche mit dem Wert des Oszilloskops sehr gut übereinstimmt.

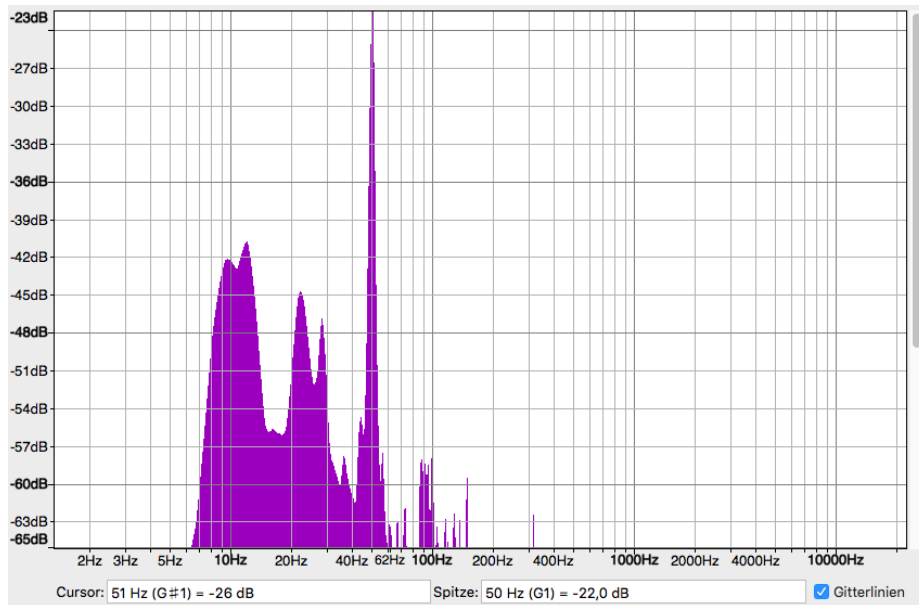


Abbildung 18: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT-₁ - SOL-₁ mit den Endschrauben (Peak bei 50 Hz).

Als nächstes werden die zwei vorgesehenen Massen angebracht: auf der oberen Zinke der Stimmgabel die Masse von 189 g, auf der unteren Zinke die Masse von 193 g. Zunächst werden die Massen bei den Strichen UT-₁ bzw. **VS 64** befestigt.

Die Darstellung des Oszilloskops (Abbildung 19, 6 Perioden) ergibt eine Frequenz von $5,319 \text{ Hz} \cdot 6 = \mathbf{31,914 \text{ Hz}}$.

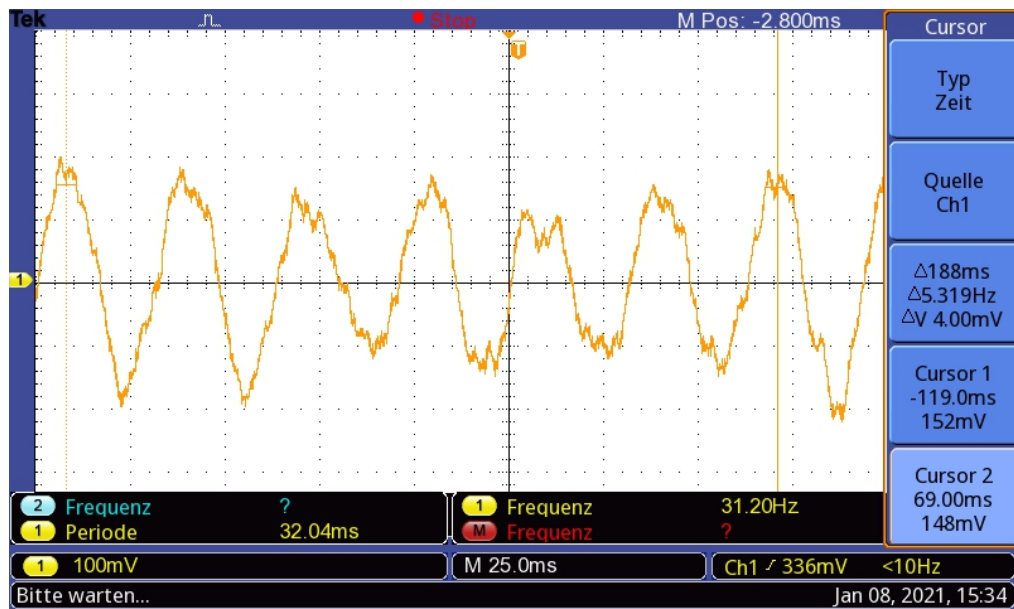


Abbildung 19: Oszilloskopbild der Stimmgabel UT-1 - SOL-1 mit den Massen für 32 Hz

Die nächste Messung erfolgt bei der Einstellung MI-1 und **VS 80**. Hier liefert das Oszilloskop einen Frequenzwert von **40,208 Hz**. Eine Aufnahme mit Audacity (Abbildung 20) ergibt eine Frequenz von **41 Hz**, welche mit der Auswertung des Oszilloskops gut übereinstimmt.

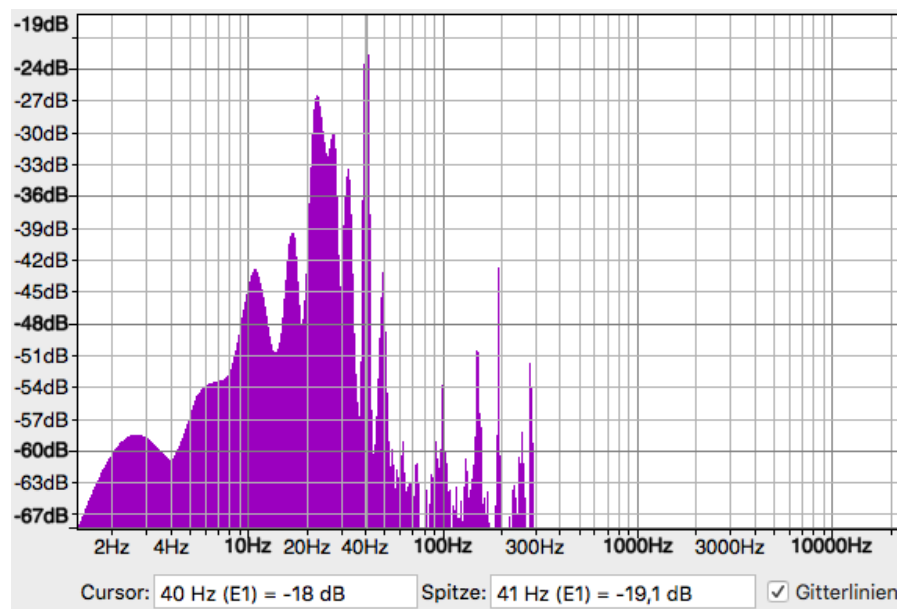


Abbildung 20: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT-1 - SOL-1 1 bei der Einstellung 40 Hz

Die Einstellung FA-1 bzw. **VS 85** ergibt laut Oszilloskop eine Frequenz von $2,370 \text{ Hz} \cdot 18 = \mathbf{42,66 \text{ Hz}}$ (Abbildung 21, 18 Perioden).

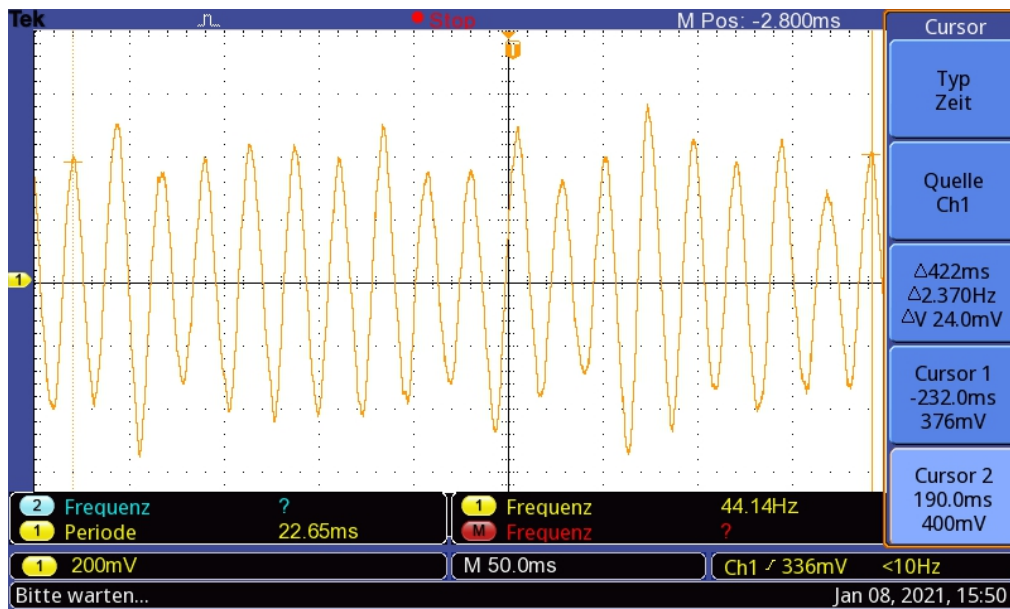


Abbildung 21: Oszilloskopbild der Stimmgabel UT-1-SOL-1 mit der Einstellung 42,5 Hz

Auch die Aufnahme mit Audacity ergibt mit einer Frequenz von **43 Hz** wiederum gute Übereinstimmung (Abbildung 22).

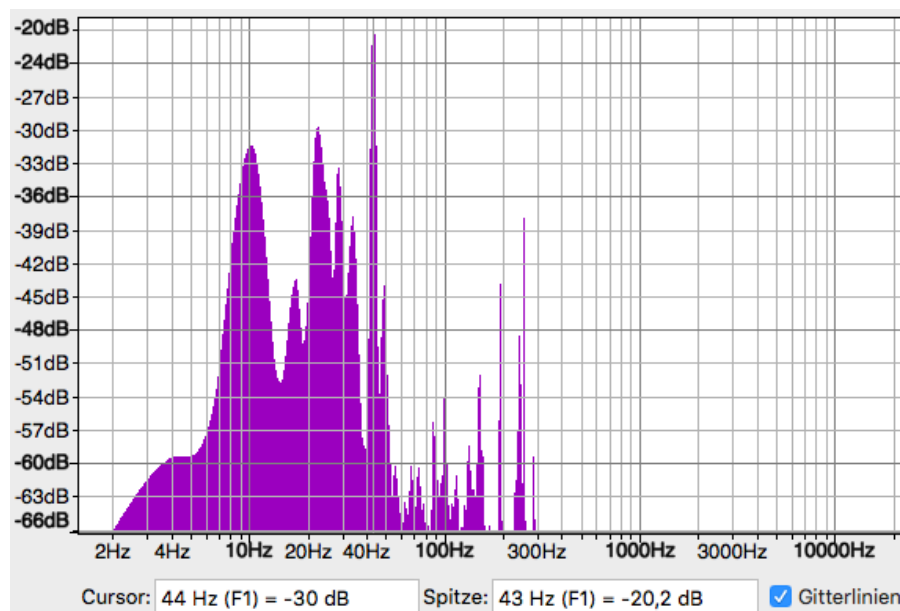


Abbildung 22: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT-1 - SOL-1 bei der Einstellung 42,5 Hz

Der Versuch wurde dreimal wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Resultate zu überprüfen. Wie auch die bisherigen Messresultate zeigen, liegt die Unsicherheit der Messungen bei ca. 0,5 Hz bis 1 Hz (vgl. Kapitel 4.1).

Wiederholung	Oszilloskop	Audacity
1	42,66 Hz	43 Hz
2	42,66 Hz	43 Hz
3	42,44 Hz	43 Hz

Für die Einstellung SOL-1 bzw. **VS 96** liefert das Oszilloskop eine Frequenz von **48,174 Hz**. Das Frequenzspektrum des Audacity zeigt eine Frequenz von 49 Hz an.

Überprüfung der Stimmgabel SI-2 – UT-3

Dies ist die kleinste Stimmgabel in der Stimmgabelkassette. Die Stimmgabel reicht von SI-2 bis UT-3 bzw. von VS 464 bis VS 512, also einer Frequenz von 232 Hz bis 256 Hz. Die Frequenzdifferenz beträgt somit 24 Hz.

1. Die Stimmgabel wird ohne Massen, nur mit den Endschrauben untersucht. Das Oszilloskop (Abbildung 23, 18 Perioden) zeigt eine Frequenz von **260,48 Hz** an.

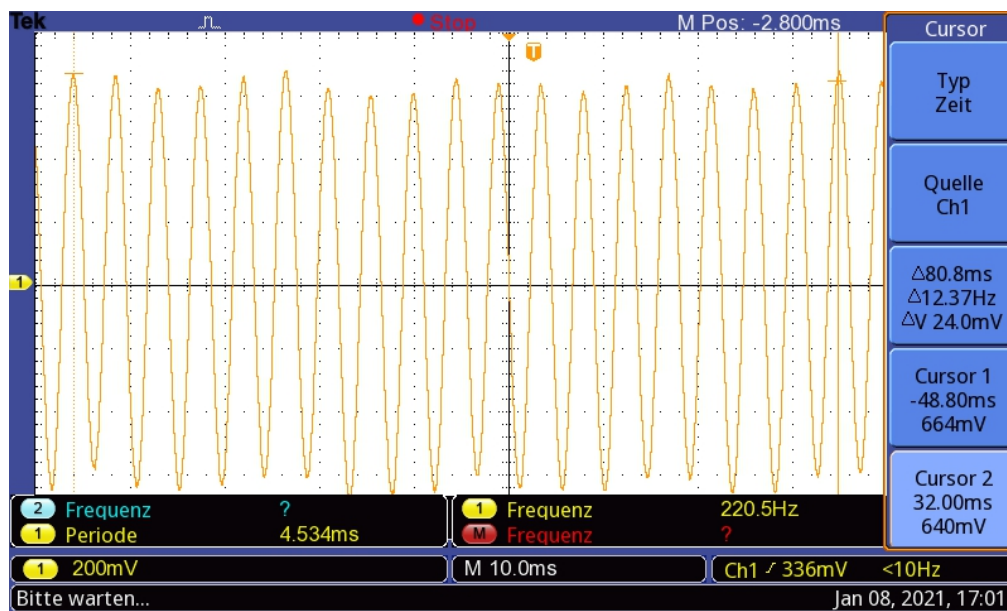


Abbildung 23: Oszilloskopbild für die Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit Endschrauben

Aus dem Frequenzspektrum mit Audacity (Abbildung 24) ist eine Frequenz von **263 Hz** zu entnehmen. Der Peak bei 263 Hz ist allerdings niedriger als einige Frequenzpeaks unter 100 Hz. Ursache dürfte das Mitvibrieren des metallenen Stativs sein. Das dürfte auch für Abbildung 26 gelten.

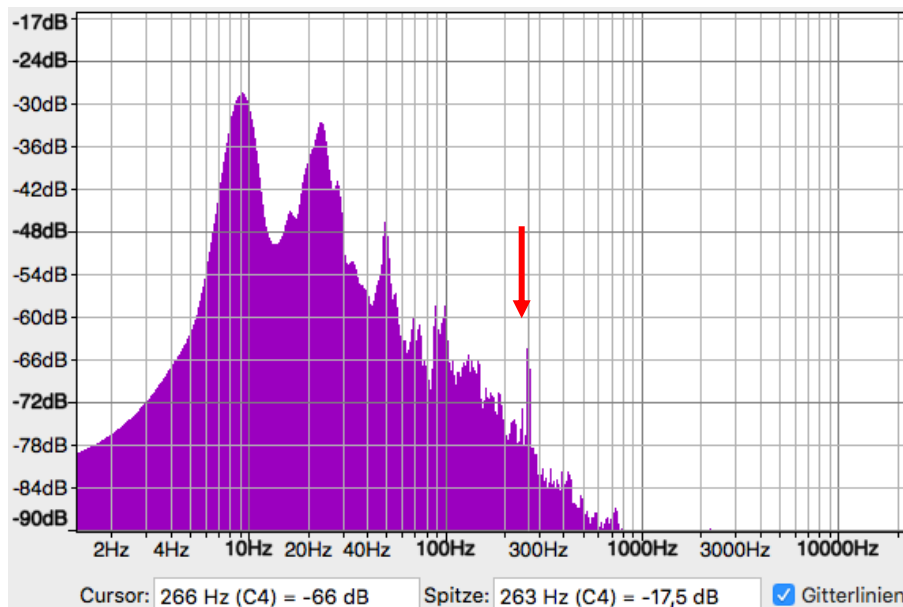


Abbildung 24: Frequenzspektrum der Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit Endschrauben

2. Die Stimmgabel wird mit Massen von 5 g und 4 g ergänzt. Hier ist zu bemerken, dass dies die Massen der nächstgrößeren Stimmgabel sind und nicht auf diese Stimmgabel abgestimmte Massen. Dadurch wird die Frequenzskala nicht mehr eingehalten. Die Gewichte werden bei VS 460 und VS 464 justiert.

Das Oszilloskop ergibt eine Frequenz (Abbildung 25, 21 Perioden) von $11,84 \text{ Hz} \cdot 21 = 248,64 \text{ Hz}$ an.

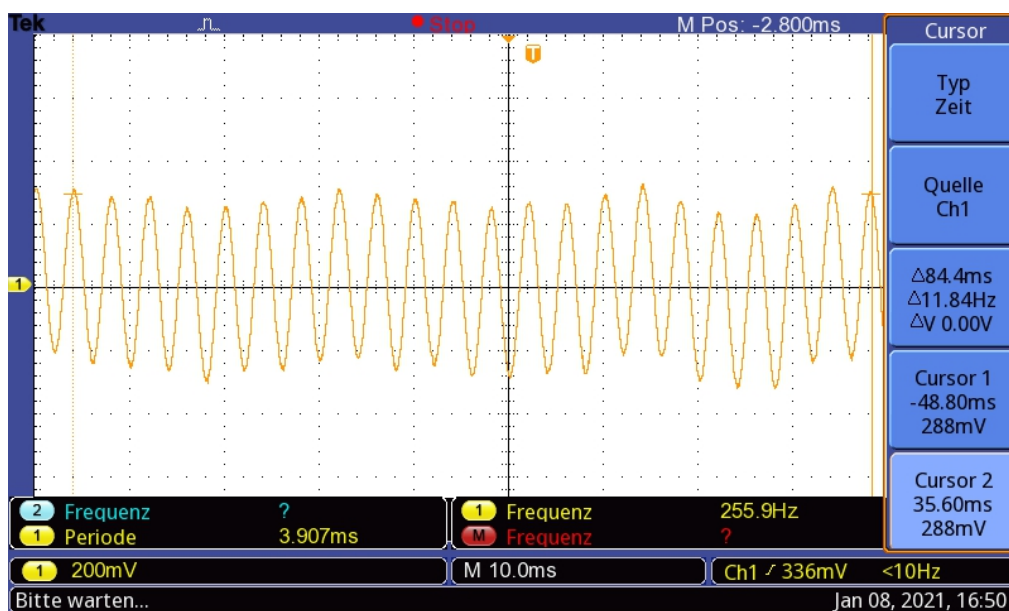


Abbildung 25: Oszilloskopbild für die Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit der Einstellung VS 464

Aus dem Frequenzspektrum des Audacity ist eine Frequenz von **252 Hz** zu entnehmen (Abbildung 26). Wie bei Abbildung 22 bereits angedeutet, dürfte das Vibrieren des Stativs zu den Peaks unter 200 Hz führen.

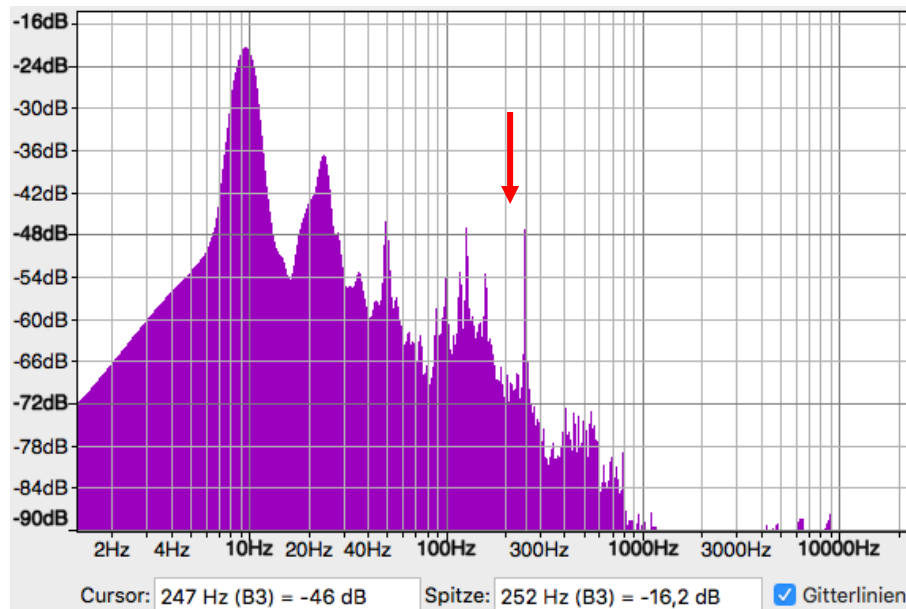


Abbildung 26: Frequenzspektrum der Stimmgabel SI2-UT3 mit der Einstellung VS 464

3. Die leichten Gewichte werden durch schwerere ersetzt: Die Massen der beiden Gewichte betragen 20 g und 19 g.

3.1 Die Gewichte werden auf VS 460 und VS 460 justiert. Statt der zu erwartenden Nennfrequenz von 230 Hz werden um 6 Hz bis 7 Hz niedrigere Werte erhalten:

Frequenz Oszilloskop	222,66 Hz
Frequenz Audacity	224 Hz

3.2 Die Gewichte werden auf UT-3 und VS 512 positioniert. Statt der Nennfrequenz von 258 Hz werden (wiederum) um 5 Hz bis 7 Hz niedrigere Werte erhalten:

Frequenz Oszilloskop	251,16 Hz
Frequenz Audacity	255 Hz

Diskussion

Zu Beginn wurde ein kleiner Holzhammer verwendet, um die Stimmgabel anzuregen. Allerdings sind mit dem Hammer, der mit Wolle überzogen ist und sich in der großen Kassette befand, die Schwingungen viel reiner geworden.

Weiters war es wichtig, die Stimmgabel mit dem Hammer sachte anzuschlagen, da andernfalls die Schwingungen nicht schön zu erkennen waren.

Eine weitere Erkenntnis des Experiments war, dass es nicht nur auf die Masse des Gewichtes ankommt, sondern auch auf die Position des Gewichtes. Die Gewichte sollten an den Zinken jeweils an der gleichen Position justiert sein.

Zum besseren Überblick sind die Ergebnisse nochmal in folgenden Tabellen aufgelistet. Die Werte sind in der Einheit Hz angegeben.

Tabelle 6: Größte Stimmgabel

	Ohne End-schrauben	Mit End-schrauben	64 VS 32 Hz	VS 80 40 Hz	VS 85 42,5 Hz	VS 96 48 Hz
Oszilloskop	53,19	49,72	31,914	40,208	42,66	48,174
Audacity	/	50		41	43	49

Tabelle 7: Kleinste Stimmgabel

	Mit End-schrauben	VS 460 und VS 464 232 Hz	VS 460 und VS 460 230 Hz	VS 512 256 Hz
Oszilloskop	260,48	248,64	222,66	251,16
Audacity	263	252	224	255

Aus der Tabelle 6 erkennt man, dass die Ergebnisse mit dem Oszilloskop und dem Audacity immer gut mit den nominellen Werten auf ca. $\pm 0,5$ Hz bis 1 Hz übereinstimmen. Für die kleinste Stimmgabel ist in Tabelle 7 zu erkennen, dass die gemessenen Werte nicht genau der Hälfte der angegebenen Werte entsprechen, da die abgestimmten Massen fehlen. Auch das Vibrieren des Stativs könnte zu Abweichungen führen. Die Diskrepanzen zwischen den

Messungen mit Oszilloskop und Audacity sind für die kleinste Stimmgabel etwas größer (2 Hz bis 4 Hz).

4.3 Schwebungen

Mit einigen in Abbildung 27 zu sehenden Stimmgabeln werden Schwebungen erzeugt. Eine Auflistung zu diesen Stimmgabeln befindet sich im Kapitel Bestandsaufnahme.



Abbildung 27: Sammlung der Stimmgabeln mit Zinnfuß

In Tabelle 8 sind die verwendeten Stimmgabeln und deren Frequenzen aufgelistet:

Tabelle 8: Für Schwebungen verwendete Stimmgabeln und deren nominelle Frequenzen

Schwebungs- Experiment Nr.	Nr. SG 1	Nr. SG 2	Frequenz SG 1 (in Hz)	Frequenz SG 2 (in Hz)	Differenz (in Hz)
1	64	65	508	512	4
2	63	65	504	512	8
3	61	65	496	512	16
4	61	64	496	508	12
5	57	64	480	508	28

Zunächst werden die Eigenfrequenzen der Stimmgabeln mithilfe von Audacity überprüft. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 9. Unter Berücksichtigung des Fehlers von Audacity (± 1 Hz) stimmen gemessene und angegebene Frequenz überein.

Tabelle 9: Eigenfrequenzen der verwendeten Stimmgabeln

Stimmgabel	Angegebener Wert der Frequenz (in Hz)	Gemessener Wert der Frequenz (in Hz)
Nr. 57	480	480
Nr. 61	495	496
Nr. 63	504	504
Nr. 64	508	508
Nr. 65	512	512

Für die Schwebungsmessung werden je zwei Stimmgabeln auf einer mit Gummi belegten höhenverstellbaren Bühne nebeneinander positioniert. Die beiden Mikrofone werden so eingestellt, dass gute Aufnahmen möglich sind. In Abbildung 28 ist der Versuchsaufbau zu sehen.

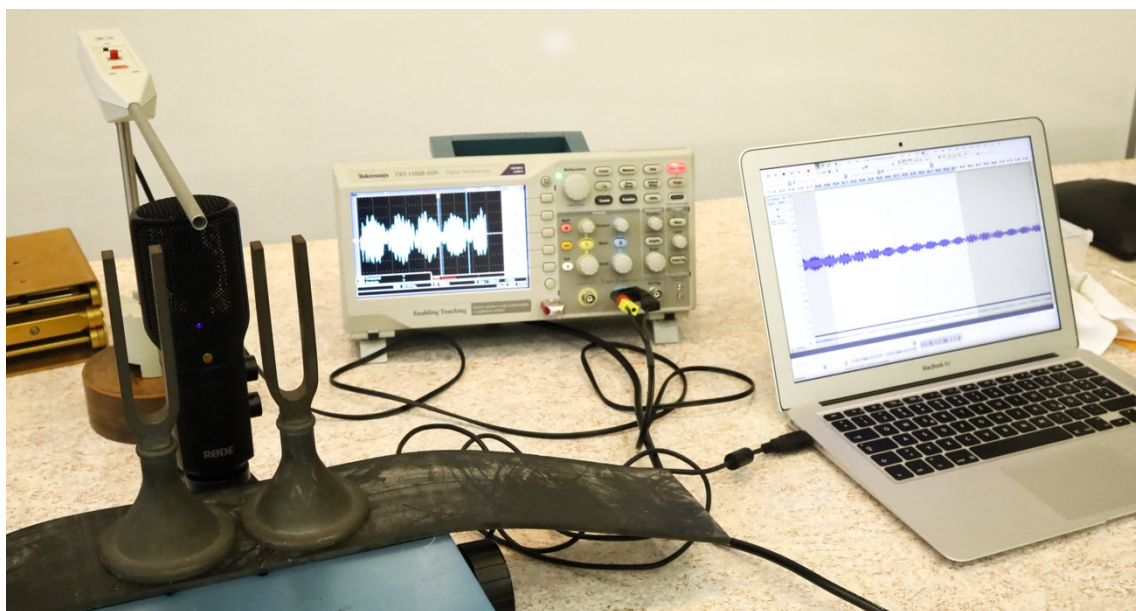


Abbildung 28: Versuchsaufbau für Messung von Schwebungen

1. Schwebung:

Zur Erzeugung der ersten Schwebung werden die Stimmgabeln Nr. 64 und Nr. 65 verwendet, die eine Frequenz von **508 Hz** bzw. **512 Hz** aufweisen. Damit kann die Schwebungsfrequenz mit folgender Formel ermittelt werden (vgl. Kapitel 3.2):

$$f_s = |f_1 - f_2| = |508 \text{ Hz} - 512 \text{ Hz}| = 4 \text{ Hz}$$

Abbildung 29 zeigt den zeitlichen Verlauf der gesamten Schwebung.



Abbildung 29: Audacity: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 64 und Nr. 65

Die Länge der Aufnahme beträgt 2,345 s und beinhaltet 14 Schwebungsperioden. Damit gilt für die Schwebungsdauer T_s und die Schwebungsfrequenz:

$$14 \cdot T_s = 2,345$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{0,1675 \text{ s}} = 5,970 \text{ Hz} \approx 6 \text{ Hz}$$

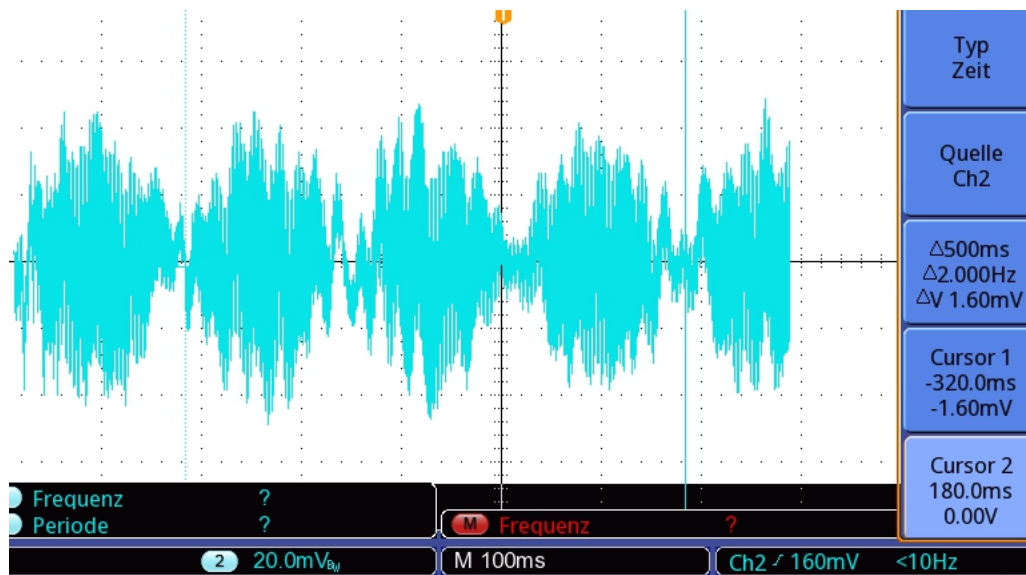


Abbildung 30: Oszilloskopbild: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 64 und Nr.65

Aus dem Oszilloskopbild (Abbildung 30) errechnet sich die Schwebungsfrequenz aus den drei gekennzeichneten Perioden:

$$f_s = 3 \cdot 2 \text{ Hz} = 6 \text{ Hz}$$

Mehrfache Wiederholungen bestätigten Schwebungsfrequenz von 6 Hz. Andererseits wurde festgestellt das die Frequenz der Stimmgabeln 61, 64 und 65 nur auf $\pm 2 \text{ Hz}$ reproduzierbar war.

2. Schwebung:

Zur Erzeugung der zweiten Schwebung werden die Stimmgabeln Nr. 63 und Nr. 65 verwendet, die die Einprägung 504 Hz bzw. 512 Hz aufweisen. Abbildung 31 zeigt den zeitlichen Verlauf der gesamten Schwebung.

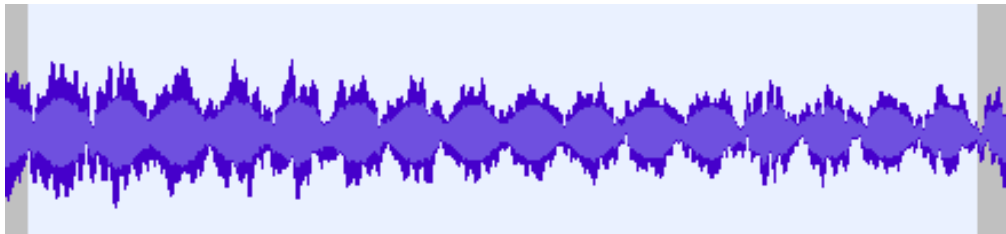


Abbildung 31: Audacity: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 63 und Nr. 65

Die Länge der Aufnahme beträgt 1,608 s. Damit ergibt sich (statt der erwarteten 8 Hz):

$$16 \cdot T_s = 1,608$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{0,1005s} = 9,95 \text{ Hz} \approx 10 \text{ Hz}$$

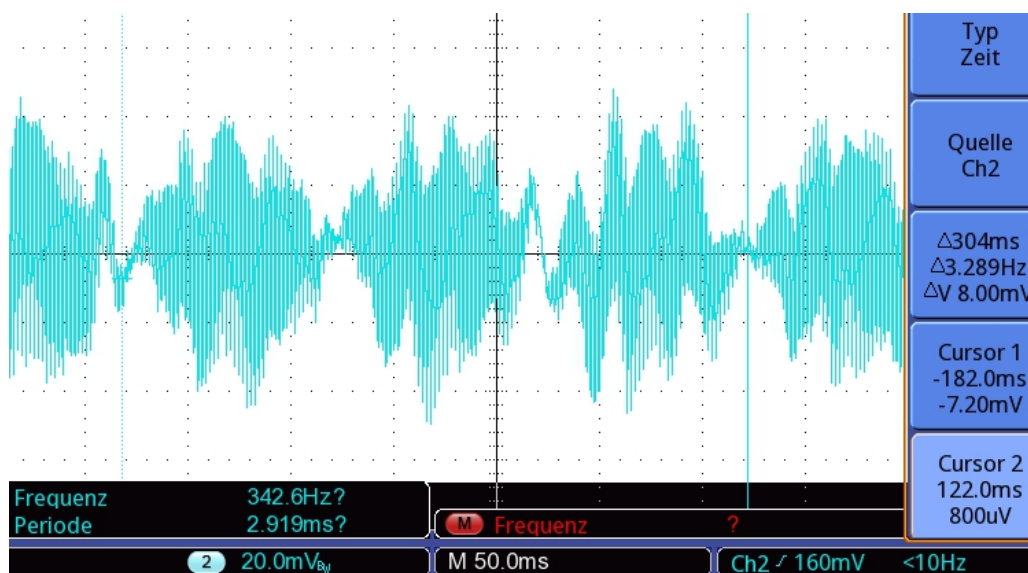


Abbildung 32: Oszilloskopbild: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 63 und Nr.65

Aus dem Oszilloskopbild (Abbildung 32) errechnet sich die Schwebungsfrequenz aus den drei gekennzeichneten Perioden:

$$f_s = 3 \cdot 3,289 \text{ Hz} = 9,867 \text{ Hz} \approx 10 \text{ Hz}$$

Die Ergebnisse dieser zwei gezeigten Schwebungsmessungen und von den drei weiteren Schwebungsmessungen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Messeregebnisse der 3., 4. und 5. Schwebung

Schweb.	Nr. SG1	Nr. SG2	Frequenz SG1 (Hz)	Frequenz SG2 (Hz)	f_s (Hz) Theor.	f_s (Hz) Audacity	f_s (Hz) Oszil.
1	64	65	508	512	4	6	6
2	63	65	504	512	8	10	10
3	61	65	496	512	16	~18 (aus 10 T_s)	~18
4	61	64	496	508	12	~12 (aus 30 T_s .)	~12
5	57	64	480	508	28	~28 (aus 28 T_s)	/

Diskussion

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Messungen mit Audacity und Oszilloskop gleiche Schwebungsfrequenzen ergeben (die 5. Schwebung wurde nicht mit dem Oszilloskop aufgenommen). Bei den Ergebnissen der ersten drei Schwebungen ist ein Unterschied von jeweils 2 Hz zwischen gemessenen und theoretischen Werten der Schwebungsfrequenz zu erkennen. Wie vorhin bemerkt, sind die Frequenzen der Stimmgabeln 61, 64 und 65 nur auf ± 2 Hz reproduzierbar (Vergleiche auch Messfehler in Kapitel 4.1), was die Diskrepanz zwischen berechneter und gemessener Schwebungsfrequenz erklärt. Diese Stimmgabeln reagieren empfindlich auf die genaue Position des Anschlags. Bei der vierten und fünften Schwebung stimmen die berechneten Werte mit den theoretischen exakt überein. Das könnte daran liegen, dass hier wegen der

größeren Schwebungsfrequenz über eine deutlich größere Anzahl von Schwebungsperioden gemittelt wurde.

Um schöne Schwebungen zu erhalten, ist es besonders wichtig, die Stimmgabeln gut zu positionieren, sie müssen daher auf einem stabilen Untergrund platziert sein und dürfen nicht locker in den Fuß gedreht sein. Das Anschlagen muss exakt in Schwingungsrichtung erfolgen und darf keinesfalls schräg zu dieser Richtung sein.

4.4 Untersuchung der Stimmgabeln V4, V11, V14, V21

Folgende Stimmgabeln (Abbildung 33) werden mit einem Holzhammer angeschlagen. Die Schwingungen werden mit dem Oszilloskop aufgenommen und daraus die Frequenz ermittelt. Wie Tabelle 11 zeigt, stimmt die Nennfrequenz mit den gemessenen Frequenzen auf ± 1 Hz überein.

Tabelle 11: Untersuchen der Stimmgabeln V4, V11, V14 und V21

Stimmgabel	Bezeichnung	Nennfrequenz	Oszi. autom.	Oszi. Cursor
V4	FA3	682,6 VS = 341,3 Hz	340,1 Hz	/
V11	MI4	1280 VS = 640 Hz	640,3 Hz	641,1 Hz
V14	UT5	2048 VS = 1024 Hz	1026 Hz	1025,6 Hz
V21	/	517,304 VS = 258,652 Hz	257 Hz	259 Hz



Abbildung 33: Stimmgabeln V4, V11, V14 und V21

4.5 Elektromagnetisch angeregte Stimmgabeln der HTL 16

Aus der „Sammlung Physikalischer Geräte der HTL Ottakring“ befinden sich drei Stück elektromagnetisch erregbare Stimmgabeln als Dauerleihgabe in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien. Diese werden im Folgenden analysiert.

In Abbildung 34 ist die Funktionsweise einer elektromagnetischen Stimmgabel zu sehen.

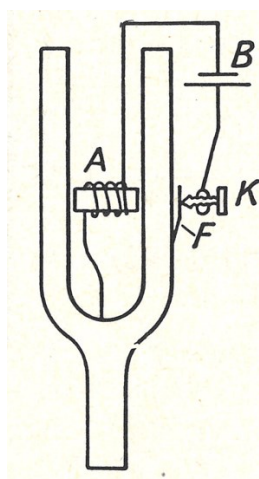


Abbildung 34: Elektromagnetisch angeregte Stimmgabel (Gobrecht, 1974, S. 519)

Ein Elektromagnet (A), der aus einer Spule mit Eisenkern besteht, befindet sich zwischen den Zinken der Stimmgabel. Die Spannungsquelle (B) führt den Strom über die Kontaktschraube (K) zu der Feder (F), die auf einer Stimmgabelzinke befestigt ist. Sobald ein Strom fließt, zieht der Elektromagnet die beiden Zinken an. In diesem Moment wird der Kontakt geöffnet, der Stromkreis unterbrochen und die Zinken schwingen mit ihrer Eigenfrequenz wieder zurück. Der Stromkreis wird wieder geschlossen und der Kreislauf beginnt von vorne. Somit kann die Stimmgabel beliebig lange angeregt werden, ohne zu verstummen (vgl. Gobrecht, 1974, S. 519).

Elektromagnetisch erregbare Stimmgabel 19/1027 mit 750 Hz

Die in Abbildung 35 dargestellte elektromagnetische Stimmgabel hat laut Bezeichnung eine Frequenz von 750 Hz. Am unteren Ende der Stimmgabel steht 750 V.D, was „Vibration double“ (vgl. Pantalony, 2009, S. xii) bedeutet und somit der Einheit Frequenz entspricht. Die Maße des Stimmgabelapparats betragen 18 x 25 x 9 cm.



Abbildung 35: Elektromagnetische Stimmgabel 19/1027 mit 750 Hz

In Abbildung 35 ist der Aufbau der elektromagnetischen Stimmgabel zu sehen: Die Stimmgabel ist auf einem Holzstück befestigt. Zwischen den Zinken der

Stimmgabel befindet sich eine Spule, die einen Spulenwiderstand von $(3,1 \pm 0,3) \Omega$ aufweist. Links und rechts an den Zinkenenden der Stimmgabel ist jeweils ein stabiler Kontaktdraht montiert, der zunächst die benachbarte Rändelschraube nicht berührt. Um die Stimmgabel elektromagnetisch anzuregen, wird als Netzgerät ein Gleichstrom-Konstantgerät (2A-Bereich reicht, da nur ca. 0,5A benötigt werden) verwendet, wodurch kein weiterer Vorwiderstand benötigt wird.

In Abbildung 36 ist der reale Versuchsaufbau dargestellt. Abbildung 37 zeigt die elektrische Schaltskizze (inklusive Vorwiderstand), wobei die Spule mit Eisenkern zwischen den Zinken der Stimmgabel zu denken ist.



Abbildung 36: Versuchsaufbau für Betrieb der Stimmgabel 19/1027

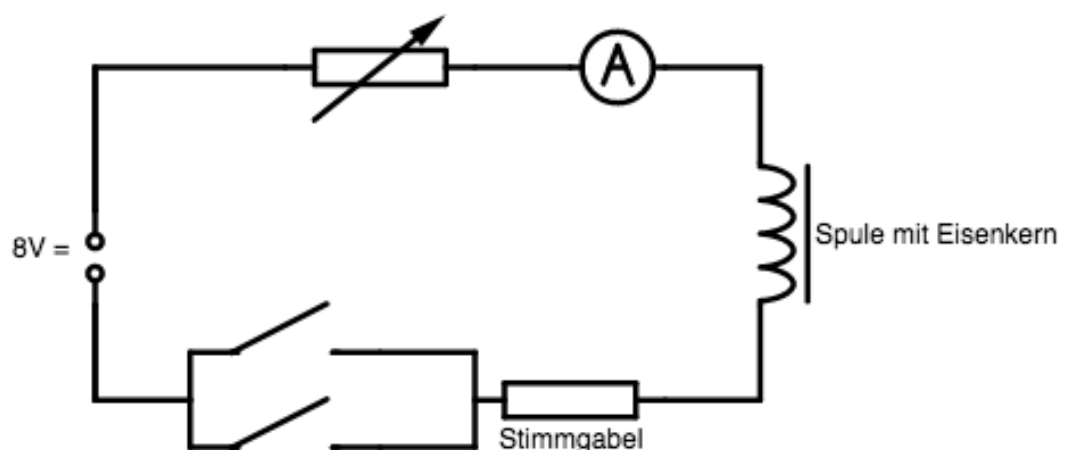


Abbildung 37: Elektrische Schaltskizze für die Stimmgabel 19/1027

Diese anregbare Stimmgabel wird mit einer Gleichspannung von ungefähr 8 V gestartet. Durch vorsichtiges Drehen der beiden Messingschrauben (siehe Abbildung 35), die sich neben den Zinken der Stimmgabel befinden, wird der elektrische Kontakt hergestellt und die Stimmgabel erklingt. Sobald die Stimmgabel schwingt, werden Aufzeichnungen mit Audacity und dem Oszilloskop gemacht. Die Cursor-Funktion des Oszilloskops ergibt (beim Ausklingen der Stimmgabel) eine Frequenz von $150,6 \text{ Hz} \cdot 5 = 753 \text{ Hz}$ (Abbildung 38).

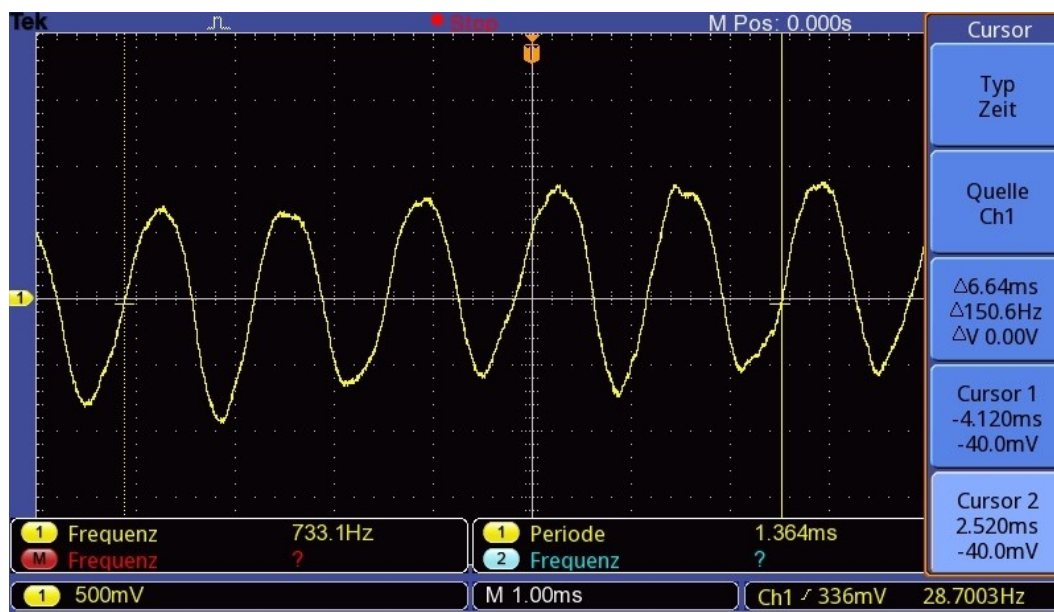


Abbildung 38: Oszilloskopbild: Unmittelbar nach Abschalten der elektromagnetischen Anregung der Stimmgabel mit 750 Hz.

In einem weiteren Versuch wird die Stimmgabel nicht elektromagnetisch angeregt, sondern mit einem kleinen Holzhammer angeschlagen. Abbildung 39 zeigt dessen Auswertung, bei der eine Frequenz von $148,8 \text{ Hz} \cdot 5 = 744 \text{ Hz}$ ermittelt wurde. Der Mittelwert der beiden Oszilloskopmessungen (753 Hz, 744 Hz) ergibt gerundet 749 Hz. Die Schwankung der Frequenzmessung ist offensichtlich auf das etwas ungleichmäßige Signal (siehe Abbildung 38) zurückzuführen bzw. liegt generell im Fehlerbereich der Cursorauswertung.

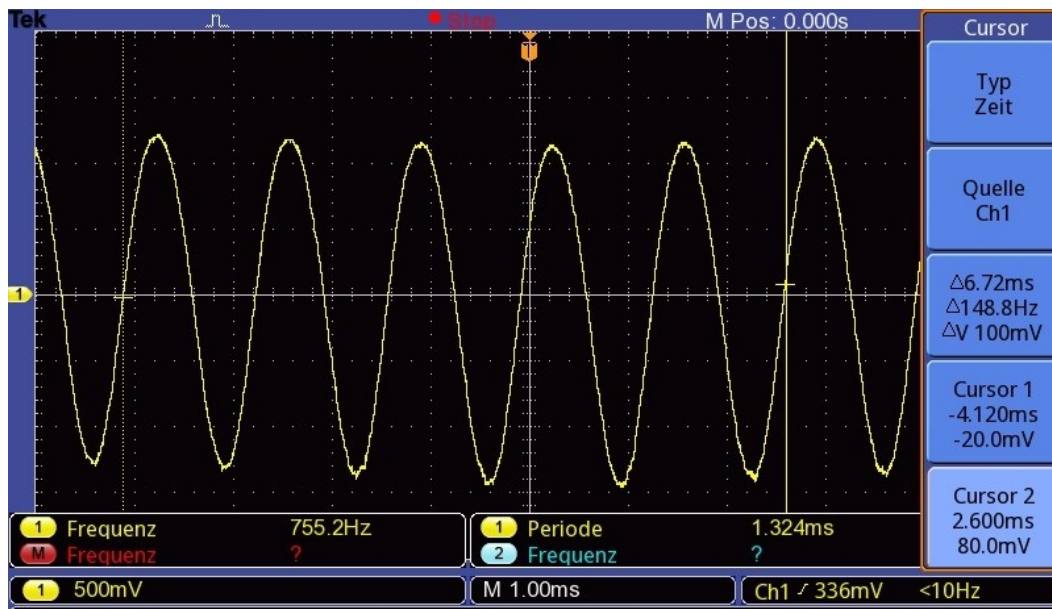


Abbildung 39: Oszilloskopbild: Anregung durch Holzhammer der Stimmgabel mit 750 Hz

Die Aufnahme der angeregten Stimmgabel mit Audacity macht viele weitere Frequenzen sichtbar, liefert aber auch einen Wert von 751 Hz (Abbildung 40), der sehr gut mit dem angegebenen Wert von 750 Hz und den Auswertungen des Oszilloskops übereinstimmt.

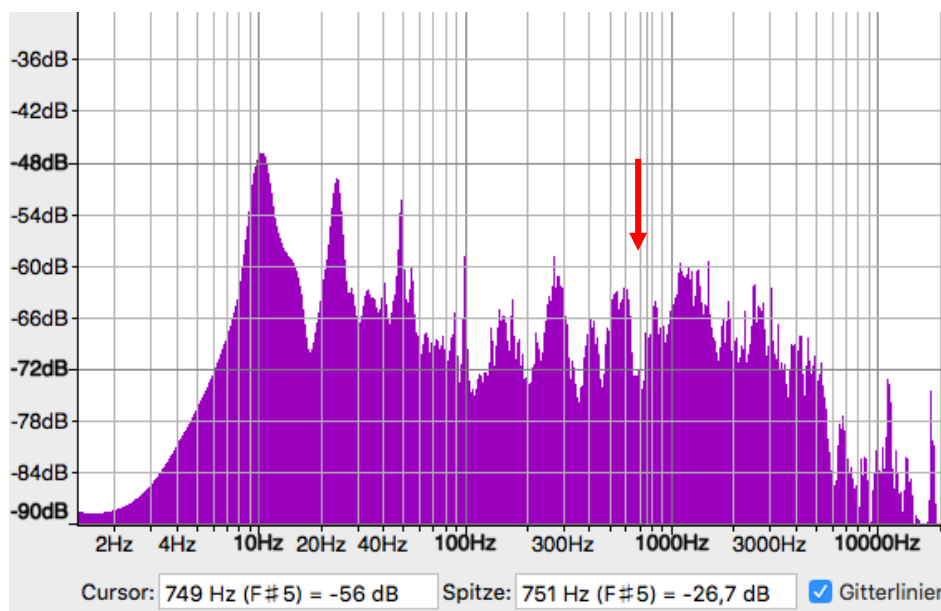


Abbildung 40: Frequenzspektrum: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel mit 750 Hz

Elektromagnetisch erregbare Stimmgabel 19/1027 mit 500 Hz

Die in Abbildung 41 dargestellte elektromagnetische Stimmgabel ist mit 500 V.D. bezeichnet, was einer Frequenz von 500 Hz entspricht. Die Maße des Stimmgabelapparats betragen 18 x 25 x 9 cm.

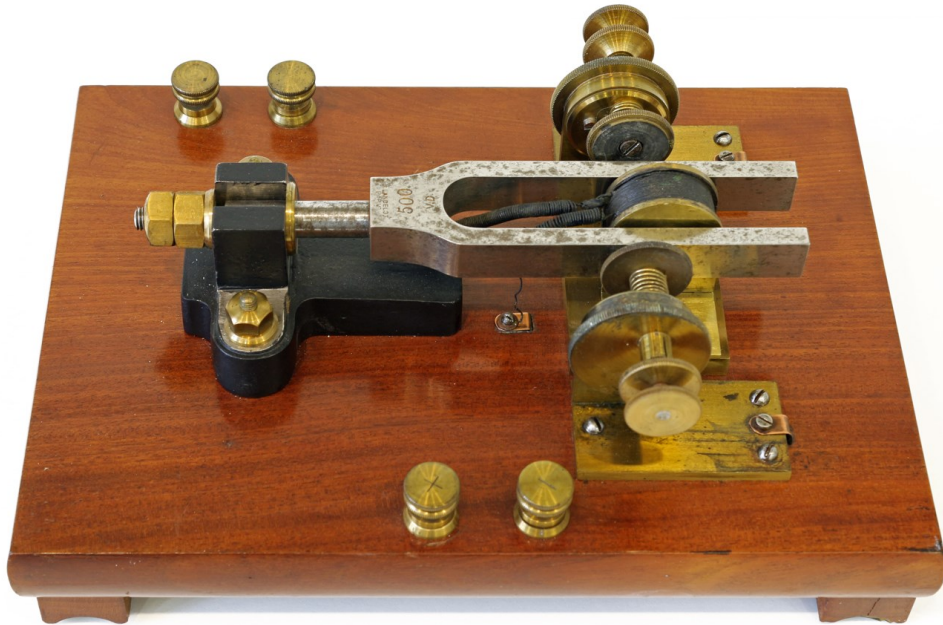


Abbildung 41: Elektromagnetische Stimmgabel 19/2027 mit 500 Hz

Der Aufbau und die Durchführung des Experiments ist derselbe wie im vorigen Versuch (Abbildung 42).



Abbildung 42: Versuchsaufbau

Die Stimmgabel wird elektromagnetisch angeregt. Aus der Auswertung des Oszilloskops beim Ausklingen der Stimmgabel (Abbildung 43) kann ein Wert für die Frequenz von $50 \text{ Hz} \cdot 10 = 500 \text{ Hz}$ entnommen werden. Die automatische Anzeige des Oszilloskops zeigt 497,5 Hz an (Abbildung 43), wobei "?" bedeutet, dass der angezeigte Wert nicht verlässlich ist. Hiermit ergibt die Cursor-

Auswertung des Oszilloskop-Bildes, dass die Bezeichnung der Stimmgabel mit 500 Hz korrekt ist.

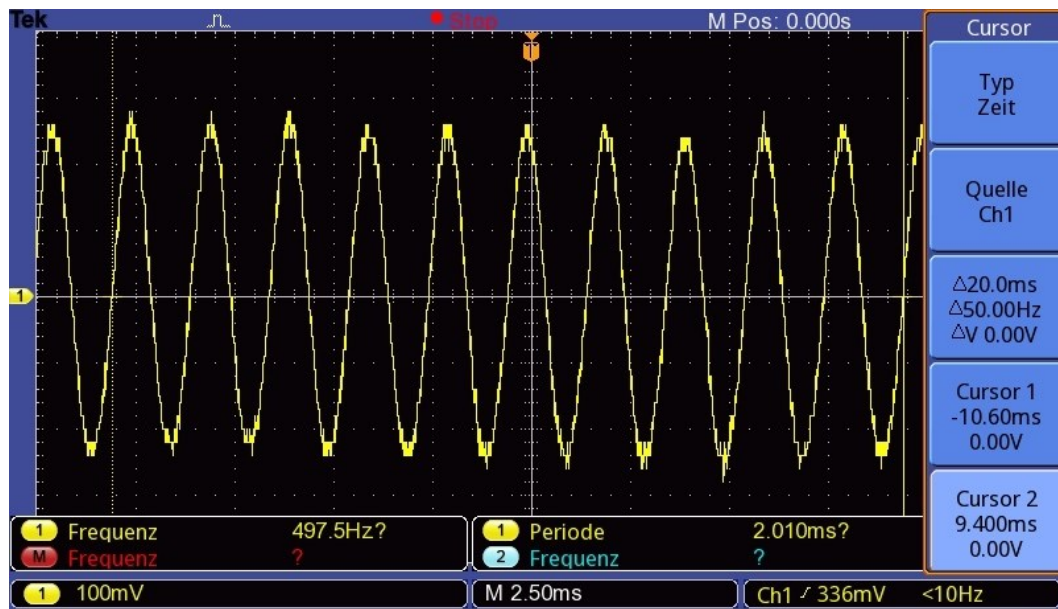


Abbildung 43: Oszilloskopbild: Unmittelbar nach Abschalten der elektromagnetischen Anregung der Stimmgabel mit 500 Hz.

Elektromagnetisch erregbare Stimmgabel 19/1028 mit 750 Hz

Die in Abbildung 44 dargestellte elektromagnetische Stimmgabel ist mit 750 V. D. bezeichnet, was einer Frequenz von 750 Hz entspricht. Die Maße des Stimmgabelapparats betragen 18 x 25 x 9 cm (Länge x Höhe x Breite).



Abbildung 44: Elektromagnetische Stimmgabel 19/1028 mit 750 Hz

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 45 zu sehen.

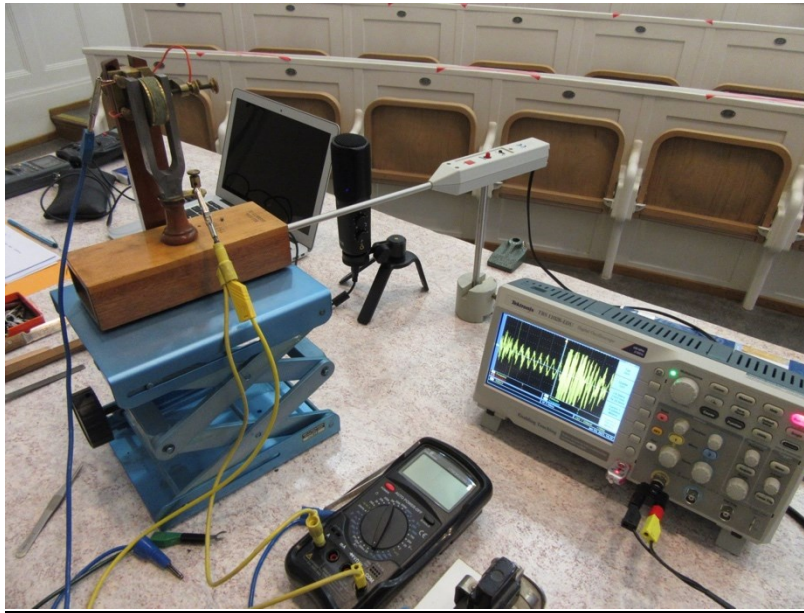


Abbildung 45: Versuchsaufbau für Stimmgabel 19/1028

Der Aufbau dieses Stimmgabelapparats unterscheidet sich zu den beiden bereits untersuchten Apparaten in der Position der Stimmgabel: Die Stimmgabel ist stehend auf einem halboffenen Resonanzkörper befestigt. Wie in Abbildung 44 zu erkennen, befinden sich die Kontakte am unteren Ende der Stimmgabel und an dem Spulenteil. Das Messingteil, an dem die Spule befestigt ist, ist bei der hölzernen Befestigung angebracht. Es wäre hier also auch möglich, die Spule gegen eine andere zu tauschen. Die Spule weist einen Widerstand von $(1,5 \pm 0,3)\Omega$ auf.

Um die Kontakte mit Kabeln zu verbinden, wurden zwei kurze Stücke Kupferdraht (mit 1,3 mm Durchmesser) verwendet und dieser mit Krokoklemmen verbunden (siehe Abbildung 46), da die normalen Bananenstecker nicht in den Kontakt passen. Der Stimmgabelapparat wird auf eine Erhöhung gestellt, damit die Mikrofone dementsprechend positioniert werden können. Zur Anregung der Stimmgabel wird Wechselstrom verwendet. Da diese Stimmgabel bei elektromagnetischer Anregung sehr viele Störfrequenzen zeigt, wird sie zur Frequenzüberprüfung nur mit dem Holzhammer angeschlagen.

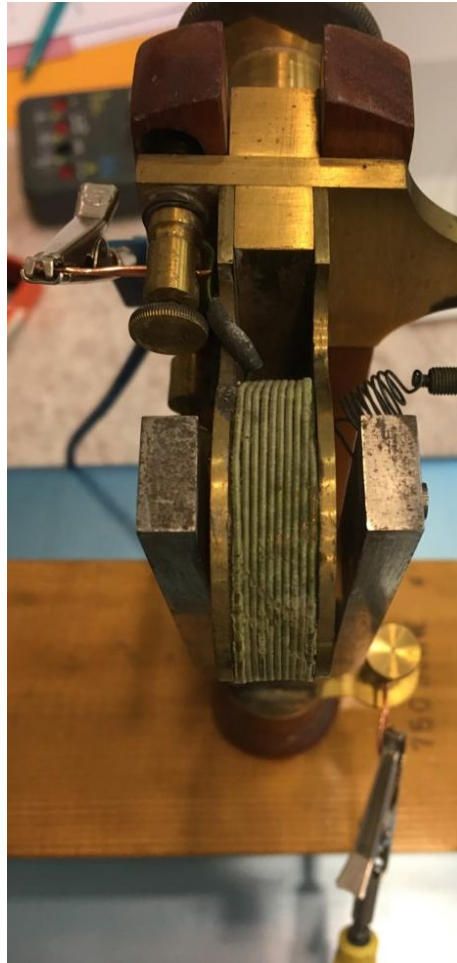


Abbildung 46: Stimmgabel 10/1028 wird mit Draht und Krokodilklemmen kontaktiert

Das Oszilloskop liefert eine automatische Frequenz von 751,8 Hz. Mit dem Cursor kann eine Frequenz von $50,25 \text{ Hz} \cdot 15 = 753,75 \text{ Hz}$ festgestellt werden. Die Werte stimmen gut mit dem angegebenen Wert von 750 Hz überein.

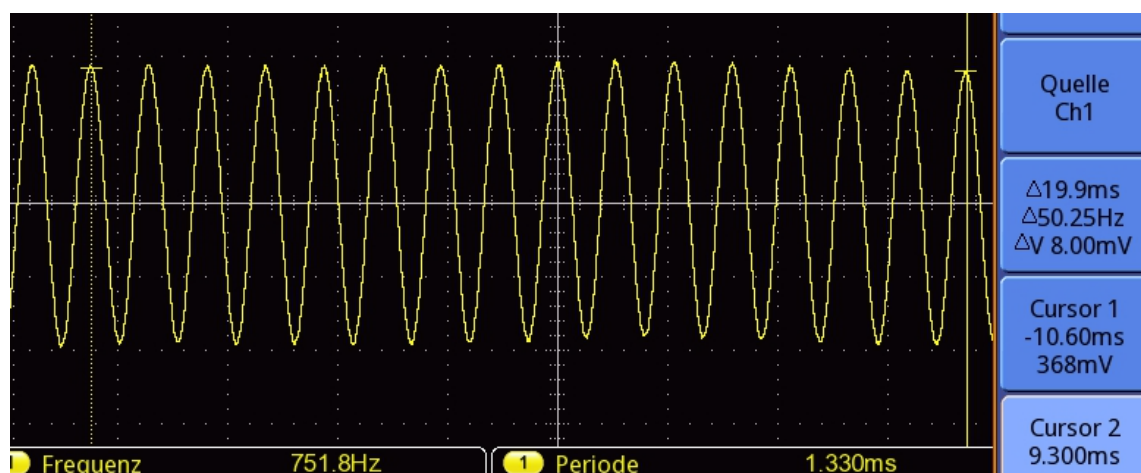


Abbildung 47: Oszilloskopbild: Stimmgabel mit 750 Hz angeregt mit Holzhammer

Diskussion

Alle drei Stimmgabelapparate der HTL 16 funktionieren einwandfrei. Die an den Stimmgabeln angegebenen Frequenzen stimmen im Rahmen der Messfehler mit den gemessenen Frequenzen überein. Zum elektromagnetischen Anregen von Stimmgabeln kann üblicherweise entweder Gleichstrom oder Wechselstrom verwendet werden. Anders ist dies beim Stimmgabelunterbrecher, wo die Anregung nur mit Wechselstrom funktioniert (siehe Kapitel 4.9). Grundsätzlich führt die elektromagnetische Anregung der Stimmgabeln zu starken Begleitgeräuschen (vgl. Abbildung 54), sodass die Frequenzmessungen mit dem Oszilloskop beim Ausklingen der Stimmgabeln durchgeführt wurden.

4.6 Erzeugung von Lissajous-Figuren mit verspiegelten Stimmgabeln

Im Folgenden werden Experimente mit Stimmgabeln gemacht, die jeweils an einem Zinkenende einen kleinen runden Spiegel haben. Diese Stimmgabeln befinden sich in der Holzkassette V 72, die in Abbildung 48 zu sehen ist.



Abbildung 48: Holzkassette mit „verspiegelten“ Stimmgabeln

Es gibt zwei längere und zwei kürzere Stimmgabeln. Die gerundeten Frequenzen der insgesamt vier Stimmgabeln sind in Tabelle 12 übersichtlich dargestellt:

Tabelle 12: Auflistung der verspiegelten Stimmgabeln.

Bezeichnung	V 72/1	V 72/2	V 72/3	V 72/4
Frequenz	74 Hz	74 Hz	109 Hz	149 Hz

Im Weiteren werden diese Stimmgabeln verspiegelte Stimmgabeln genannt, da sie jeweils am Ende einer Zinke mit einem kleinen runden Spiegel versehen sind. Die zweite Zinke trägt zum Masseausgleich jeweils eine Messingscheibe gleicher Größe (siehe Abbildung 49).

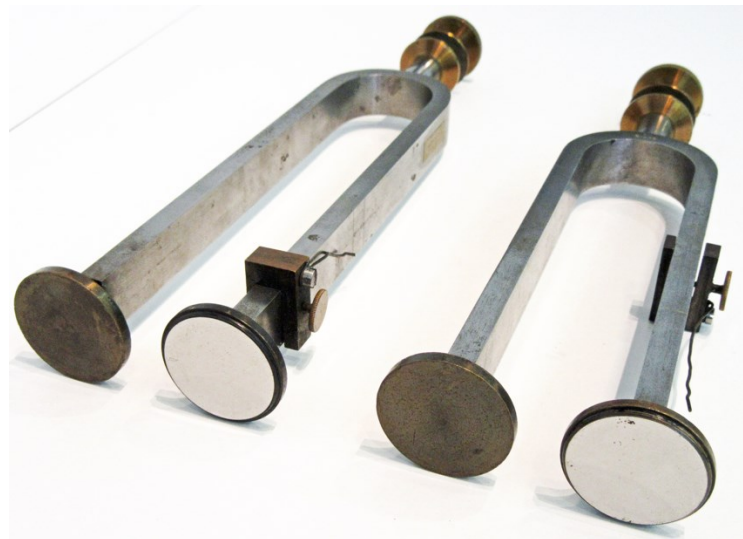


Abbildung 49: Verspiegelte Stimmgabeln V 72/3 und V 72/4 (von links nach rechts)

Die Stimmgabeln werden jeweils an zwei Stativen, die eine Höhe von 62 cm aufweisen, justiert (Abbildung 50).

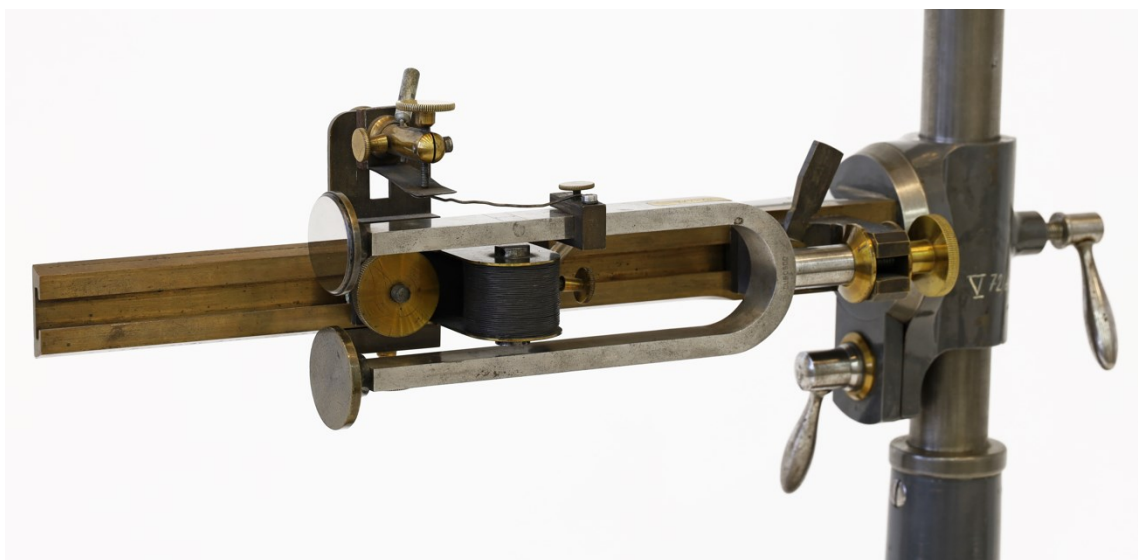


Abbildung 50: Stimmgabel V72/4 auf Stativ befestigt

Vor dem Erzeugen der Lissajous-Figuren werden die Frequenzen der Stimmgabeln ermittelt. Dazu können sie entweder mechanisch, durch Anschlagen mit einem Holzhammer, oder elektromagnetisch angeregt werden. Wie in Abbildung 50 zu erkennen ist, befindet sich zwischen den Zinken der Stimmgabel eine Spule mit Eisenkern, die als Elektromagnet dient. Fließt Strom durch die Spule, wird der Eisenkern magnetisch und zieht die Stimmgabelzinken zu sich. Dabei entfernt sich der dünne Draht vom federnden Plättchen und der Stromfluss wird unterbrochen. Die Stimmgabel schwingt mit ihrer Frequenz zurück und schließt über den Kontaktdraht und das federnde Plättchen den Stromkreis wieder, sodass sie wieder vom Elektromagneten angezogen wird. Grundsätzlich wird in Serie zur Spule ein Vorwiderstand geschaltet. Er dient dazu, die Spannung und somit den Strom durch die Spule zu vergrößern bzw. zu verringern. Der Elektromagnet kann mit Wechsel- oder Gleichspannung betrieben werden.

In Abbildung 51 ist der Aufbau des Experiments dargestellt.

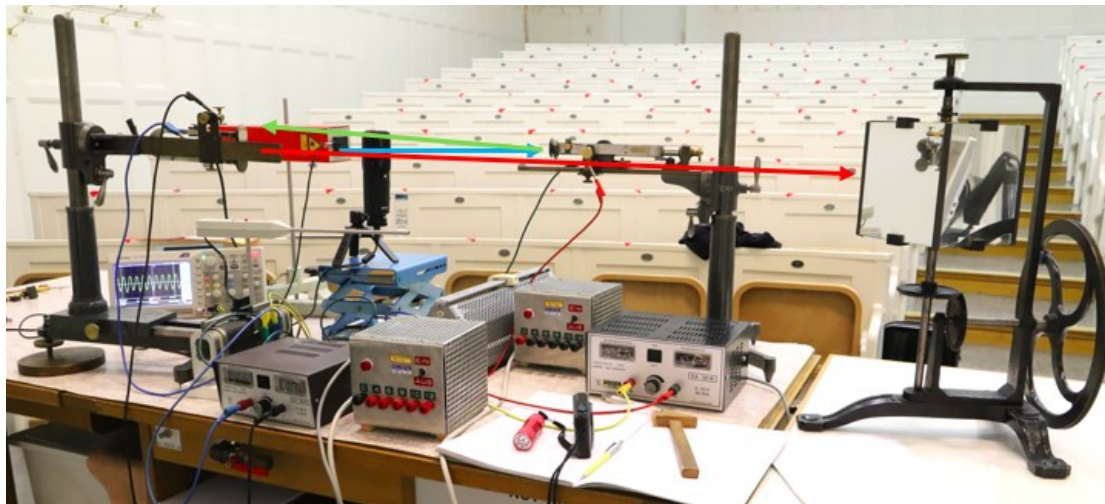


Abbildung 51: Versuchsaufbau für die Erzeugung von Lissajous-Figuren

Die Stimmgabel auf dem linken Stativ (Abbildung 51) ist für vertikale Schwingung justiert, die Stimmgabel am rechten Stativ für horizontale Schwingung befestigt. Der He-Ne-Laser hinter dem linken Stativ, ist ebenfalls auf einem Stativ befestigt, dass höhenverstellbar ist. Der Laserstrahl wird auf die verspiegelte Fläche der rechten Stimmgabel gerichtet (Abbildung 51, blauer Pfeil). Von dort aus wird der Laserstrahl in Richtung der linken Stimmgabel reflektiert (Abbildung 51, grüner

Pfeil). Von dieser Stimmgabel aus erreicht der Laserstrahl den drehbaren Spiegel (Abbildung 51, roter Pfeil), der sich ganz rechts befindet und eine Höhe von 55 cm hat. Von dem Spiegel aus wird der Laserstrahl auf eine weiße Oberfläche, die Tafel, weitergeleitet. Inmitten des Aufbaus befinden sich auch die beiden Mikrofone für die Aufnahmen mit Audacity und dem Oszilloskop.

In Abbildung 52 ist der Versuchsaufbau mit einer Schaltskizze dargestellt, die sowohl für die horizontal schwingende als auch die vertikal schwingende Stimmgabel gilt.

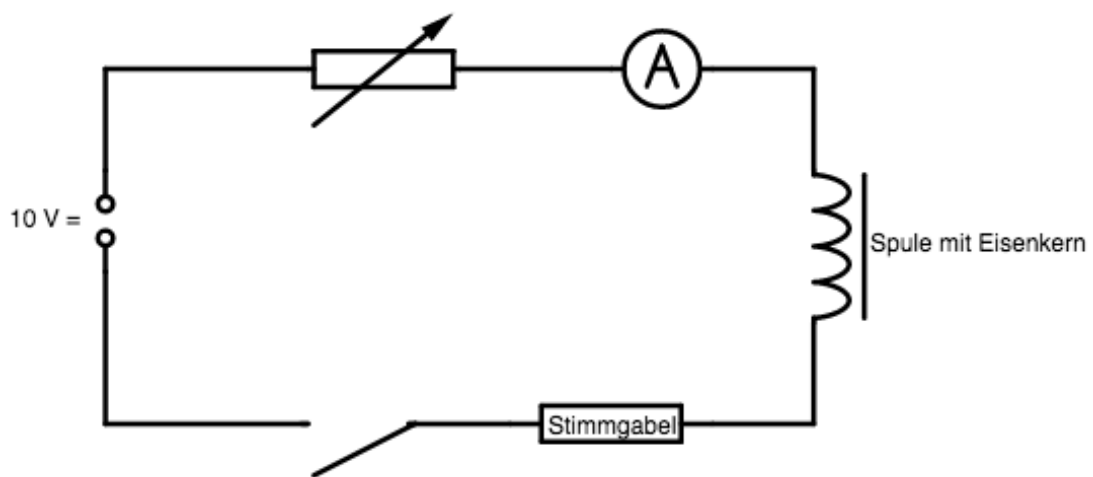


Abbildung 52: Schaltskizze zum Versuchsaufbau Lissajous-Figuren

Die folgenden fünf Abschnitte zeigen die Erzeugung von Lissajous-Figuren mit verschiedenen Kombinationen der verspiegelten Stimmgabeln. Zusätzlich wird noch versucht, die Frequenzen mit dem Anbringen von Massestücken zu verändern.

4.6.1 Lissajous-Figuren mit kurzem Paar

Die Stimmgabel V 72/3 wird zunächst mit einem Holzhammer zum Schwingen gebracht. Durch Ausmessen mit der Cursorfunktion des Oszilloskops ergibt sich gemäß Abbildung 53 eine Frequenz von $13,58 \text{ Hz} \cdot 8 = 108,64 \text{ Hz}$.

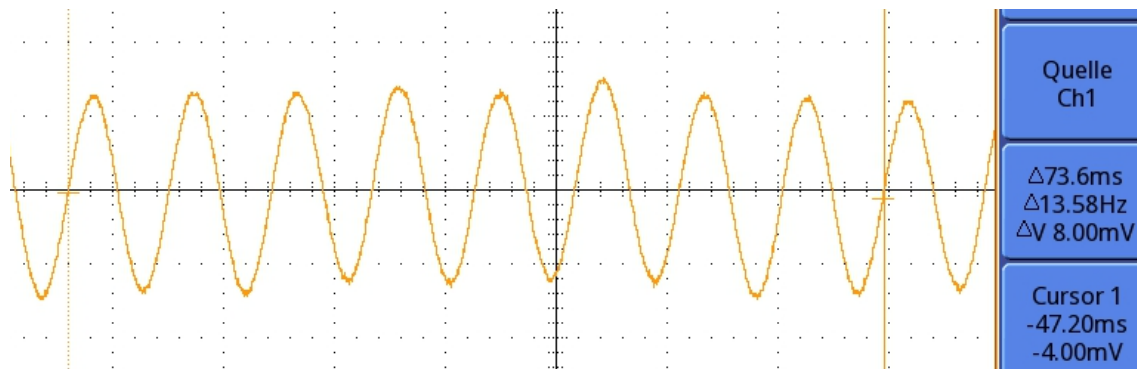


Abbildung 53: Oszilloskopbild: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 72/3

Die elektromagnetische Anregung der Stimmgabel mit einer Gleichspannung von ungefähr 15 V (mit justierbarem Vorwiderstand von ca. 10 Ω) ergibt laut Abbildung 54 eine Frequenz von $13,66 \text{ Hz} \cdot 8 = 109,28 \text{ Hz}$.

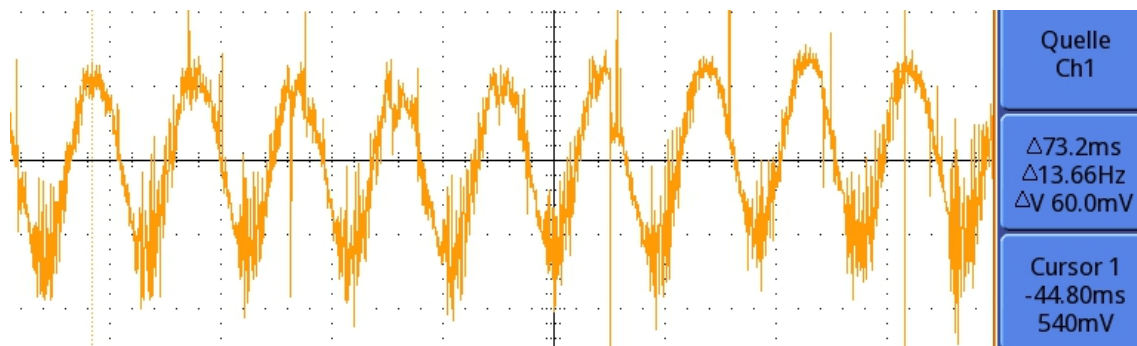


Abbildung 54: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 72/3

Der Spulenwiderstand dieser Stimmgabel beträgt $(3,5 \pm 0,3) \Omega$.

Nun wird die Frequenz der Stimmgabel V 72/4 überprüft. Sie wird zunächst mechanisch angeregt. Es ergibt sich eine Frequenz von $14,88 \text{ Hz} \cdot 10 = 148,8 \text{ Hz}$ (Abbildung 55).

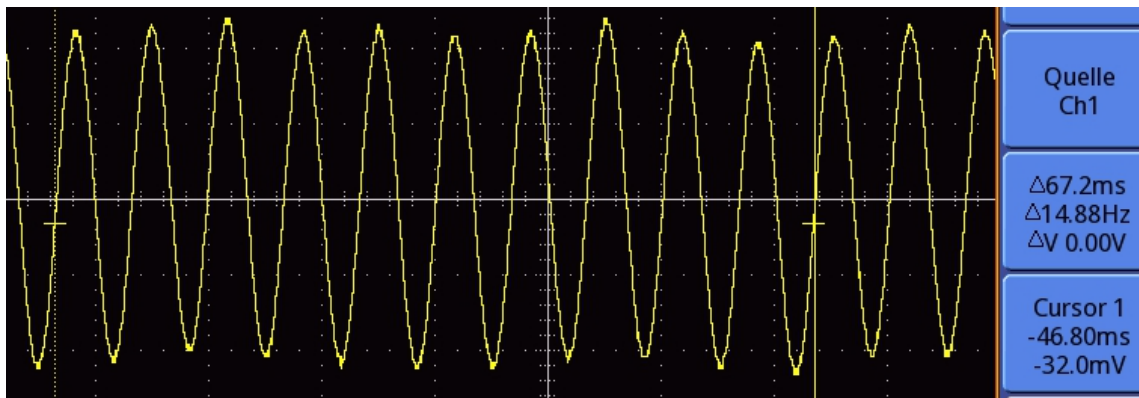


Abbildung 55: Oszilloskopbild: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 72/4

Wird die Stimmgabel elektromagnetisch angeregt, ergibt sich dieselbe Frequenz von 148,8 Hz (Abbildung 56).

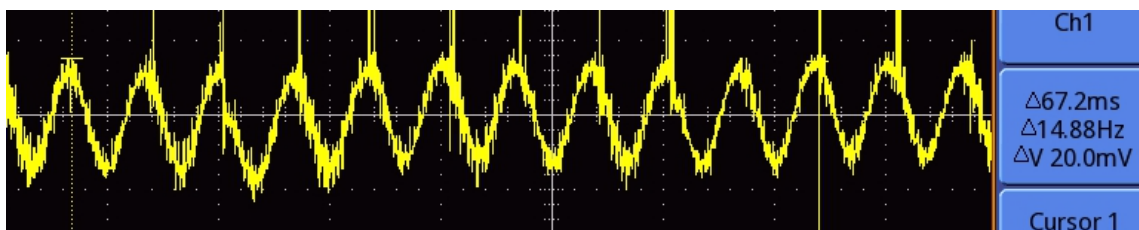


Abbildung 56: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 72/4

Die Spule weist einen Widerstand von $(3,9 \pm 0,3) \Omega$ auf. Es wird versucht, die Frequenz der Stimmgabel V 72/4 durch Anschrauben von Zusatzmassen abzusenken. Das Ergebnis ist in Abbildung 57 dargestellt.

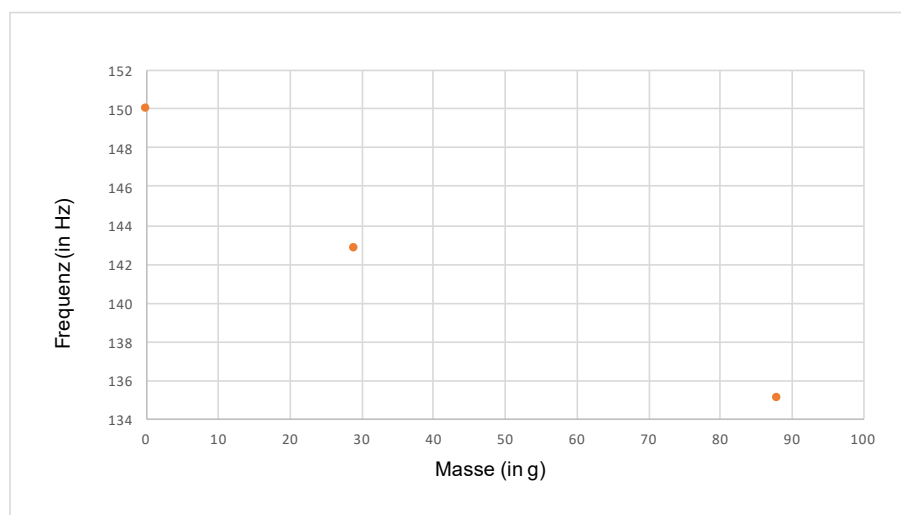


Abbildung 57: Stimmgabel 72/4: Frequenz in Abhängigkeit der Masse

Wie auf Seite 65 beschrieben (Abbildung 51), wird das Experiment mit zwei zueinander senkrecht schwingenden verspiegelten Stimmgabeln, die einen Laserstrahl reflektieren, ausgeführt. Nach dem Reflexionsgesetz wird der Laser so positioniert, dass der Laserstrahl auf die verspiegelten Stimmgabeln fällt und über einen weiteren (drehbaren) Spiegel auf die Tafel reflektiert wird. Schwingt nur eine Stimmgabel, ist entweder nur ein horizontaler oder vertikaler Strich zu sehen. Dreht man nun den Spiegel, so entsteht eine sich bewegende Sinuswelle (Abbildung 58).

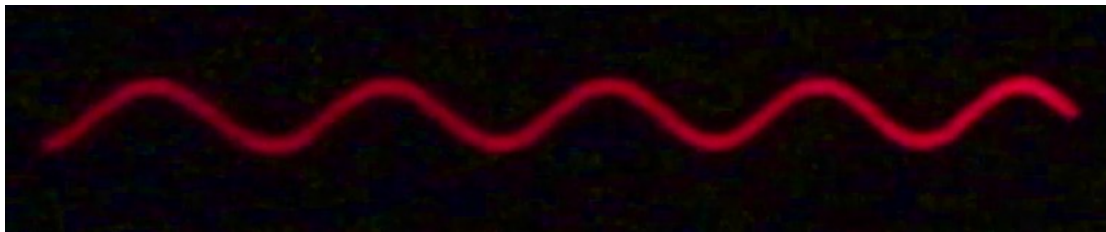


Abbildung 58: Sinuswelle

Die entstehenden Lissajous-Figuren der beiden Stimmgabeln V 72/3 und V 72/4 füllen mit der Zeit ein ganzes Quadrat aus (ähnlich wie Abbildung 62). Das lässt darauf schließen, dass das Frequenzverhältnis der beiden Stimmgabeln nicht rational, sondern irrational ist (vgl. Demtröder, 2018, S. 342). Durch Anbringen von kleinen Zusatzmassen (bis 88 g) kann die Frequenz der Stimmgabel V 72/4 von 150 Hz auf 134 Hz verringert werden. Der Versuch, die Frequenz der Stimmgabel noch weiter zu verringern, wurde abgebrochen, weil es dabei Probleme gab. Die Stimmgabel ließ sich nicht elektromagnetisch anregen. Die Spannung wurde um einige Volt erhöht, in der Hoffnung, dass dieser Vorgang die Stimmgabel zum Schwingen bringen würde. Aber bei zu hohem Strom besteht die Gefahr, dass die Spule durchbrennt. Der Kontaktdraht wurde immer mit einer Feile gereinigt und mit einer Zange zurechtgebogen. Bei dieser Stimmgabel ist die elektromagnetische Anregung mit einem auffallend lauten Geräusch verbunden.

4.6.2 Lissajousfiguren mit den Stimmgabeln V 72/3 und V 72/2

Die Stimmgabel V 72/4 wurde durch die Stimmgabel V 72/2, die sich ebenfalls in der Holzkassette befindet, ersetzt.

Die Stimmgabel V 72/2 wird mechanisch zum Schwingen gebracht und hat eine Frequenz von $14,79 \text{ Hz} \cdot 5 = 73,95 \text{ Hz}$ (siehe Abbildung 59):

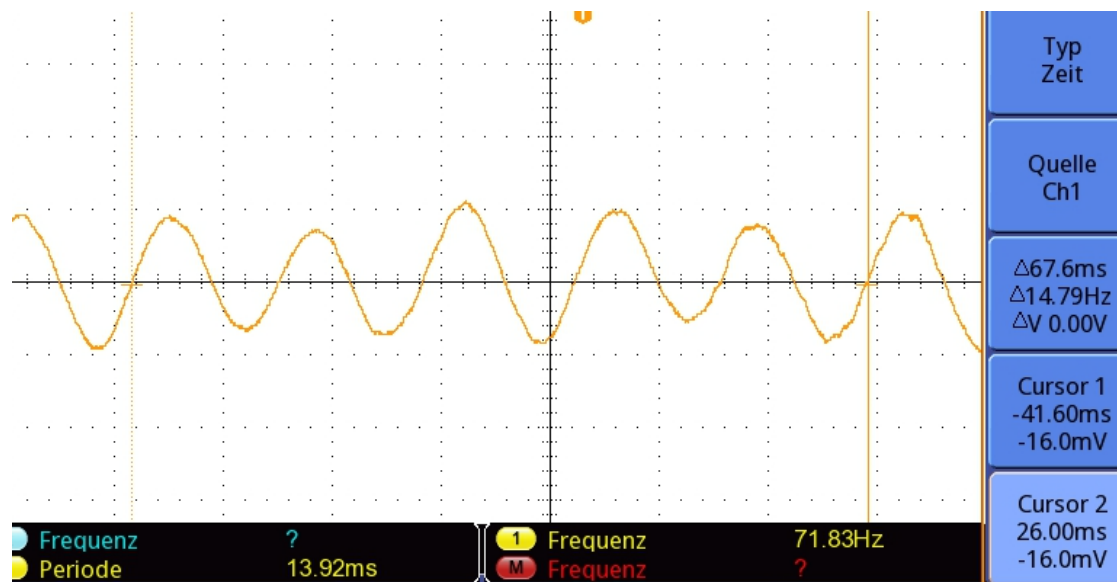


Abbildung 59: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V72/2

Abbildung 60 zeigt den Fall, dass eine der beiden Stimmgabeln horizontal schwingt. Der Laserpunkt wird für unser Auge zu einer Linie ausgedehnt. Analog dazu entsteht eine vertikale Linie, wenn nur die vertikal schwingende Stimmgabel in Betrieb ist. Die entstehenden Lissajous-Figuren bei gleichzeitiger Erregung der Stimmgabeln V 72/2 und V 72/3 zeigen die Abbildungen 61 bis 63. Ab Abbildung 63 wird ein grüner Laser verwendet, damit der Raum zum Fotografieren der Lissajous-Figuren nicht ganz dunkel sein muss. In Abbildung 63 sind die Amplituden von V 72/2 und V 72/3 nicht gleich, daher ergibt sich eine rechteckige und keine quadratische Figur. Wie weit das Quadrat oder Rechteck mit Linien ausgefüllt ist, hängt von der Belichtungszeit der Fotos ab. Die Lissajous-Figuren von Abbildung 61 bis 63 deuten auf ein irrationales Frequenzverhältnis hin. Nur nominell haben die Stimmgabeln 72/3 und 72/2 ein Frequenzverhältnis von $\frac{109}{74} = 1,47 \approx 1,5$.

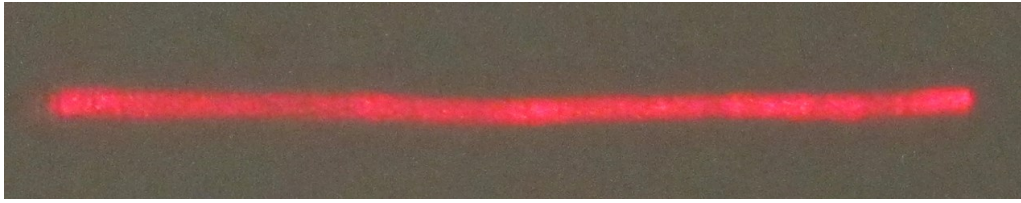


Abbildung 60: Horizontale Linie - nur die horizontal schwingende Stimmgabel ist in Betrieb

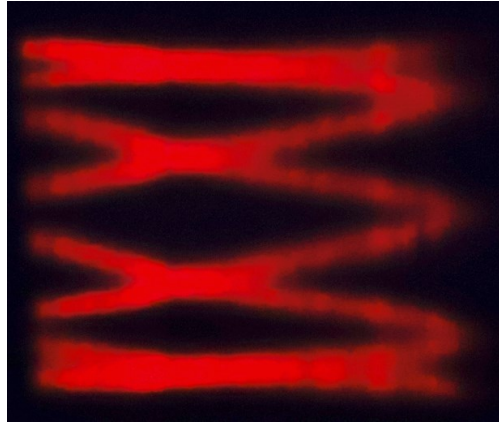


Abbildung 61: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3

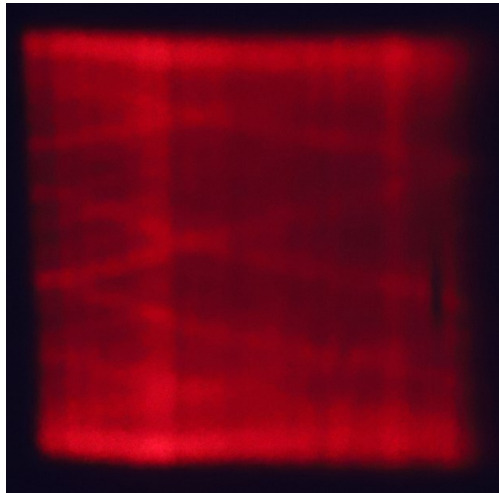


Abbildung 62: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3

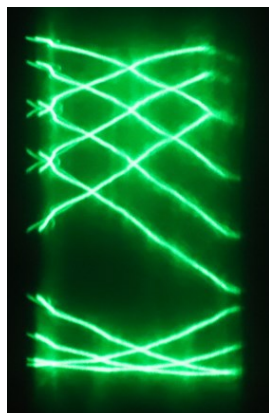


Abbildung 63: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3 mit ungleichen Amplituden

4.6.3 Langes Paar V 72/1 und V 72/2

Mit diesem Paar wurde bereits einmal in jüngerer Zeit experimentiert (Hobel, 2020, S. 89). Zu Vergleichszwecken werden Lissajous-Figuren mit den Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2 erzeugt.

Zunächst wird die Frequenz der Stimmgabel V 72/1 ermittelt. Mit dem Oszilloskop ergibt sich aus zwei Messungen ein Mittelwert der Frequenz von 74,2 Hz bei Anregung durch einen Hammer. Die in Abbildung 64 gezeigte Messung ergibt $14,62 \text{ Hz} \cdot 5 = 73,1 \text{ Hz}$.

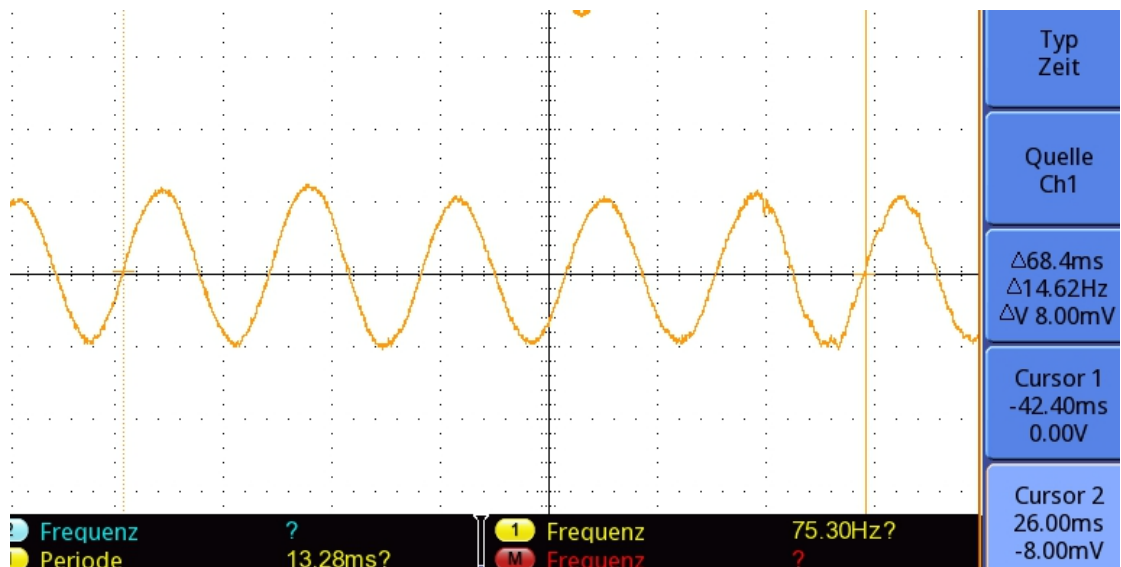


Abbildung 64: Oszilloskopbild: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/1

Wie bereits von Hobel gezeigt, weisen diese beiden Stimmgabeln nur einige Zehntel Hertz Frequenzunterschied auf (vgl. Hobel, 2020, S. 93). Dies wird wie bei Hobel auch hier in Form einer Schwebung sichtbar. Allerdings wird diesmal eine geringfügig höhere Schwebungsfrequenz von 0,75 Hz gefunden. Ursache ist vermutlich eine kleine Verschiebung der Massenstücke, an welchen der Kontaktdraht befestigt ist.

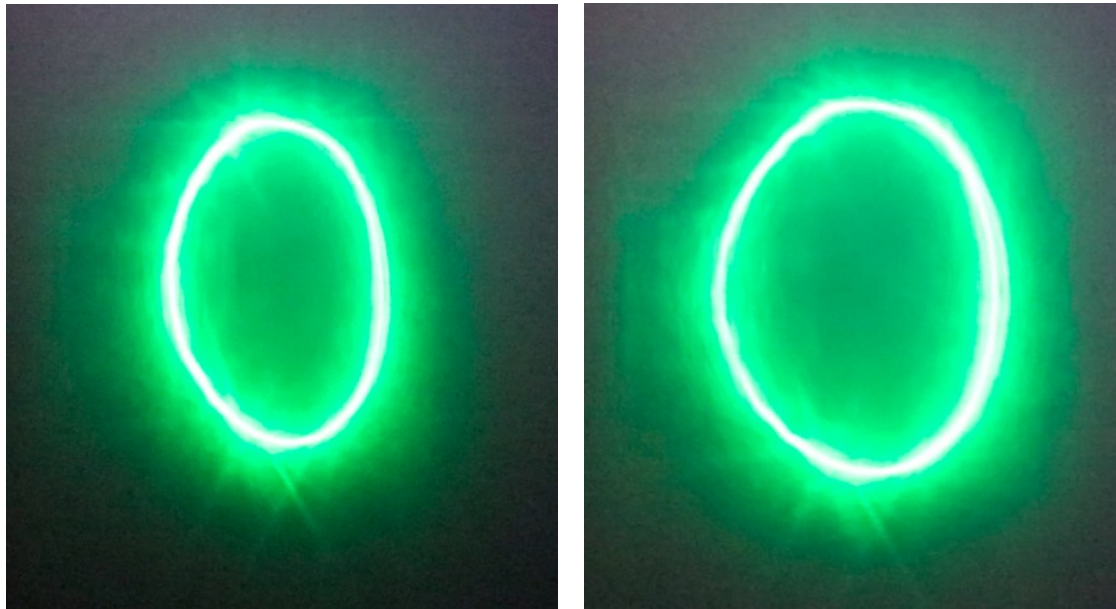


Abbildung 65: Lissajousfiguren mit Stimmgabel V 72/1 und V 72/2: die Kreisform wird nicht ganz erreicht

Bei gleicher Amplitude und Frequenz sollte die Lissajous-Figur ein Kreis sein. Wie die Abbildungen 65 zeigen, trifft dies nicht ganz zu. Die Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2 schwingen mit leicht unterschiedlicher Amplitude. Außerdem tritt eine Schwebung auf, weil auch die Frequenz leicht unterschiedlich ist. In Videos hört man die Schwebung gut heraus, wenn die Frequenzen nur wenig Unterschied aufweisen. Im Video kann die Schwebungsdauer vom zeitlichen Abstand exakt gleicher Figuren bestimmt werden, z.B. für die ansteigende Gerade. Dies ist in Abbildung 66a bis 66e dargestellt, wobei die Bilder aus der entsprechenden Videoaufzeichnung genommen sind.

Der zeitliche Abstand zwischen erstem und fünftem Bild ergibt die Schwebungsdauer, hier 2,56 s. $\rightarrow f_s = (0,39 \pm 0,02)$ Hz. Der Frequenzfehler ergibt sich aus ± 40 ms, was die Dauer eines Frames bei 25 Bilder/Sekunde ist.

Folgende Schwebungsfrequenzen wurden für V 72/1 1 und V 72/2 aus vier verschiedenen Experimenten bzw. Videos ausgewertet (Fehler $\pm 0,02$ Hz):

0,39 Hz; 0,31 Hz; 0,31 Hz; 0,36 Hz

Damit ist die Reproduzierbarkeit der Schwebungsfrequenz etwas schlechter als der Auswertefehler aus den Videos. Stichprobenhafte Schwebungsmessungen mit Mikrofon und Oszilloskop bestätigen die Ergebnisse der Videoauswertung (siehe Kapitel 4.6.5).

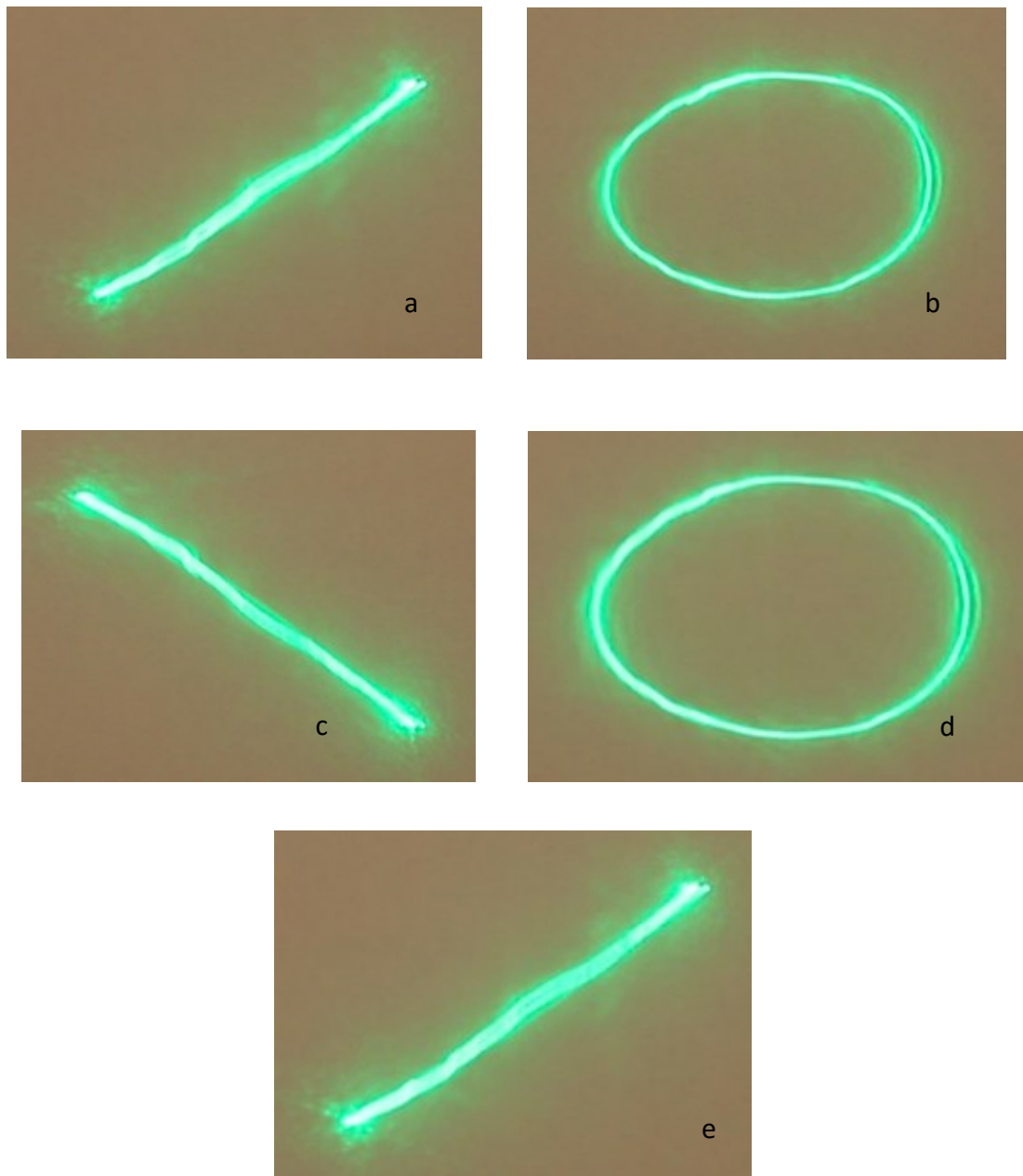


Abbildung 66: Lissajous-Figuren für die Überlagerung der Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2. Die Figuren variieren mit einer kleinen Schwebungsfrequenz (ca. 0,4 Hz).

4.6.4 Betrieb der Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2 mit zusätzlichen Massestücken

Die Stimmgabel V 72/1 wird mit Zusatzmassen versehen, was eine Verringerung der Frequenz zur Folge hat. Die Messungen erfolgen mit Mikrofon und Oszilloskop. In Abbildung 67 ist die Frequenz in Abhängigkeit von der Zusatzmasse dargestellt.

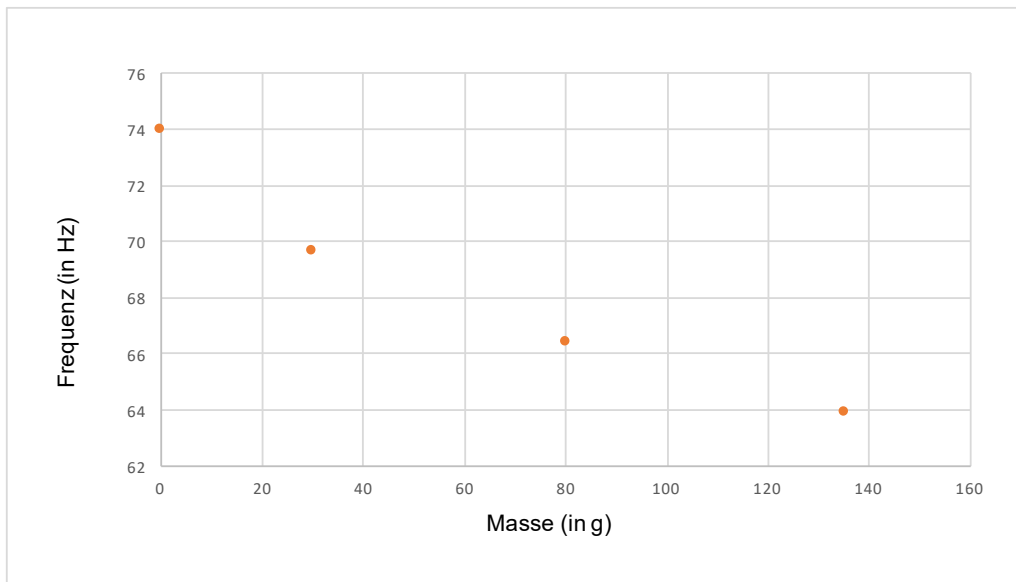


Abbildung 67: Stimmgabel V 72/1: Frequenz in Abhängigkeit der Zusatzmasse

Abbildung 68 zeigt Lissajous-Figuren, die mit den Stimmgabeln V 72/1 mit der Zusatzmasse von 135 g und der Stimmgabel V 72/2 (ohne Zusatzmassen) erzeugt werden: Die abgebildeten Kurvenabschnitte hängen von der Belichtungszeit des Fotoapparats und dem Phasenunterschied der beiden Stimmgabeln ab. Die Frequenzen der Stimmgabeln verhalten sich wie 74:64, was auch einem irrationalen Verhältnis entspricht.

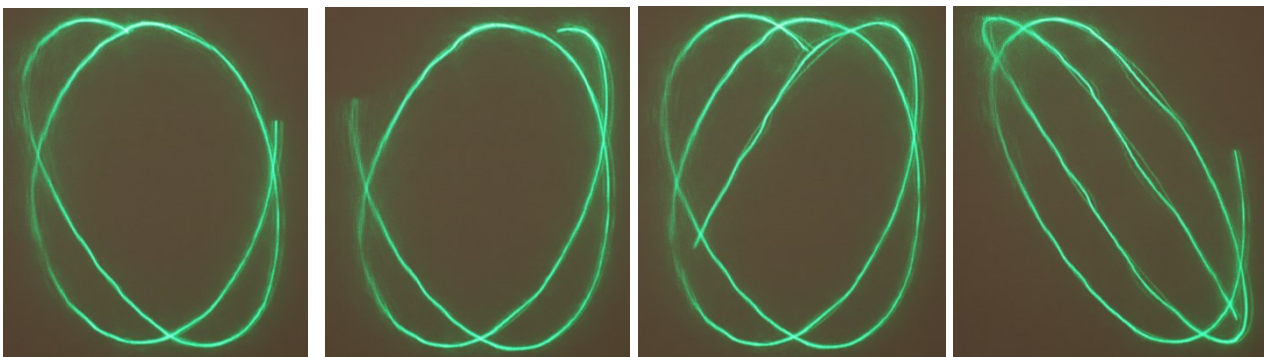


Abbildung 68: Kurvenabschnitte abhängig von Belichtungszeit

4.6.5 60 Hz – Versuch

Nun werden die beiden Stimmgabeln auf die gleiche Frequenz gebracht, indem an beiden Stimmgabeln jeweils Massenstücke angeschraubt werden.

Stimmgabel V 72/1 wird mit Massen von $29\text{ g} + 138\text{ g} = 167\text{ g}$ versehen (Abbildung 69).



Abbildung 69: Stimmgabel V 72/1 mit Zusatzmassen

Die Frequenz verringert sich dabei von 75 Hz auf $60,95\text{ Hz} = 12,19\text{ Hz} \cdot 5$ wie Abbildung 70 zeigt.

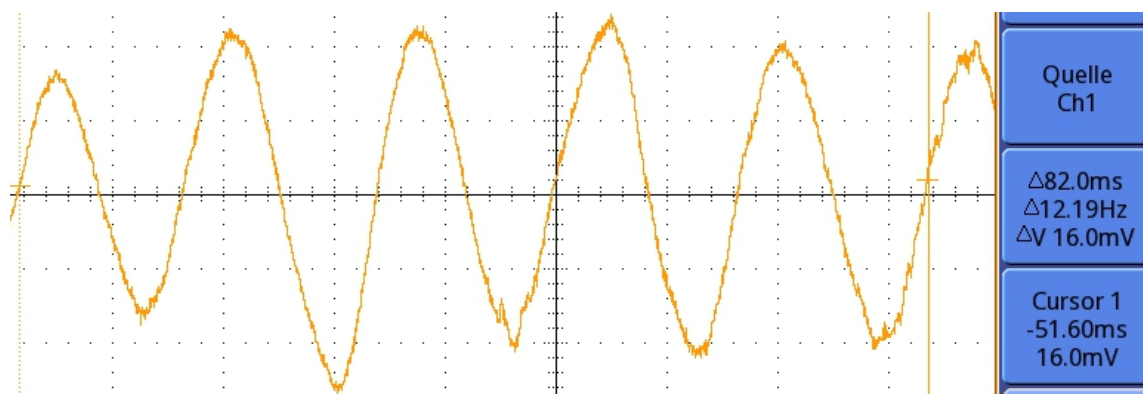


Abbildung 70: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/1 mit einer Zusatzmasse von 167g

Die Stimmgabel V 72/2 wird mit Massenstücken von $30\text{ g} + 135\text{ g} = 165\text{ g}$ versehen (Abbildung 71).

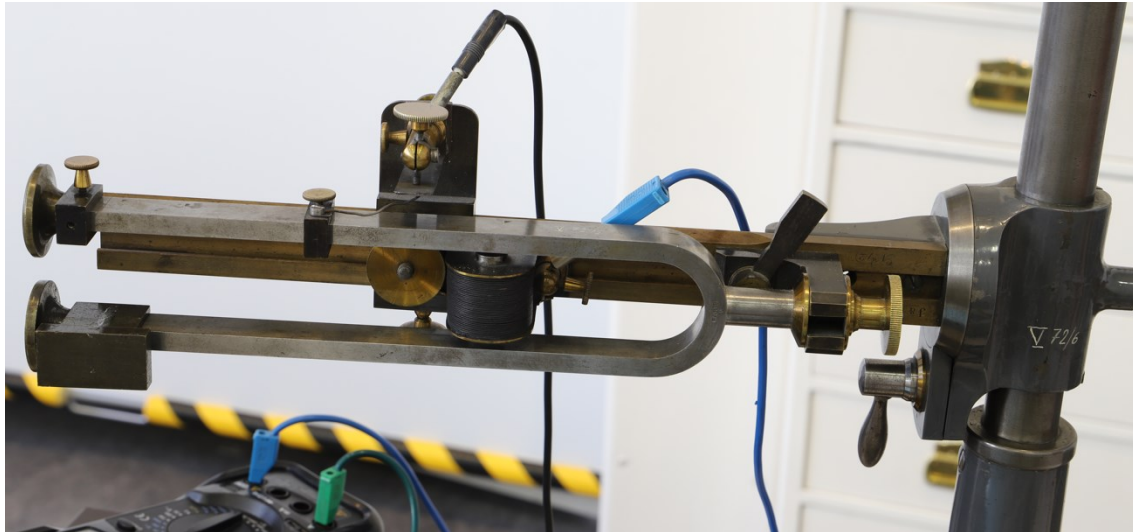


Abbildung 71: Stimmgabel V 72/2 mit Massestücken

Die Frequenz verringert sich dabei von 70 Hz auf 60,95 Hz = $12,19 \text{ Hz} \cdot 5$ (Abbildung 72).

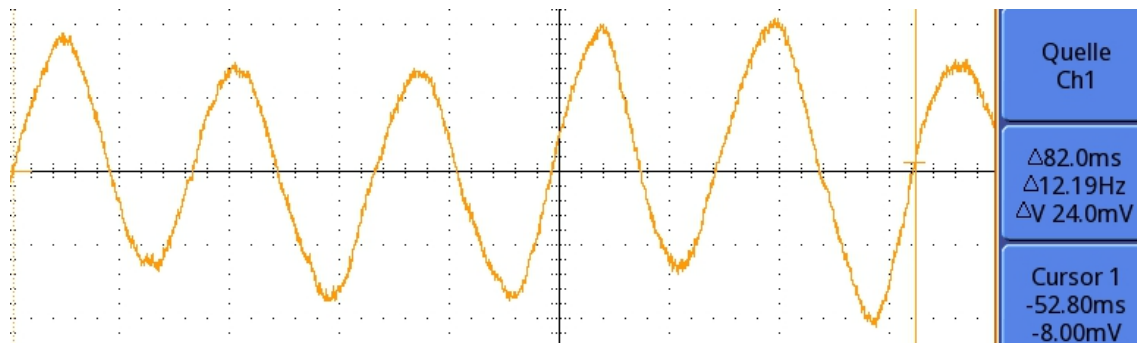


Abbildung 72: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/2 mit einer Zusatzmasse von 165g

Die entstehenden Lissajous-Figuren pendeln aufgrund einer Schwebung zwischen folgenden Formen, wie es in Abbildung 73a bis 73e dargestellt ist. Auf dem Oszilloskopbild in Abbildung 74 ist die Schwebung zu sehen, die hier auftritt.

Diese Darstellung ist analog zu Abbildung 66. Die Bilder sind wieder aus der entsprechenden Videoaufzeichnung genommen. Leider bleibt in Abbildung 73 diesmal die vertikale Amplitude zurück, sodass wiederum statt eines Kreises eine Ellipse erhalten wird.

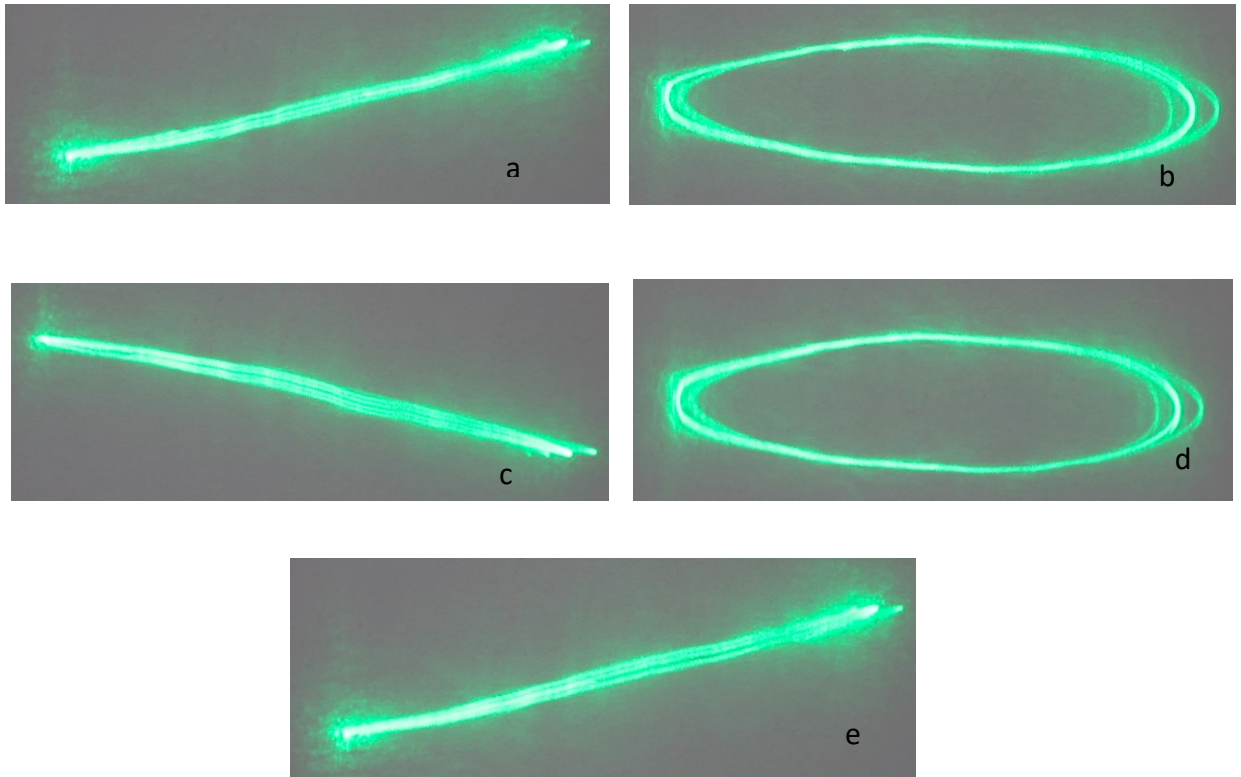


Abbildung 73: Lissajous-Figuren während einer Schwebungsperiode

Aus dem Video für den 60 Hz Versuch ergibt sich eine Schwebungsfrequenz $f_s = (0,75 \pm 0,02) \text{ Hz}$. Dies stimmt mit der Auswertung des Oszilloskopbildes (Abbildung 74) überein, welche ebenfalls ca. $(0,75 \pm 0,05) \text{ Hz}$ ($= 5 \cdot 0,150 \text{ Hz}$) ergibt.

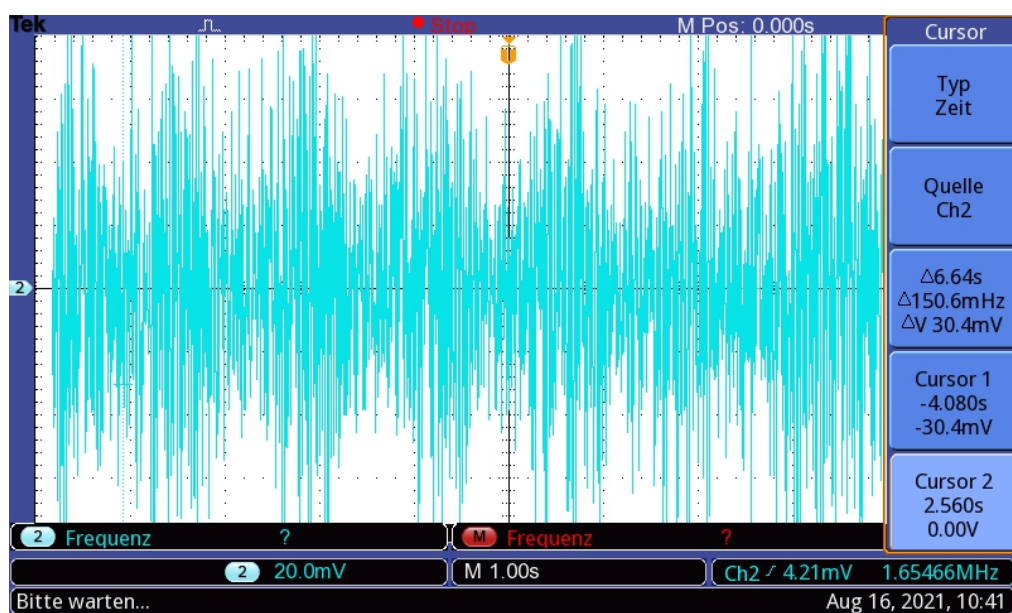


Abbildung 74: Schwebung erzeugt von Stimmgabel V 72/1 und V 72/2. Beide sind auf ca. 60 Hz justiert.

Abschließend sei bemerkt, dass die elektromagnetische Erregung dieser historischen Stimmgabeln nicht immer auf Schlagtreffen funktioniert. Außerdem verbraucht sich durch Funkenbildung der Kontaktdraht. Dies äußert sich auch dadurch, dass die Amplitude der beiden Stimmgabeln meist unterschiedlich bleibt. Es hat sich herausgestellt, dass die Schwingungen konstanter bleiben, wenn man mit dem Finger leicht auf die Justierschraube des Kontaktdrahtes drückt. Dadurch werden die Vibrationen am Gestell ein wenig gedämpft. Beim Justieren des Lasers wurde immer eine Schutzbrille aufgesetzt, um die Augen nicht zu schädigen.

4.7 Elektromagnetische Stimmgabel V 49

Die elektromagnetische Stimmgabel ist auf einer Holzgrundplatte befestigt und hat die Inventarnummer V 49 (Abbildung 75). Die Länge der Stimmgabel beträgt 25 cm. An der linken Zinke ist ein dünnes Rohr befestigt, an dem ein vertikales Stückchen Metall befestigt ist. Auf der rechten Zinke ist eine Masse zum Ausgleich des herausragenden Zylinders montiert. Auffällig ist auch der improvisierte Kontaktdraht (1,0 mm starker Eisenbinddraht), mit dessen Hilfe erst die elektromagnetische Erregung möglich wird.

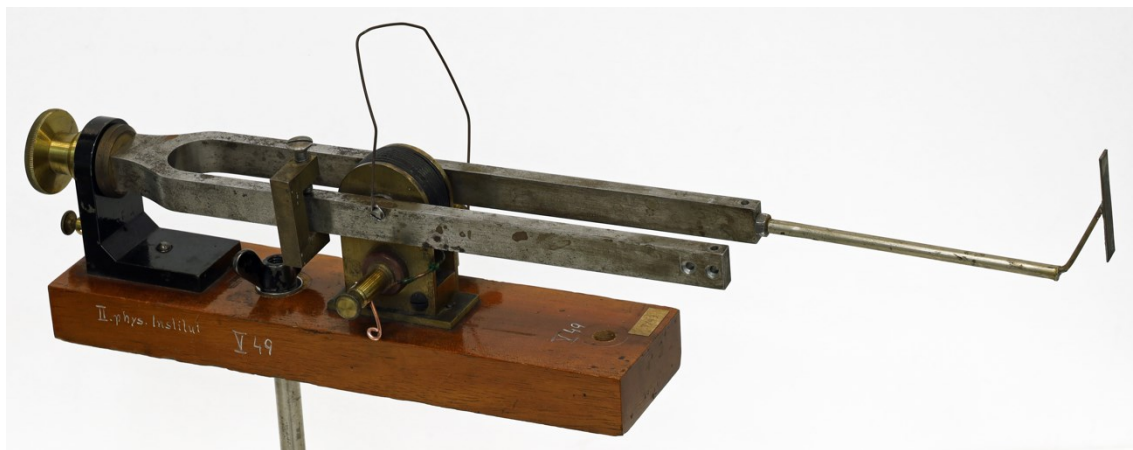


Abbildung 75: Elektromagnetische Stimmgabel V 49 mit improvisiertem Kontaktdraht

Die Spule hat einen Widerstand von $(0,5 \pm 0,03) \Omega$. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 76 dargestellt. Die Stimmgabel wird mit einem Wechselstrom von 12 V elektromagnetisch angeregt. Der Draht und sein Ende werden mit Schmirgelpapier bearbeitet, damit ein guter elektrischer Kontakt entstehen kann und die Stimmgabel zu schwingen beginnt.

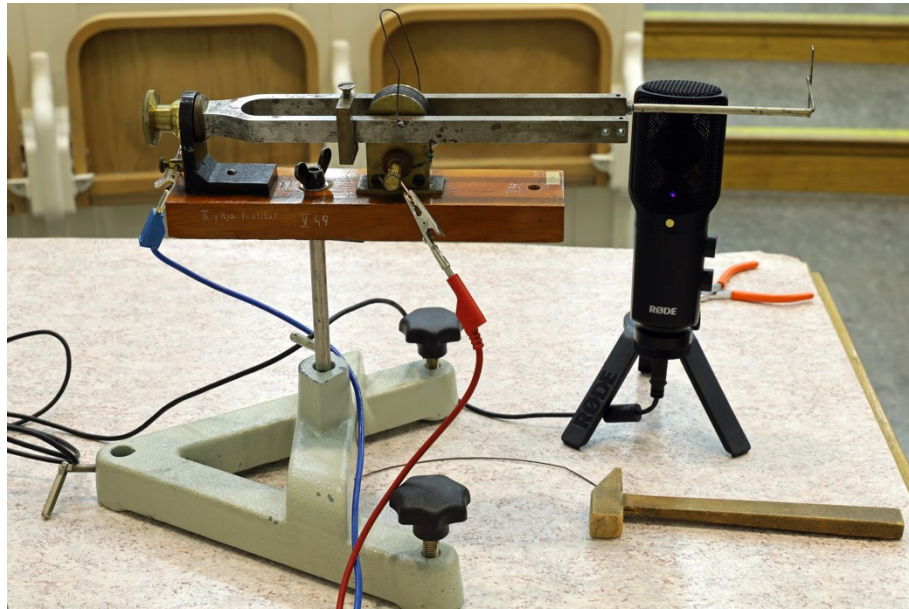


Abbildung 76: Versuchsaufbau V 49

Die Schwingungen der Stimmgabel werden mit Audacity aufgenommen und die Frequenz daraus ermittelt.

Die Stimmgabel wird mechanisch angeregt. Dabei ergibt sich eine Frequenz von 99 Hz (Abbildung 77, Cursor bei 99 Hz).

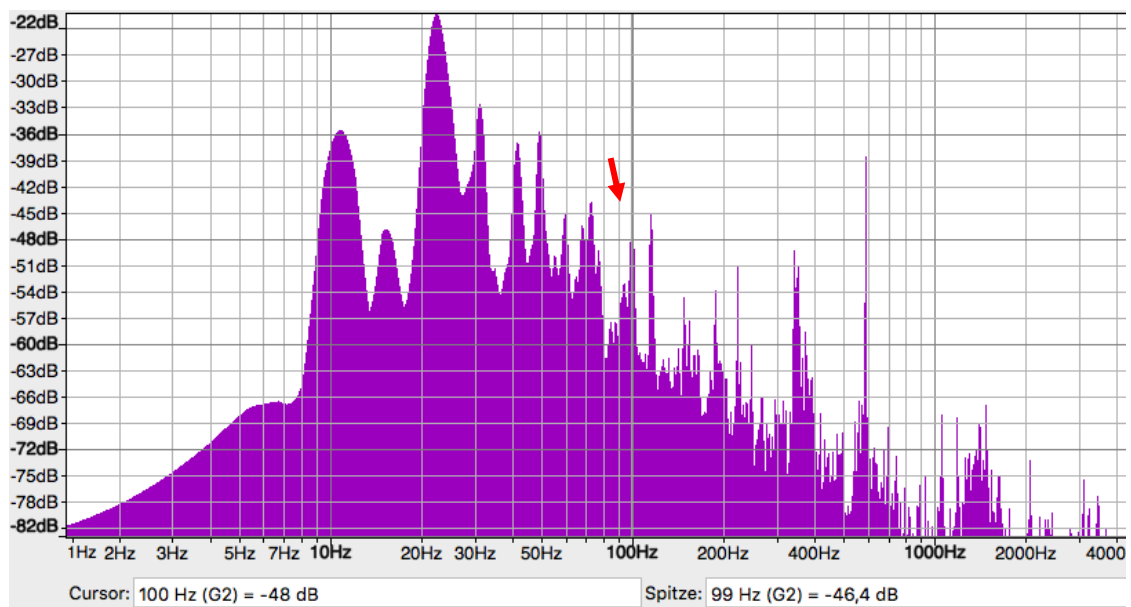


Abbildung 77: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 49

Nun wird die Stimmgabel elektromagnetisch angeregt, wobei sich eine Frequenz von 100 Hz ergibt (Abbildung 78).

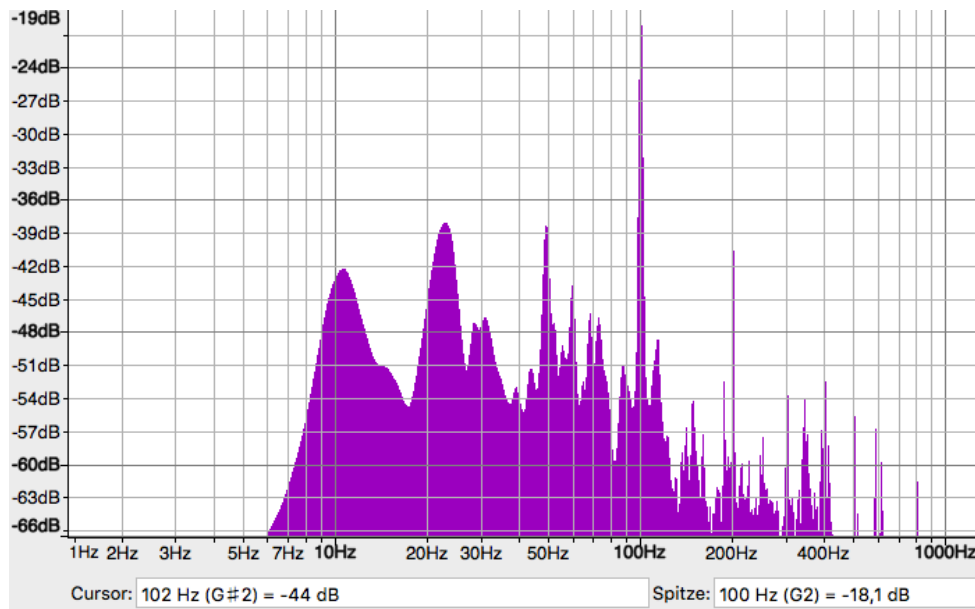


Abbildung 78: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 49

Diskussion

Mit dieser elektromagnetischen Stimmgabel können in einem Wasserbehälter Wasserwellen erzeugt werden. Sobald die Stimmgabel zu schwingen beginnt, vibriert auch dieses Plättchen, das an der Zinke angebracht ist. Dieses Vibrieren erzeugt die Wasserwellen. Da dies für die Arbeit aber nicht von Bedeutung ist, wurde der Versuch nicht auf diese Weise durchgeführt.

4.8 Stimmgabelresonatoren

Die Stimmgabelresonatoren bestehen aus einer Stimmgabel, deren eine Zinke sehr nahe parallel zur Öffnung des Messingzylinders befestigt ist (Abbildungen 79 und 80). Der Resonator in Abbildung 79 hat eine Höhe von 35 cm und steht auf einem Dreibein. Markant ist der hölzerne Zylinder um den Fuß der Stimmgabel. Der zylindrische Resonator hat eine Länge von 118 mm, einen Innendurchmesser von 92 mm und einen Außendurchmesser von 94 mm. Die Maße werden mithilfe einer Schublehre gemessen. Die Stimmgabel ist mit 870 VS bezeichnet und hat somit eine Frequenz von 435 Hz.



Abbildung 79: Stimmgabelresonator

Der Resonator (Inv.-Nr. V 18) in Abbildung 80 hat dieselben Abmessungen wie der Resonator aus Abbildung 79, die Gesamthöhe des Apparates ist jedoch um ca. 4 cm höher. Optisch unterscheiden sie sich am Aussehen der Stimmgabel, wobei die Stimmgabeln die gleiche Frequenz aufweisen. Die Stimmgabel trägt die Initialen von Rudolph Koenig.



Abbildung 80: Normalstimmgabel mit Resonator V 18

Um den Apparat V 18 (Abbildung 80) in Betrieb zu nehmen, wird die Stimmgabel mit einem Holzhammer angeschlagen und somit in Schwingungen versetzt. Sobald die Stimmgabel erklingt, kann der Resonanzkörper durch Verschieben vergrößert bzw. verkleinert werden. In Abbildung 80 ist auf der linken Seite des Zylinders ein Griff an einem verschiebbaren Zylinder zu erkennen. Wird mit diesem der Resonanzraum verändert, macht sich ein An- und Abschwellen der Amplitude bemerkbar.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 81 dargestellt. Mit Audacity werden die Schwingungsverläufe aufgezeichnet.

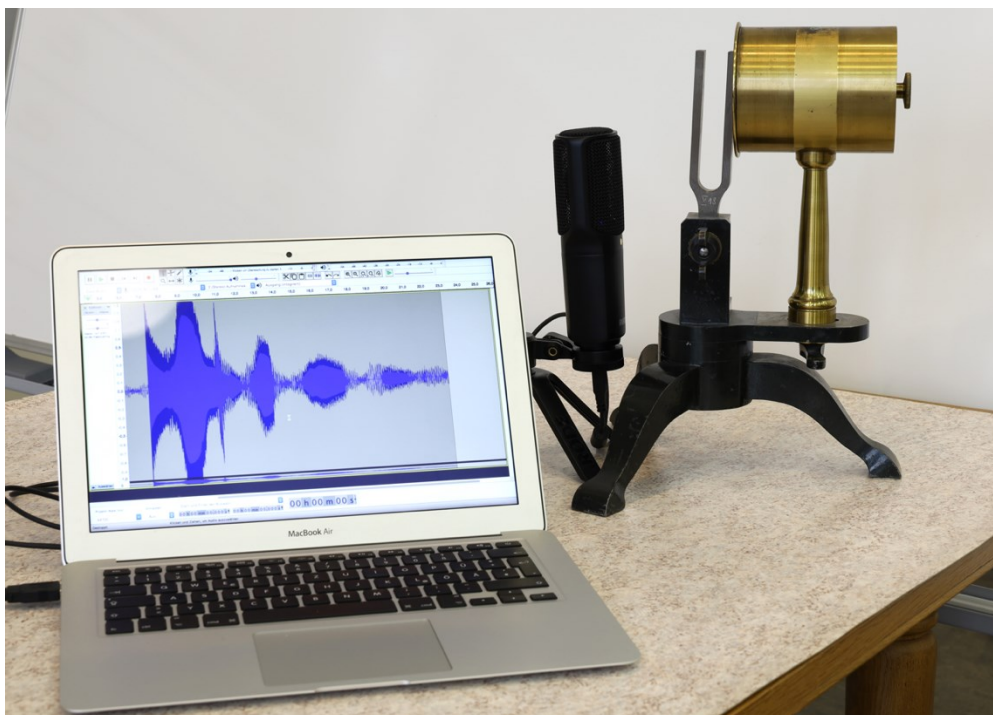


Abbildung 81: Versuchsaufbau mit Stimmgabelresonator

Zu Beginn wird durch die Software die Frequenz der Stimmgabel ermittelt, indem die Stimmgabel mit einem Holzhammer angeregt wird. Audacity liefert einen Frequenzwert von exakt 435 Hz (Abbildung 82).

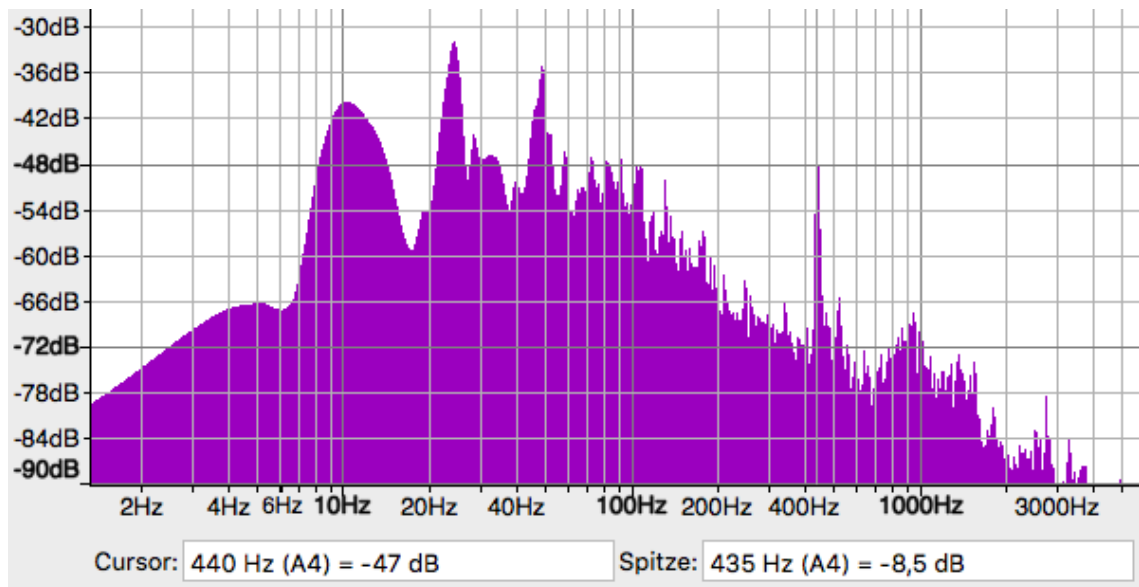


Abbildung 82: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel von V 18

Als nächsten Schritt wird der Resonanzkörper ganz ausgezogen. Nach dem Anschlagen der Stimmgabel wird der Resonanzkörper mit der Zeit langsam zurückgeschoben und in der Position variiert. Die Aufnahme mit Audacity in Abbildung 83 zeigt deutlich, wie sich die Amplitude der Luftschwingungen erhöht, wenn der Resonator auf die passende Länge eingestellt ist. Auch das Spektrum in Abbildung 84 hat bei 435 Hz eine höhere Intensität als in Abbildung 82.

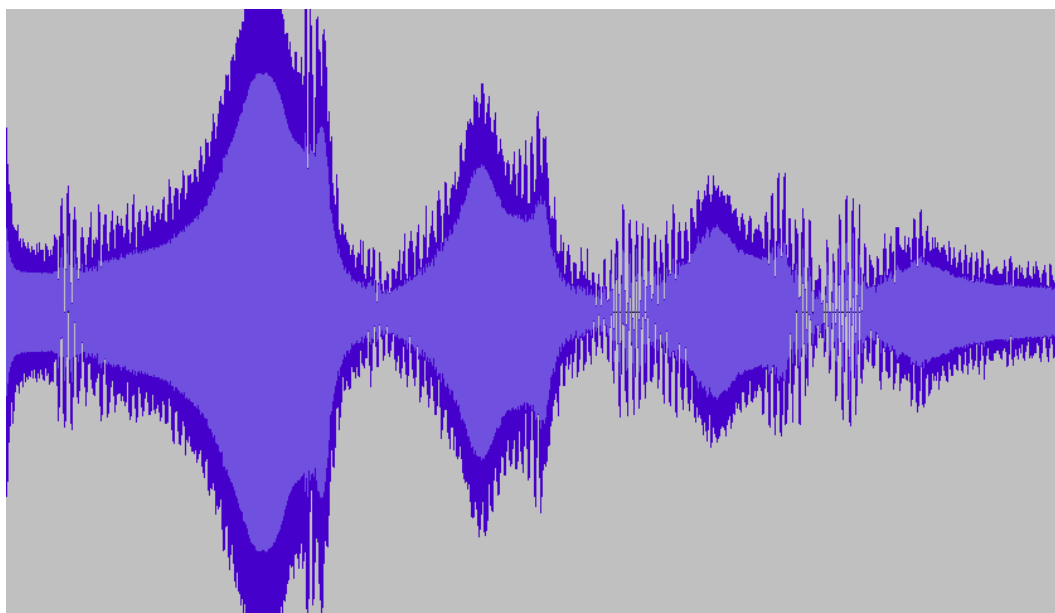


Abbildung 83: Schwingungsverlauf, Stimmgabelresonator V 18

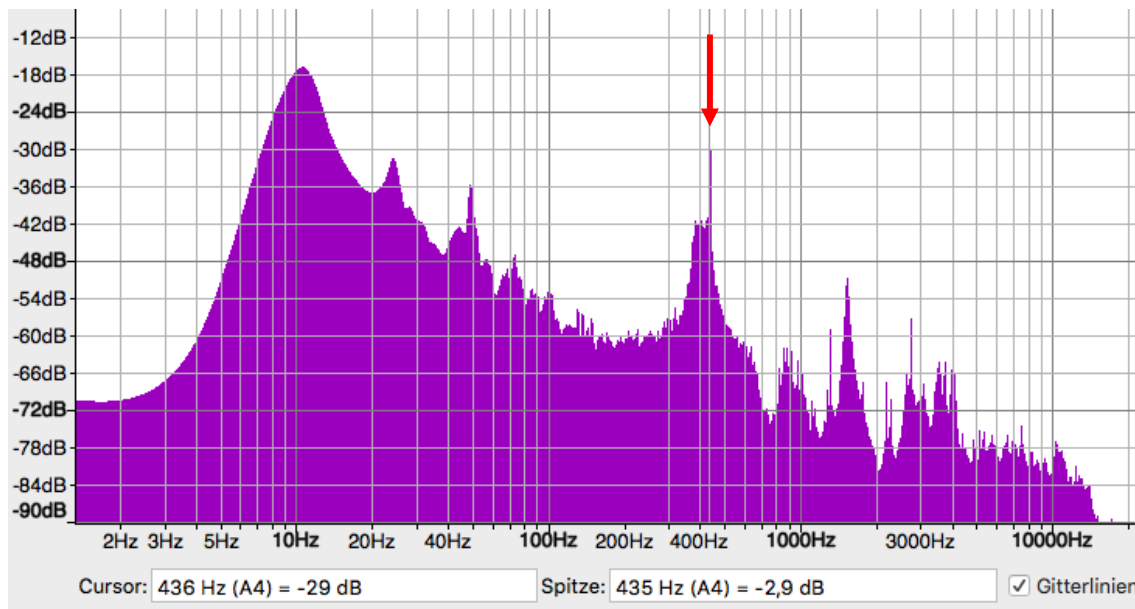


Abbildung 84: Spektrum: Stimmgabelresonator V 18 bei Resonanz

Die Frequenz f beträgt 435 Hz, die Schallgeschwindigkeit c beträgt in Luft 343 m/s bei einer Temperatur von 20°C (vgl. Kinsler, u.a., 2000, S. 528). Aus diesen Werten errechnet sich die Wellenlänge λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{435 \text{ Hz}} \approx 0,789 \text{ m} = 78,9 \text{ cm}$$

Die Resonanz tritt bei einer Länge des Resonatorzylinders von ca. 20 cm auf. Das passt mit der Theorie zusammen, dass bei halboffenem Resonator der Resonanzraum eine Viertelwellenlänge haben soll (siehe Kapitel 3.1).

4.9 Stimmgabelunterbrecher

Der Stimmgabelunterbrecher hat eine Länge von 60 cm, eine Breite von 25 cm und eine Höhe von 29 cm. Auf der Holzplatte findet man die Bezeichnung „II. Physikalisches Institut V 54“. In Abbildung 85 ist zu sehen, dass die Stimmgabel in ein Holzstück montiert wird, welches verschoben werden kann. Je nachdem, wie lange die verwendete Stimmgabel ist, wird das Holzstück nach vorne oder hinten gerückt. Die Zinken der Stimmgabel befinden sich zwischen den beiden Spulen mit Eisenkern, wobei jeweils ein verstellbarer Bolzen so eingestellt werden kann, dass die Stimmgabel gerade nicht anschlägt. Hier werden die Zinken der Stimmgabel also von der Außenseite angeregt. Bei den anderen elektromagnetischen Stimmgabeln, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind

die Spulen mit Eisenkern nämlich immer zwischen den Zinken der Stimmgabel. Von der oberen Zinke ragt ein Kontaktdraht in einen kleinen gläsernen Behälter, in dem Quecksilber enthalten sein sollte. So wurde früher der elektrische Kontakt hergestellt. Für das weiter unten beschriebene Experiment wurde der Behälter abgeschraubt und durch eine Kontaktschraube ersetzt.

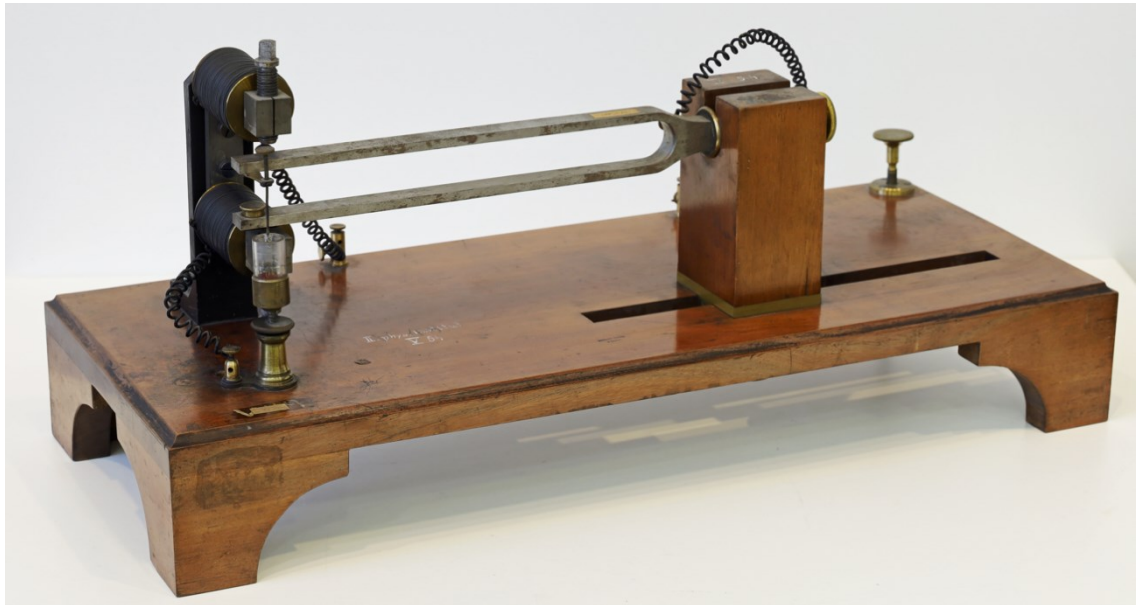


Abbildung 85: Vorderseite des Stimmgabelunterbrechers

In Abbildung 86 sind die Rückseite des Stimmgabelunterbrechers und die beiden Stimmgabeln, die verwendet wurden, zu sehen.

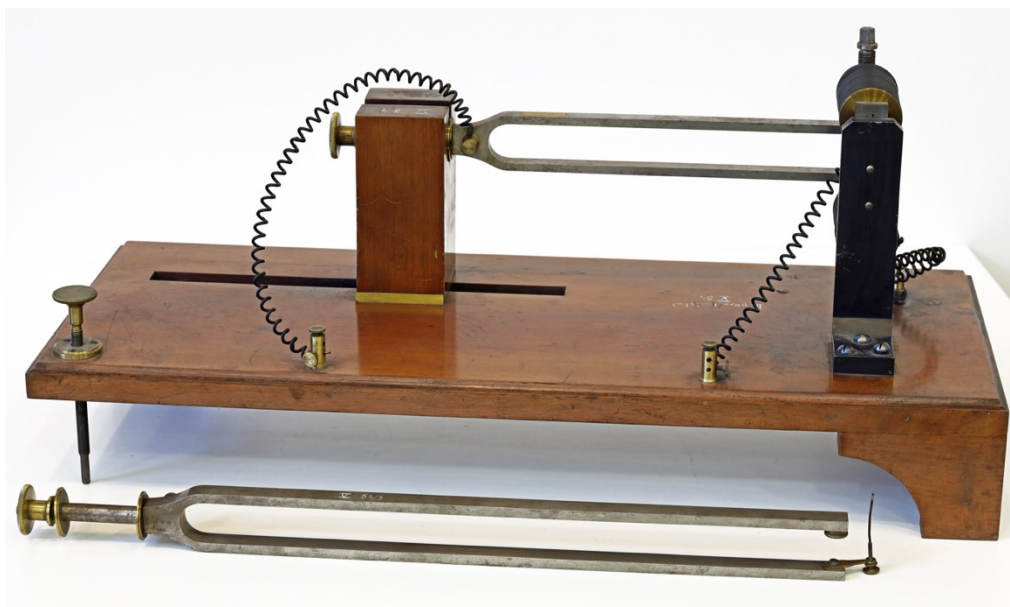


Abbildung 86: Rückseite des Stimmgabelunterbrechers und zweite Stimmgabel

Um den Stimmgabelunterbrecher in Betrieb zu nehmen, wird zu Beginn der Spulenwiderstand kontrolliert. Es wird ein Wert von $(0,5 \pm 0,03) \, \Omega$ gemessen. Mit einem Wechselstromnetzgerät, Amperemeter und Vorwiderstand von $10 \, \Omega$ wird der Messkreis aufgebaut (Abbildung 88). Um die Stromunterbrechung sichtbar zu machen, wird die Gesamtspannung der beiden Spulen mit einem Batterieoszilloskop verbunden. Es wird mit einer Wechselspannung von ca. 12 V gearbeitet. Durch Verändern des Wertes des Vorwiderstandes kann die Stromzufuhr erhöht bzw. erniedrigt werden und damit die Amplitude der Stimmgabel verändert werden. Der Versuchsaufbau mit dem Rode-Mikrofon ist in Abbildung 87 zu sehen:



Abbildung 87: Versuchsaufbau Stimmgabelunterbrecher

Der elektrische Versuchsaufbau ist in folgender Schaltskizze dargestellt:

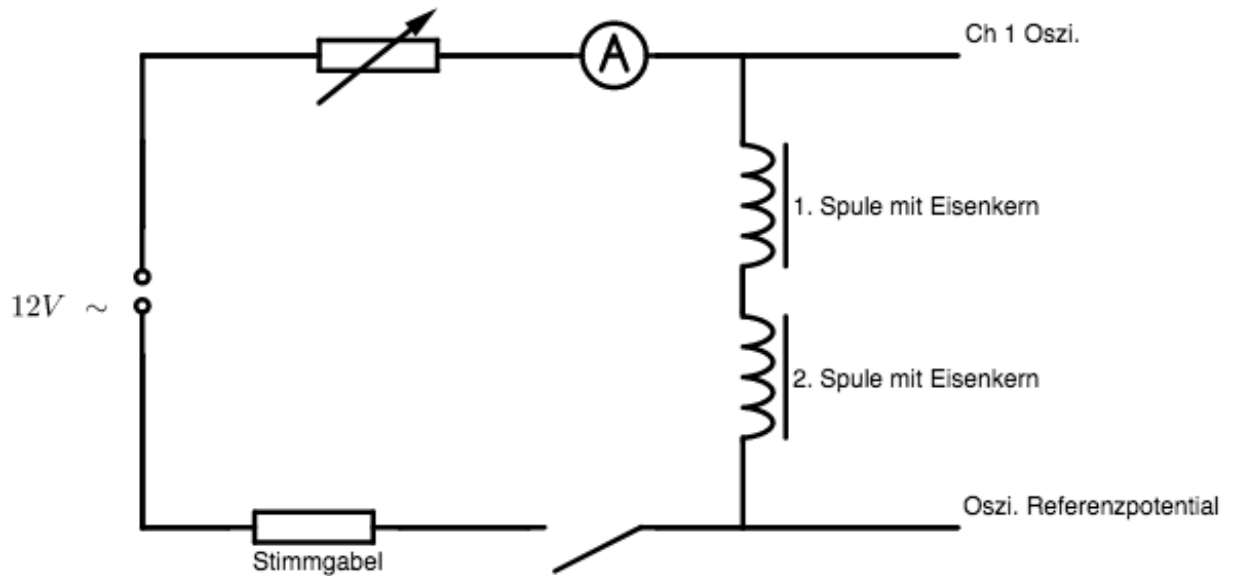


Abbildung 88: Schaltskizze Stimmgabelunterbrecher

Verwendung der Stimmgabel UT₁

Die Stimmgabel V 54/2 ist mit 128 VS bezeichnet, das entspricht einer Frequenz von 64 Hz. Die Länge dieser Stimmgabel beträgt 28,5 cm (ohne runden Schaft) und die Breite (Distanz der Außenflächen) 3,75 cm. Der Querschnitt der Zinken hat die Maße 13,7 mm x 6,0 mm. Die Stimmgabel wird zunächst mit einem Holzhammer angeregt. Mit Audacity wird die angegebene Frequenz überprüft, welche mit 66 Hz sehr gut übereinstimmt (Abbildung 89).

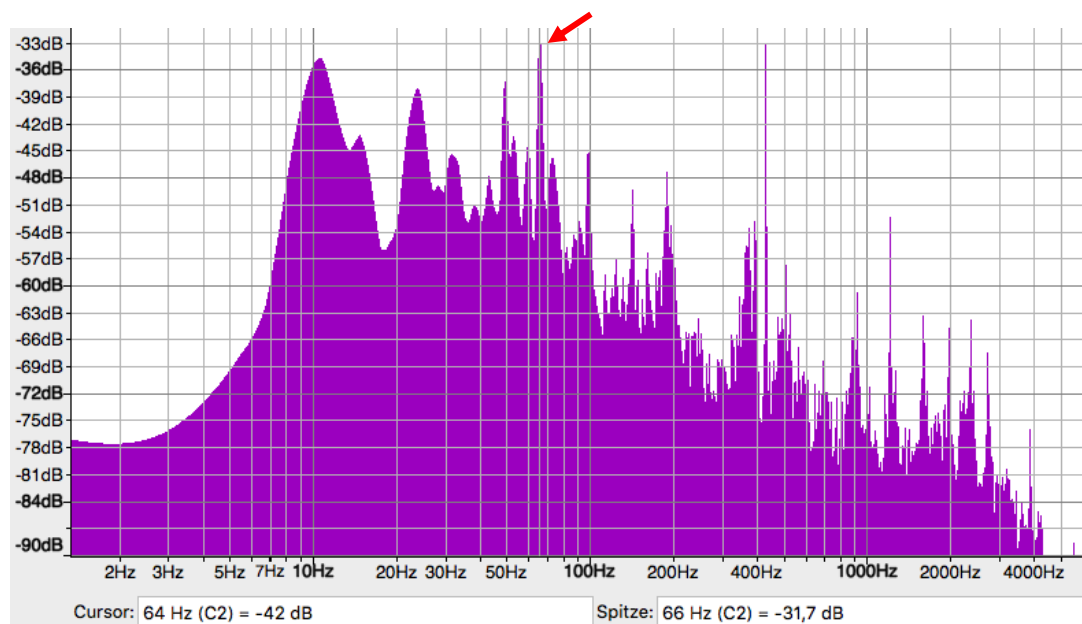


Abbildung 89: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel UT₁

Die Stimmgabel wird elektromagnetisch angeregt. Folgende Aufnahme (Abbildung 90) ergibt ebenfalls eine Frequenz von 66 Hz.

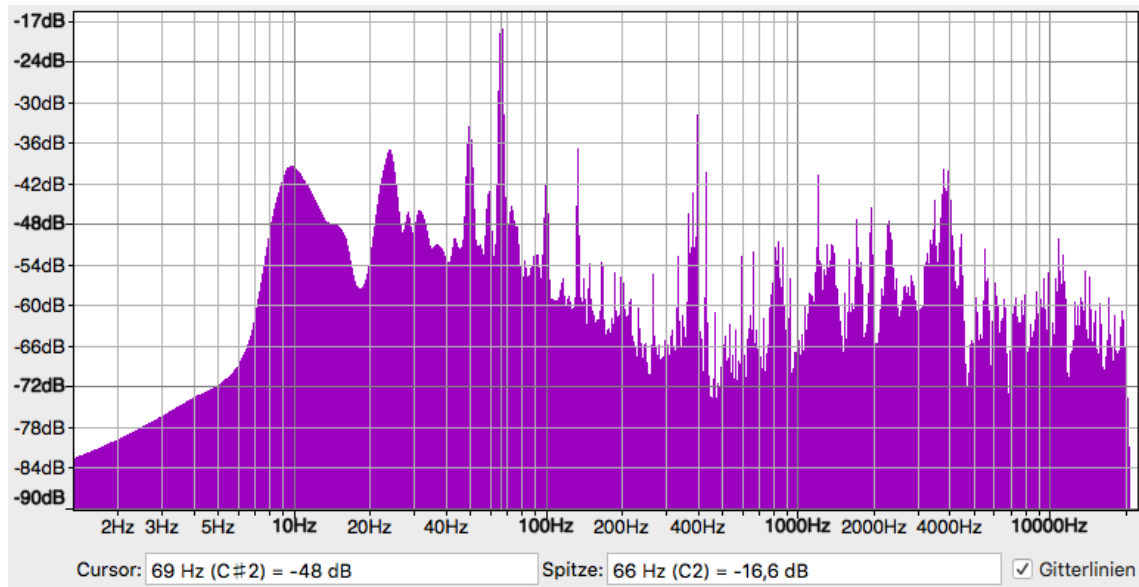


Abbildung 90: Spektrum: elektromagnetische Anregung der Stimmgabel UT₁

Verwendung der Stimmgabel UT-1

Diese Stimmgabel V 54/3 ist genau um eine Oktave niedriger als die zuvor Verwendete, ist mit 64 VS gekennzeichnet und hat somit eine Frequenz von 32 Hz. Die Länge ohne runden Schaft ist 42,0 cm, die Breite ist 3,8 cm. Der Querschnitt der Zinken beträgt 14,0 mm x 6,5 mm.

Zuerst wird die Stimmgabel mechanisch angeregt. Die gemessene Frequenz mit Audacity ergibt einen Wert von 32 Hz (Abbildung 91).

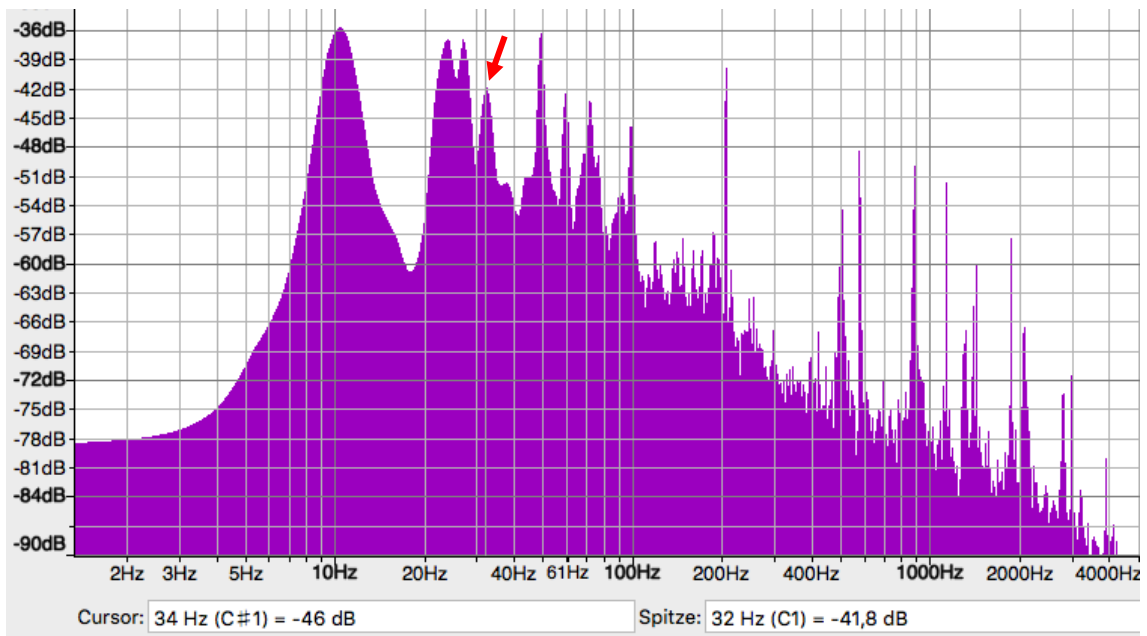


Abbildung 91: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel UT-1

Die Stimmgabel wird nun elektromagnetisch angeregt. Aus dem Spektrum ist eine Frequenz von 33 Hz zu entnehmen (Abbildung 92).

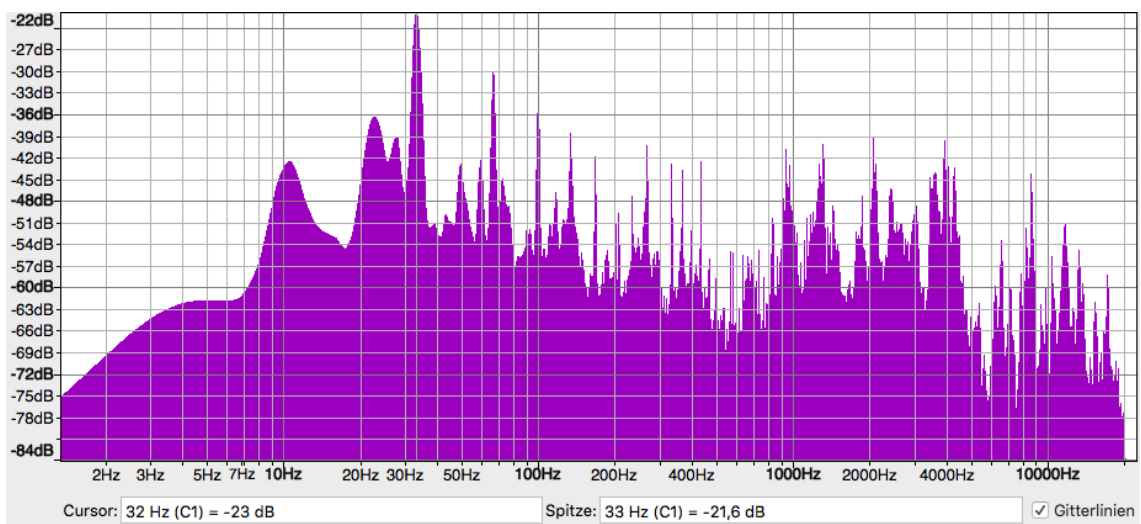


Abbildung 92: Spektrum: elektromagnetische Anregung der Stimmgabel UT-1

Der Apparat heißt deswegen Stimmgabelunterbrecher, weil der Strom unterbrochen wird. Um das zu zeigen, wird das Batterie-Oszilloskop Tektronix TPS 2012B verwendet. In den Abbildungen 93 und 94 ist der Versuchsaufbau abgebildet. Es werden also Aufnahmen mit Audacity und dem Oszilloskop gemacht.

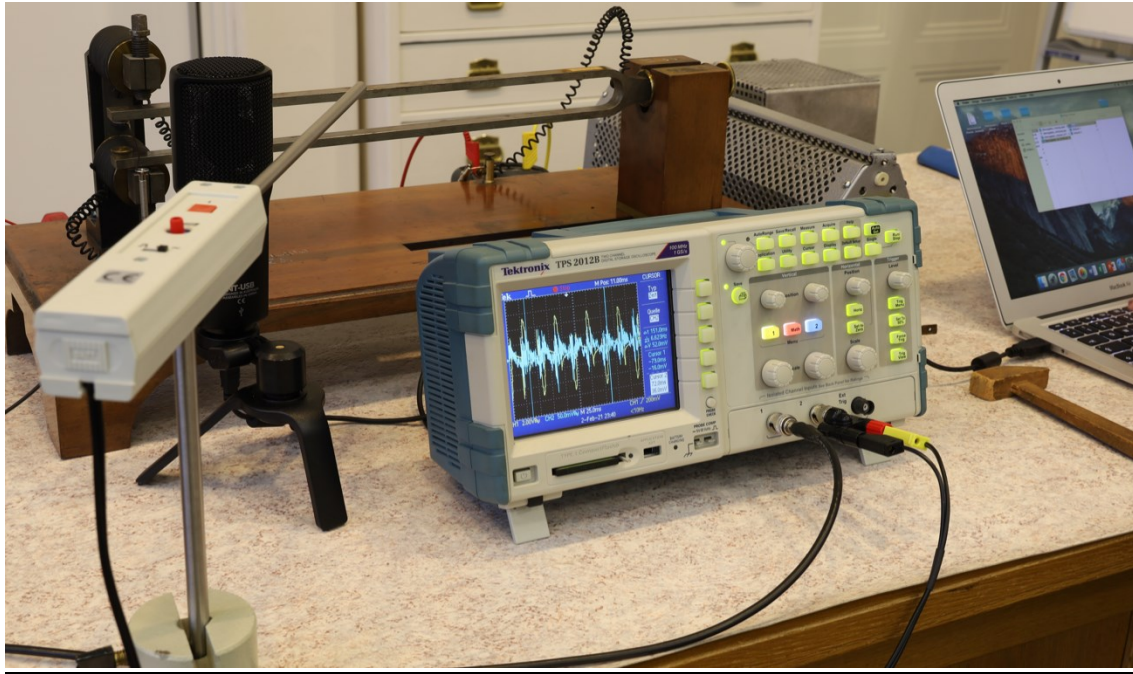


Abbildung 93: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT-1 und Oszilloskop Vorderseite

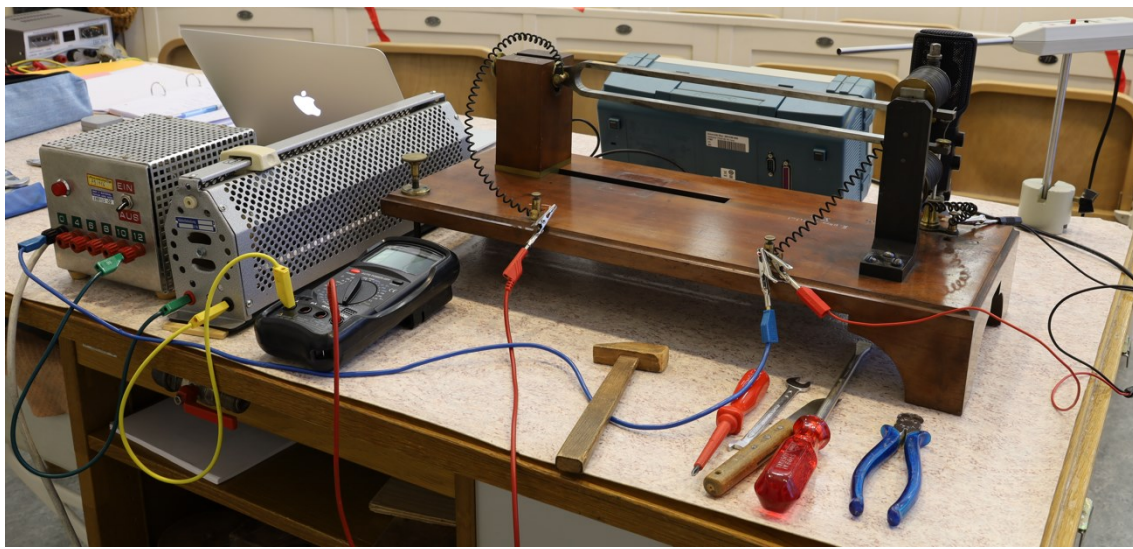


Abbildung 94: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT-1 und Oszilloskop Rückseite

Im Oszilloskopbild (Abbildung 93) ist der Strom gelb gekennzeichnet und der Ton in blauer Farbe. In Abbildung 95 sind mit den beiden Cursorlinien genau zwei Perioden der Stimmgabelschwingung eingestellt. Bei einer 32 Hz-Stimmgabel wird theoretisch alle 31,25 ms der Stromkreis geschlossen. Dies kann am Oszilloskopbild ca. alle 30 ms anhand der großen Spannungsspitzen gesehen werden. Es ergibt sich also eine Frequenz von $16,56 \text{ Hz} \cdot 2 = 33,12 \text{ Hz}$. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem angegebenen Wert von 32 Hz überein.

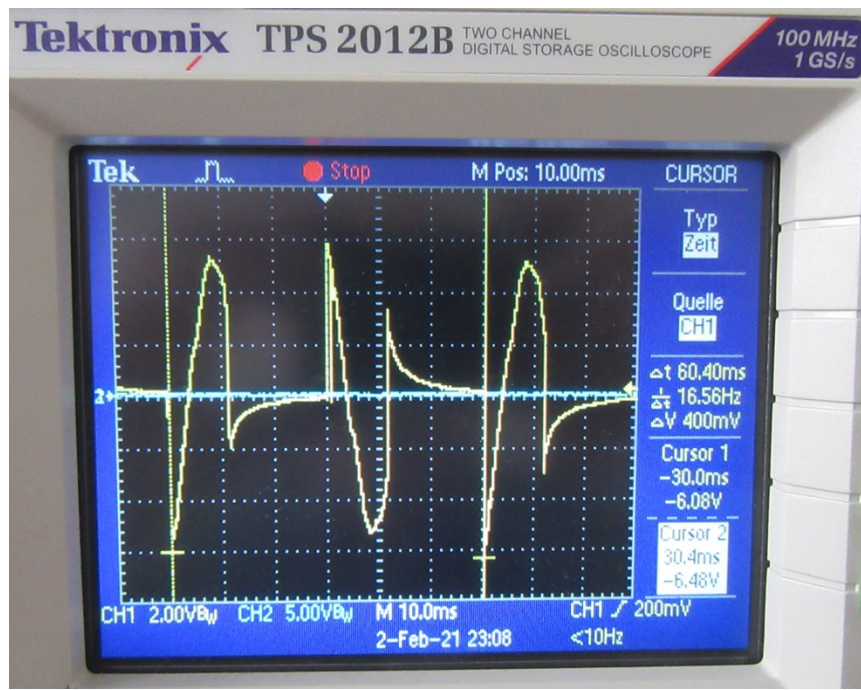


Abbildung 95: Oszilloskopbild: Stromunterbrechungen

Anders als bei den bisher untersuchten elektromagnetischen Stimmgabeln, wird hier die Stimmgabel von den Spulen umgeben. Ein möglicher Grund, warum das so ist, wäre, dass die Stimmgabel uneingeschränkt schwingen kann. Sie schwingt dadurch besser und erklingt schöner. Mit Gleichspannung kann man den Apparat nicht in Betrieb nehmen, weil die Magnetisierung zu groß werden würde – die Zinken würden an den Bolzen der Eisenkerne haften bleiben - und so das Schwingen der Stimmgabel verhindern. Beim Wechselstrom ist das anders, weil dieser immer umgepolt wird und somit nie eine zu große Magnetisierung hervorrufen könnte. Ein im Rahmen dieser Arbeit entstandenes Video mit dem Stimmgabelunterbrecher in Betrieb ist unter dem Link <https://phaidra.univie.ac.at/o:1411606> zu finden.

4.10 Stimmgabeluhr V 44

Ein weiteres physikhistorisches Gerät ist die Stimmgabeluhr V 44 von Rudolph Koenig, welche mit den beiden Stativen in Abbildung 96 abgebildet ist. Die Stimmgabeluhr besteht aus einem massiven Grundgerüst, das auf einem Dreibein steht. Eine Stimmgabel aus Messing ist vertikal justiert. Ihre beiden Zinkenenden ragen etwas hinter das Ziffernblatt der Uhr (Abbildung 97).

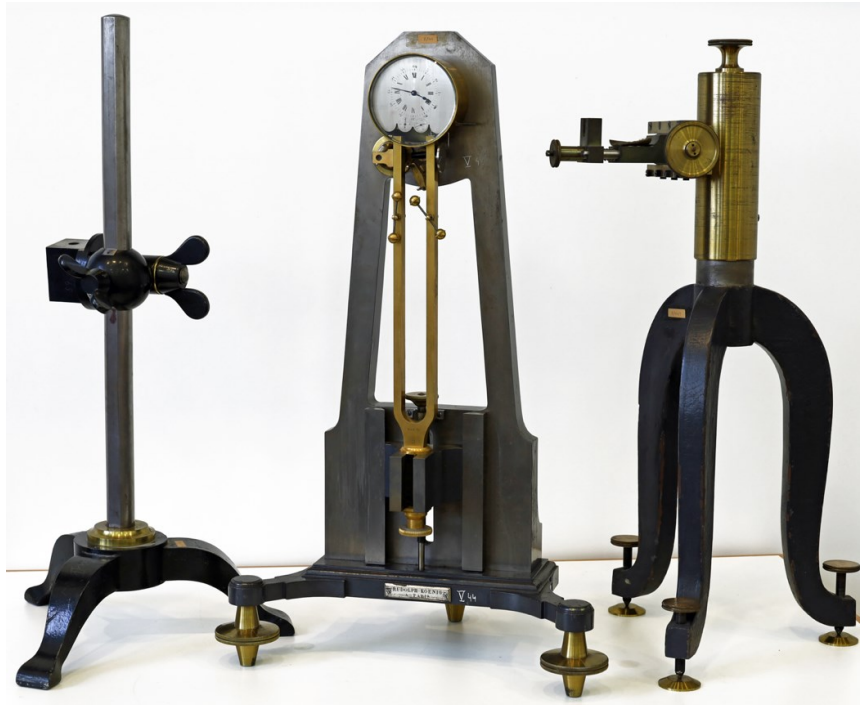


Abbildung 96: Stimmgabeluhr V 44 mit den beiden Stativen

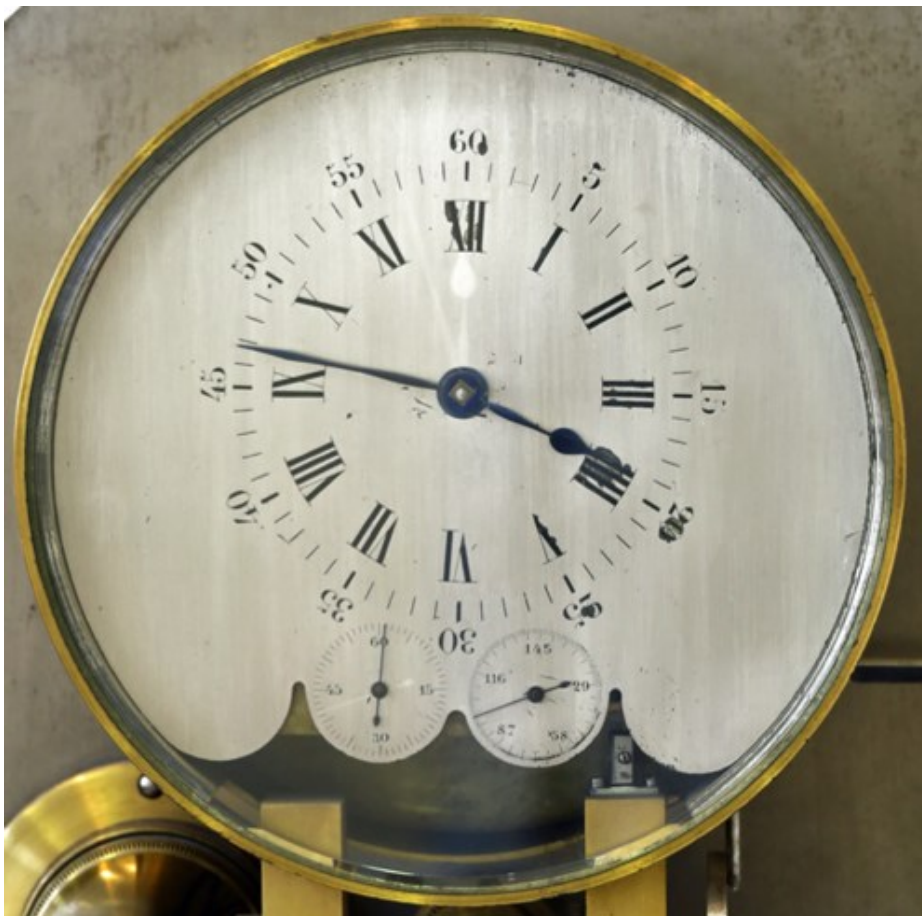


Abbildung 97: Ziffernblatt der Stimmgabeluhr

Auf der Rückseite (Abbildung 98) ist ein kleines Mikroskop befestigt. Damit erfüllt die Stimmgabeluhr auch die Funktion eines Vibrationsmikroskops, wenn eine Saite oder eine andere Stimmgabel senkrecht zur Stimmgabel der Uhr schwingt (siehe Kapitel 4.10).

Leider scheint dieses historische Gerät defekt zu sein. Es wurde einiges versucht, um die Stimmgabel in Schwingung zu versetzen. Die Zinken sind offenbar im Gehäuse hinter dem Ziffernblatt blockiert. Von einem Reparaturversuch wurde abgesehen, da der Aufbau des Uhrengehäuses sehr fragil und antik ist.



Abbildung 98: Rückseite der Stimmgabeluhr

Das Uhrwerk besteht aus drei Zifferblättern, auf denen Stunden, Minuten, Sekunden und Schwingungen der Stimmgabel abzulesen sind (vgl. Leybold, 1904, S. 211). Die Stimmgabel wird elektrisch in Schwingungen versetzt. Die Bewegungen der Stimmgabel versetzen die Zahnräder in Bewegung. Eine Sperrklinke ermöglicht die ständige Bewegung des Rades, da sie dessen Zurückdrehen verhindert (vgl. Greenslade, 2018, S. 2-10). Hier ist anzumerken, dass das Originalzubehör zur elektromagnetischen Anregung der Stimmgabeluhr

nicht mehr vorhanden ist. Jedenfalls trägt die rechte Zinke der Stimmgabel ganz oben knapp unter dem Zifferngehäuse eine magnetisierbare Stahlscheibe, die die elektromagnetische Anregung ermöglicht, sofern mittels Stativ eine geeignete Spule mit Eisenkern in die Nähe gebracht wird.

4.11 Vibrationsmikroskop

In der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien gibt es zwei unterschiedliche Vibrationsmikroskope, abgesehen von der Stimmgabeluhr. Der Zweck des Vibrationsmikroskops ist es, in Kombination mit einer schwingenden Saite oder einer zweiten Stimmgabel Lissajous-Figuren zu erzeugen und aus deren Gestalt auf die Frequenzverhältnisse zu schließen (Weinhold, 1913, S. 327). Das Vibrationsmikroskop V 55 ist in Abbildung 99 und 100 zu sehen. Wie auch experimentell überprüft wurde, schwingt die elektromagnetisch angeregte Stimmgabel mit 97 Hz. Das Vibrationsmikroskop 2109 (Inv.-Nr. 2109, I. Phys. Inst. Univ.Wien) ist in Abbildung 101 und 102 dargestellt. Seine Stimmgabel schwingt mit 135 Hz.



Abbildung 99: Vibrationsmikroskop V 55 Vorderseite mit improvisiertem Unterbrecherkontakt

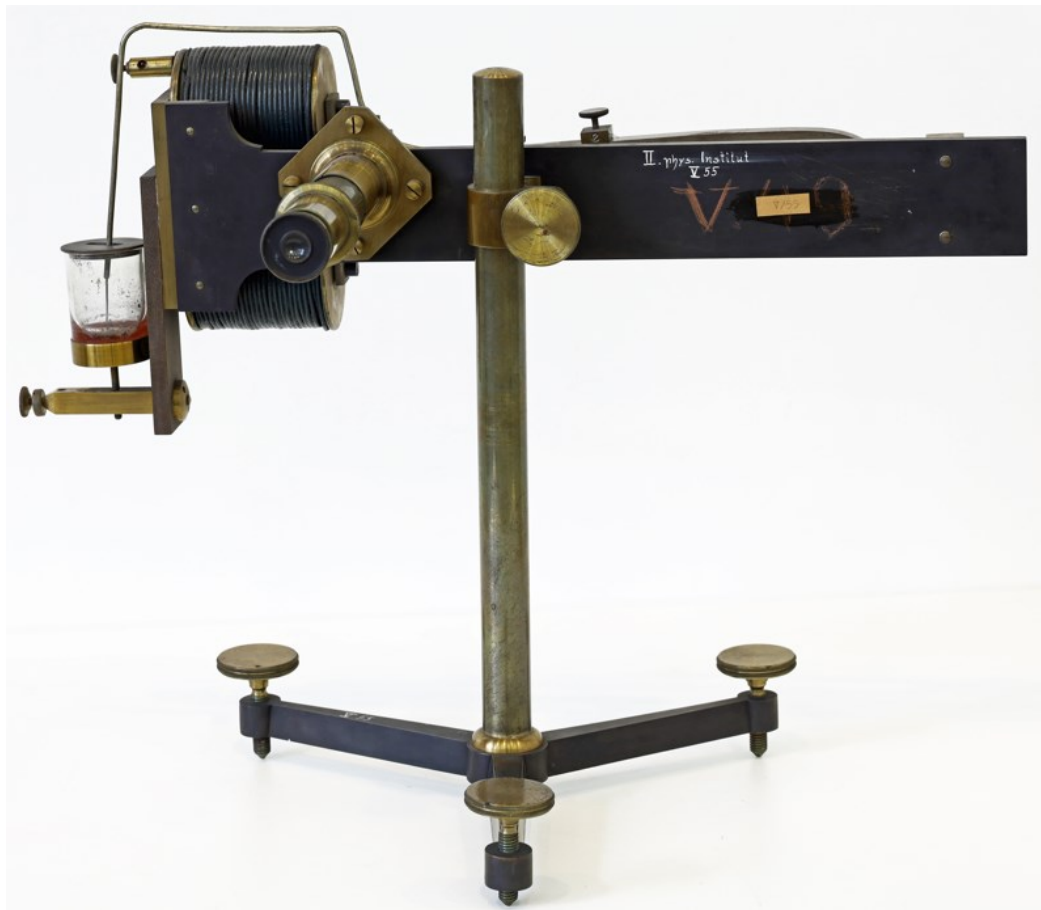


Abbildung 100: Vibrationsmikroskop V 55 Rückseite mit dem originalen Quecksilberkontakt

Für das Experiment wird das Vibrationsmikroskop 2109 (bzw. alte Nr. e43) verwendet (Abbildung 101), weil es besser schwingt als das andere. Um damit Lissajous-Figuren sichtbar zu machen, wird auch die Stimmgabel V 72/3 (mit 109 Hz, siehe Tabelle 12) verwendet, diese wurde bereits bei der Erzeugung der Lissajous-Figuren in Kapitel 4.5 verwendet. In Abbildung 102 (und 105) ist deutlich zu sehen, dass die vordere Objektlinse des Mikroskops an der horizontal ausgerichteten Stimmgabel befestigt ist. D.h., die Objektlinse schwingt mit der horizontalen Stimmgabel mit.



Abbildung 101: Vibrationsmikroskop 2109 Vorderseite

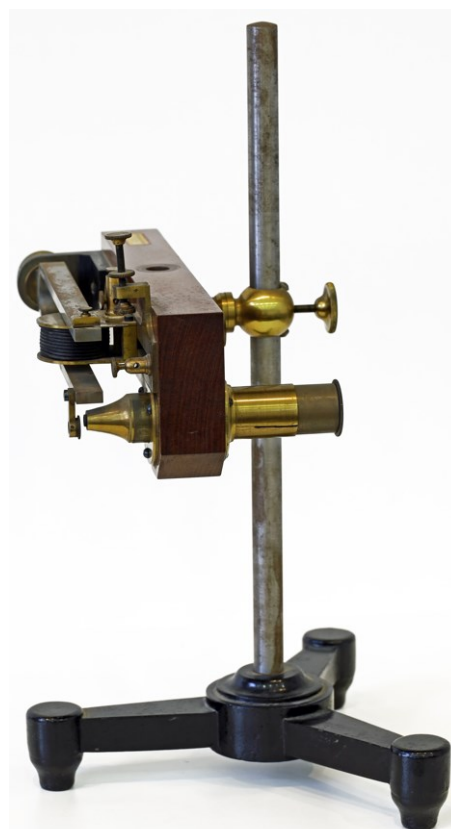


Abbildung 102: Vibrationsmikroskop 2109 seitliche Ansicht

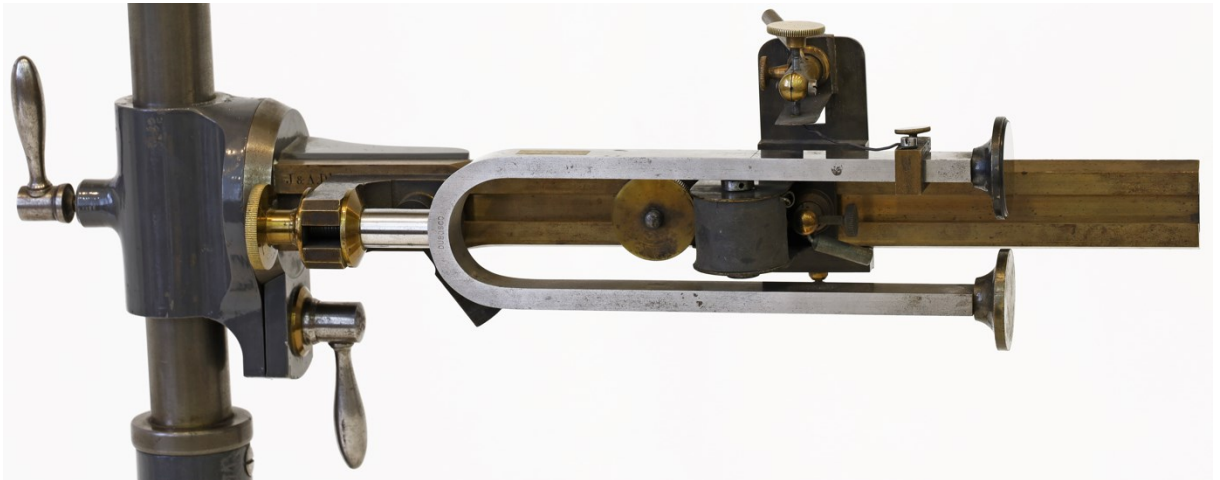


Abbildung 103: verspiegelte Stimmgabel V 72/3

Das Vibrationsmikroskop und die Stimmgabel werden richtig positioniert, in Abbildung 104 ist dazu der Versuchsaufbau zu sehen.

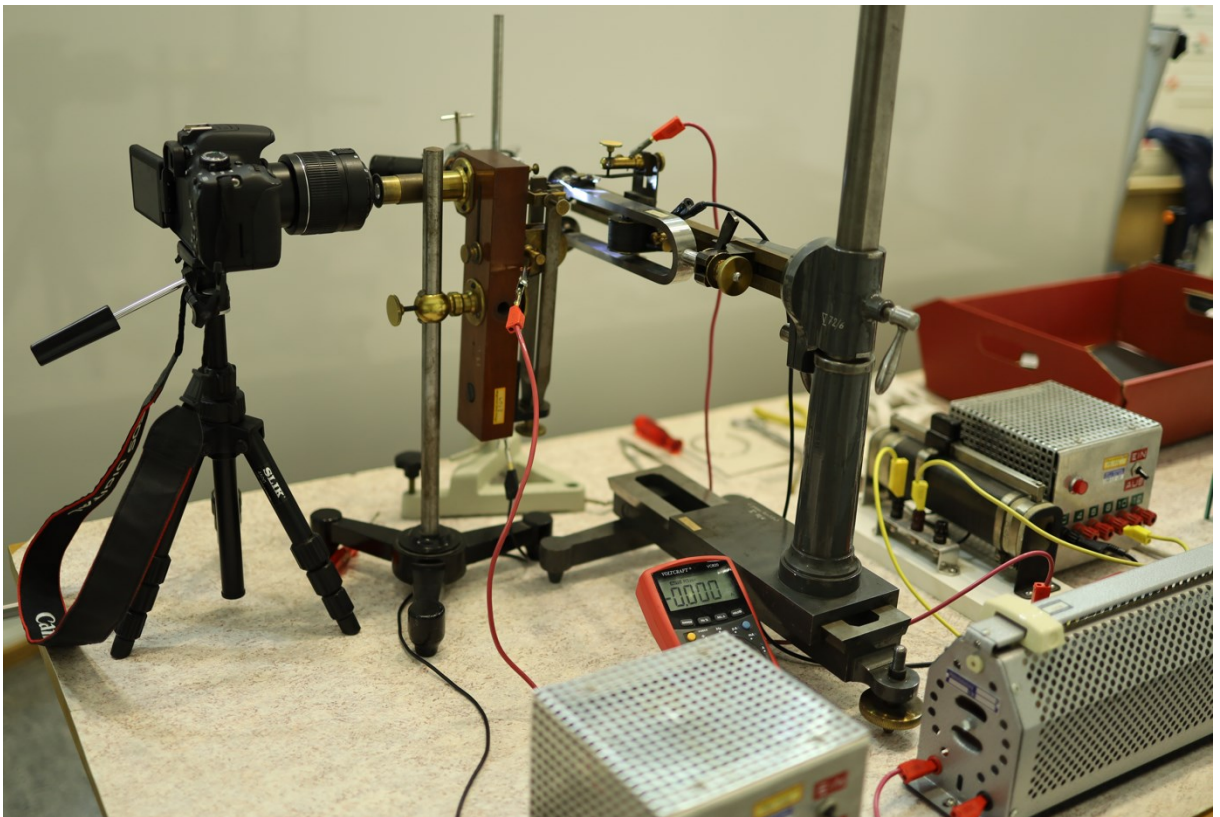


Abbildung 104: Versuchsaufbau Vibrationsmikroskop

Das Vibrationsmikroskop wird vertikal auf dem Stativ befestigt, die Stimmgabel horizontal, auf der eine Nähnadel befestigt wird. Die Inbetriebnahme stellt sich als schwierig heraus, da das Mikroskop mit 40-fach Vergrößerung ohne Grob-

und Feintrieb freihändig justiert werden muss. Es darf nur die Nadelspitze im Mikroskop zu sehen sein, deshalb ist es von großer Wichtigkeit, möglichst nur die Spitze der Nadel (Durchmesser 0,1 mm) mit einer Taschenlampe, die eine kleine Blende besitzt, zu beleuchten (Abbildung 105). Reflexionen in der Umgebung der Nadel werden durch schwarzes Papier unterbunden. Bei der Durchführung des Experiments wird der Raum total abgedunkelt, sodass wirklich nur die Nadelspitze zu sehen ist. Etwas Streulicht im Hintergrund ist unvermeidlich. Bei der Justierung ist es auch von Bedeutung, sich nicht am Tisch abzustützen, da man sofort eine Fehleinstellung erhält und die Nadelspitze nicht mehr im Zentrum ist. Die Vergrößerung des Mikroskops wurde durch die Vergleichsmethode mit Lineal in deutlicher Sehweite (25 cm) und einem 2 mm breiten Alu-Klotz vor dem Objektiv auf ca. 40-fach abgeschätzt (vgl. Ehringhaus und Trapp 1958, S. 119).

Die Stimmgabel V 72/3 wird mit einer Wechselspannung von 4 V betrieben, während das Vibrationsmikroskop 2109 eine Spannung von 8 V benötigt.



Abbildung 105: Beleuchtete Nadel

Die beiden Stimmgabeln werden elektromagnetisch angeregt. Die Stimmgabel am Vibrationsmikroskop schwingt horizontal mit 135 Hz, die Stimmgabel am dazugestellten Stativ schwingt vertikal mit 109 Hz.

Die Justierung ist perfekt, wenn im Mikroskop die Nadelspitze als heller Lichtpunkt sichtbar ist (Abbildung 106):



Abbildung 106: Nadelspitze im Mikroskop

Beginnt die horizontale Stimmgabel zu schwingen, entsteht aus dem Lichtpunkt eine vertikale Linie (Abbildung 107) bzw. eine horizontale Linie, wenn nur die vertikale Stimmgabel schwingt.:

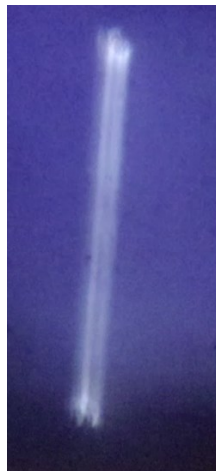


Abbildung 107: Vertikale Linie im Vibrationsmikroskop

Sobald die zweite Stimmgabel angeregt wird und diese zu schwingen beginnt, entstehen Lissajous-Figuren, deren Aussehen vom Frequenzverhältnis abhängt. Abbildung 108 zeigt relativ komplexe Figuren, da sich die Frequenzen der verwendeten Stimmgabeln wie $135/109 \approx 1,24$ verhalten:

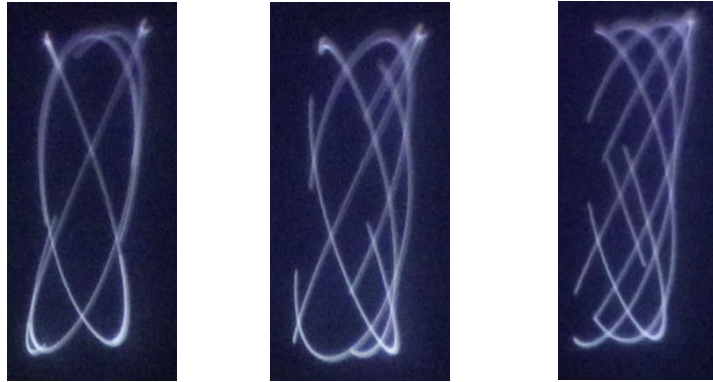


Abbildung 108: Lissajous-Figuren im Vibrationsmikroskop

Unter folgendem Link ist ein Video des Experiments zu finden:

<https://phaidra.univie.ac.at/o:1411604>

Mit Verwendung der Nähnadel ergeben sich viel schönere Lissajous-Figuren, als bei Betrachtung eines Drahtes oder eines spitzen dünnen Plättchens. Die Feineinstellungen mit dem Mikroskop erfordern Feingeschick und Geduld. Der Raum wird vollständig abgedunkelt, um die Lissajous-Figuren aufnehmen zu können. Geeignete Aufnahmegeräte sind Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv oder auch Handykamera.

4.12 Stahlzylinder zur Bestimmung der oberen Hörgrenze

Die acht unterschiedlich langen Stahlzylinder befinden sich in einer Holzkassette, in der sie durch einen Schaumstoff getrennt voneinander gelagert sind. Die Maße der Holzkiste betragen $25,5 \times 6 \times 25,5$ cm. Beigelegt ist ein Hammer zum Anschlagen der Zylinder. Wie in der Abbildung 109 zu sehen, sind die Zylinder jeweils mit zwei Nuten versehen, wo die Aufhängefäden positioniert werden. Die Zylinder haben je einen Durchmesser von $(20,0 \pm 0,1)$ mm. Die Nuten für die Aufhängefäden sind $(0,5 \pm 0,1)$ mm breit.



Abbildung 109: Holzkassette mit Stahlzylinder

In Tabelle 13 sind die acht Stahlzylinder mit deren Eigenschaften aufgelistet (Frequenzen sind in Hz angegeben, Längen auf $\pm 0,1$ mm; die zweite Zahl bei der Länge gibt die Abstände der Nuten an):

Tabelle 13: Eigenschaften der acht Stahlzylinder

Zylinder	Bez.	Länge (mm)	Nominelle Frequenz	gem. Frequenz Audacity	Gem. Frequenz Oszilloskop
1	SOL 5	121,6/72,1	6140	5 751	5 792
2	UT 6	105,3/62,6	8192	7559	7 614
3	MI 6	94,2/53,6	10230	9505	9288
4	SOL 6	86,1/51,5	12280	10928	11 030
5	UT 7	74,5/43,5	16384	14 135	14 280
6	MI 7	66,8/39,0	20460	17 414	17 280
7	SOL 7	61,0/35,6	24560	20 104	20 180
8	UT 8	52,6/30,5	32768	/	25 680

Die Zylinder wurden einzeln an den Nuten mit zwei Zwirnsfäden auf eine Stativstange gehängt und die Aufnahmegeräte für das Oszilloskop und das Audacity darunter bzw. daneben platziert (Abbildung 110 und 111).

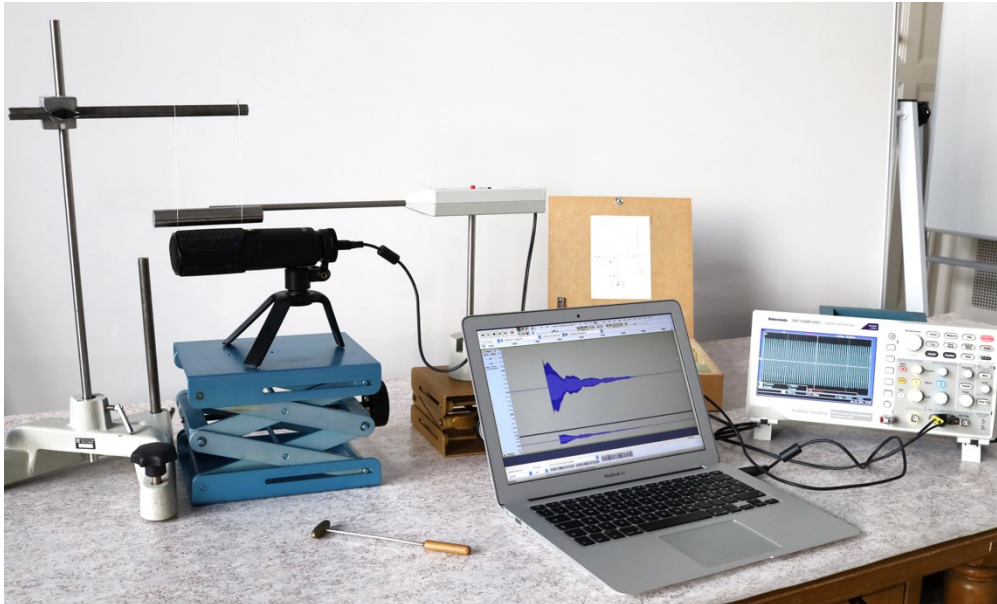


Abbildung 110: Versuchsaufbau zur Frequenzmessung der Stahlzylinder



Abbildung 111: Versuchsaufbau mit Stahlzylinder SOL 6

Im Folgenden werden die Ergebnisse einzelner Zylinder dargestellt:

- 1) Aufnahmen mit der Software Audacity (Abbildung 112) und dem Oszilloskop (Abbildung 113) lieferten folgende Ergebnisse des Zylinders SOL 5:

Audacity	5751 Hz
Oszilloskop	5792 Hz

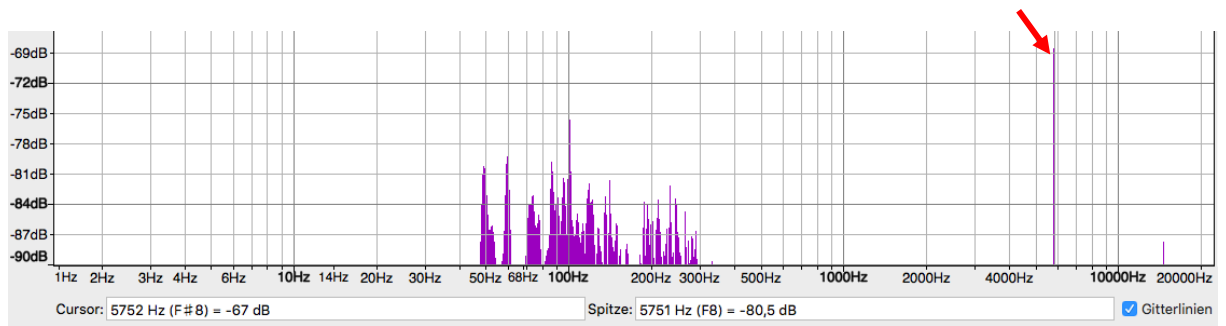


Abbildung 112: Spektrum des Zylinders SOL 5

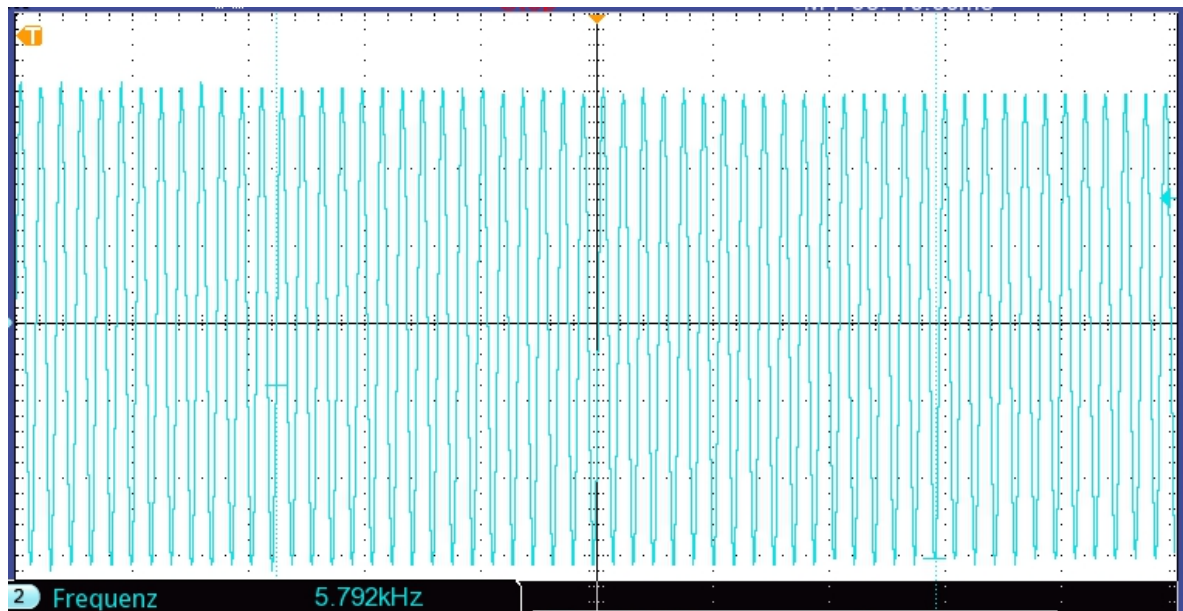


Abbildung 113: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder SOL 5

2) Die Ergebnisse des Zylinders UT 7:

Audacity	14150 Hz
Oszilloskop	14280 Hz

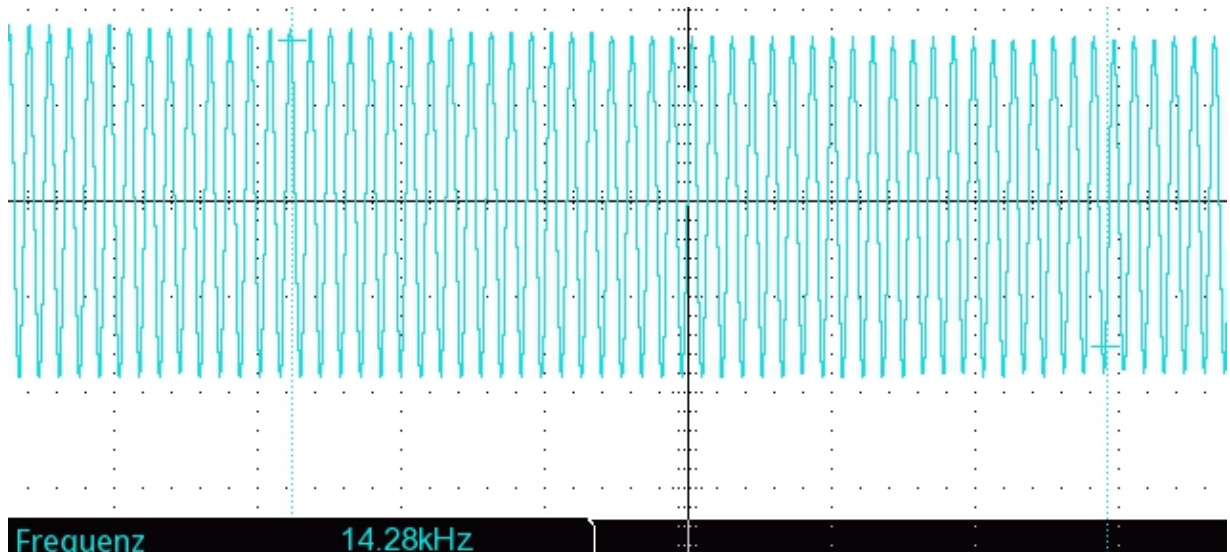


Abbildung 114: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder UT 7

Beim Stahlzylinder UT 7 stellte sich heraus, dass es sehr schwierig ist, einen Ton mit so hoher Frequenz zu hören.

3) Die Ergebnisse des Zylinders SOL 7:

Audacity	20104 Hz
Oszilloskop	20180 Hz

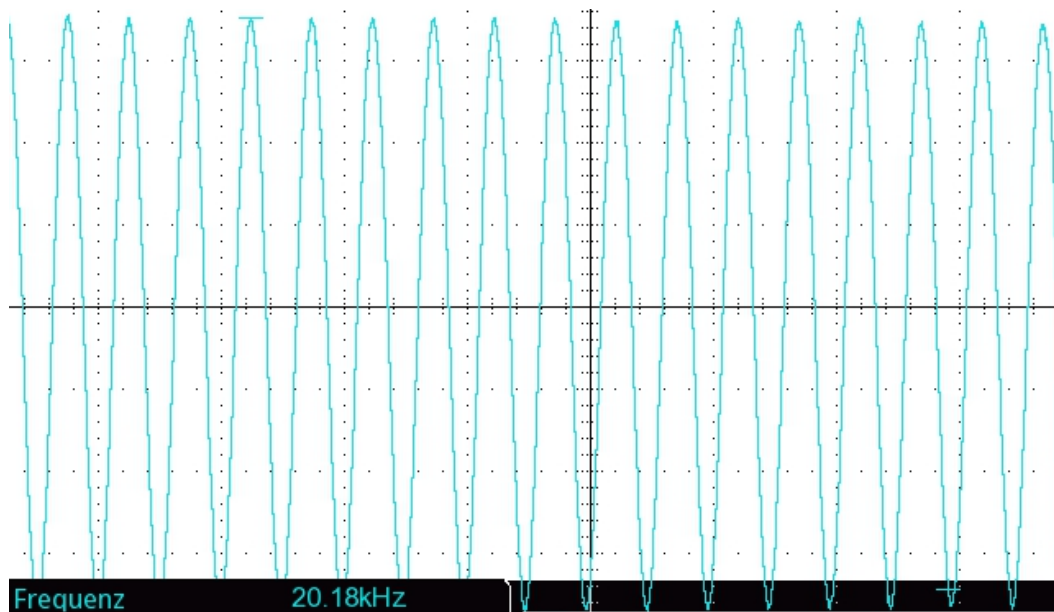


Abbildung 115: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder SOL 7

4) Der Zylinder UT 8, der die höchste Frequenz aufweist, konnte mit dem Audacity nicht mehr ausgewertet werden. Der Übertragungsbereich des

verwendeten Mikrofons liegt zwischen 20 Hz und 20 kHz, also dem Hörbereich des Menschen, und es ist somit für diese hohen Frequenzen nicht mehr geeignet.

Das Oszilloskop liefert einen Wert von 25 680 Hz.

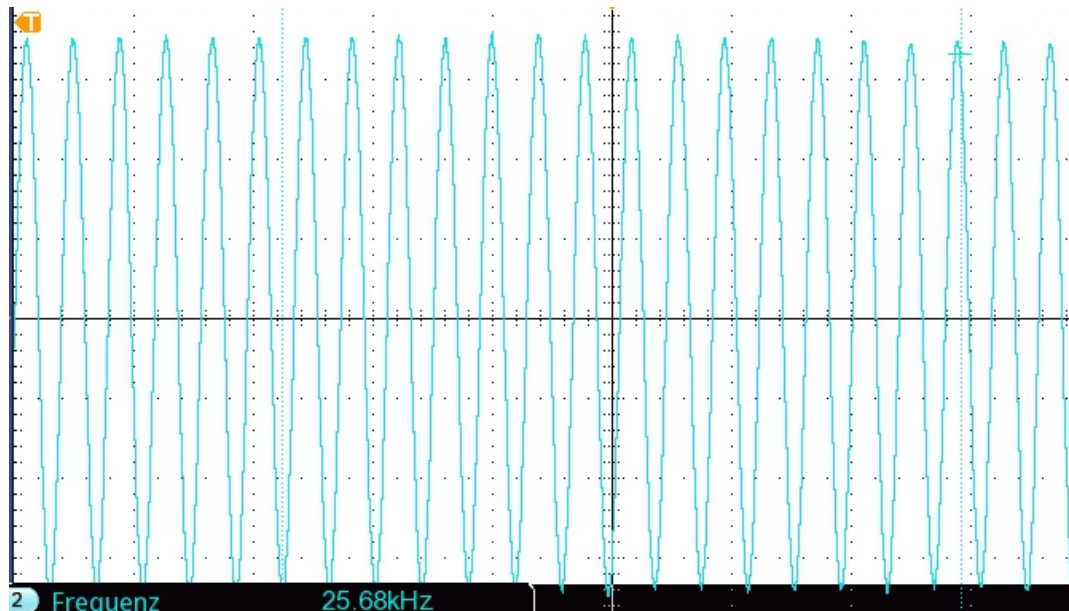


Abbildung 116: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder UT 8

Diskussion

Der Mensch hört im Durchschnitt Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 000 Hz. Die Stahlzylinder sind also ein gutes Werkzeug, um zu überprüfen, wie gut man noch hört. Am besten ist es, wenn man mit dem Zylinder mit der niedrigsten Frequenz beginnt und diese immer weiter steigert. Irgendwann gibt es einen Punkt, an dem kein Ton mehr gehört werden kann, sondern lediglich das Anschlagen des Zylinders bemerkt wird. Aus der Tabelle 13 ist zu entnehmen, dass sich die Frequenz vervierfacht, wenn die Länge des Zylinders halbiert wird.

Die Stahlzylinder erhalten mit dem Hammer einen kleinen Schlag auf die Stirnfläche. Dadurch werden nicht nur longitudinale Wellen, sondern auch transversale Wellen angeregt (Hirth, 2016, S. 163). Die Messanordnung in Abbildung 110 registriert die Transversalwellen (Biegewellen). Wird z.B. die Grundfläche des längsten Zylinders mit dem Hammer angeregt und das Universalmikrofon mit seinem Rohr genau an die gegenüberliegende Deckfläche des Zylinders gehalten, wird – so wie ergänzend festgestellt – eine Frequenz im

Bereich von 21 kHz gemessen. Diese Frequenz entspricht einer longitudinalen Welle im Stab der Länge L. Für deren Grundschiwingung gilt (Gobrecht, 1974, S. 512)

$$f = \frac{c}{2L}$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit für longitudinale Wellen ist. c berechnet sich aus

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E ist im vorliegenden Fall der Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Edelstahlzylinders. Mit $f = 21$ kHz und $L = 0,1216$ m folgt $c = 5103$ m/s, was ein durchaus üblicher Wert für Edelstahl ist (vgl. Hirth, 2016, S. 163). Für die Transversalwellen in einem runden Stab mit Radius a der Länge L mit freien Enden gilt die Beziehung (vgl. Wood, 1930, S.110) bzw. (vgl. Kinsler u.a., 2000, S. 84)

$$f = 3,0112^2 \frac{\pi \kappa}{8L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{mit } \kappa = \frac{a}{2}$$

In dieser Formel scheinen außer der Stablänge nur Konstanten des Stabmaterials und der Stabgeometrie auf. Für die vorliegenden Stahlstäbe zur Ermittlung der Hörgrenze bedeutet dies, dass die Schwingungsfrequenz dem reziproken Quadrat der Stablänge proportional sein muss und bei dieser Auftragung eine lineare Beziehung erhalten wird. Abbildung 117 bestätigt tatsächlich diesen linearen Zusammenhang: die nominellen Frequenzen der Stäbe lassen sich nahezu exakt aus der Stablänge berechnen, wobei $c = 5133$ m/s als naheliegender Wert der Schallgeschwindigkeit in Edelstahl benutzt wird (vgl. Hirth u.a., 2016, S. 166). Korrekturen der obigen Formel mittels Schermodul und Poissonzahl (vgl. Velasco u.a., 2010, S. 1429) haben nur einen geringen Einfluss und würden auch nur als eine konstante Zahl eingehen. Dass in Abbildung 117 die mit dem Oszilloskop gemessenen höheren Frequenzen etwas von der Linearität abweichen (rote Gerade), liegt offensichtlich an der abnehmenden Empfindlichkeit des verwendeten Universalmikrofons. Jedenfalls ist mit Abbildung 117 eindeutig gezeigt, dass die BiegeWellen in den Stahlstäben für den Hörtest ausschlaggebend sind.

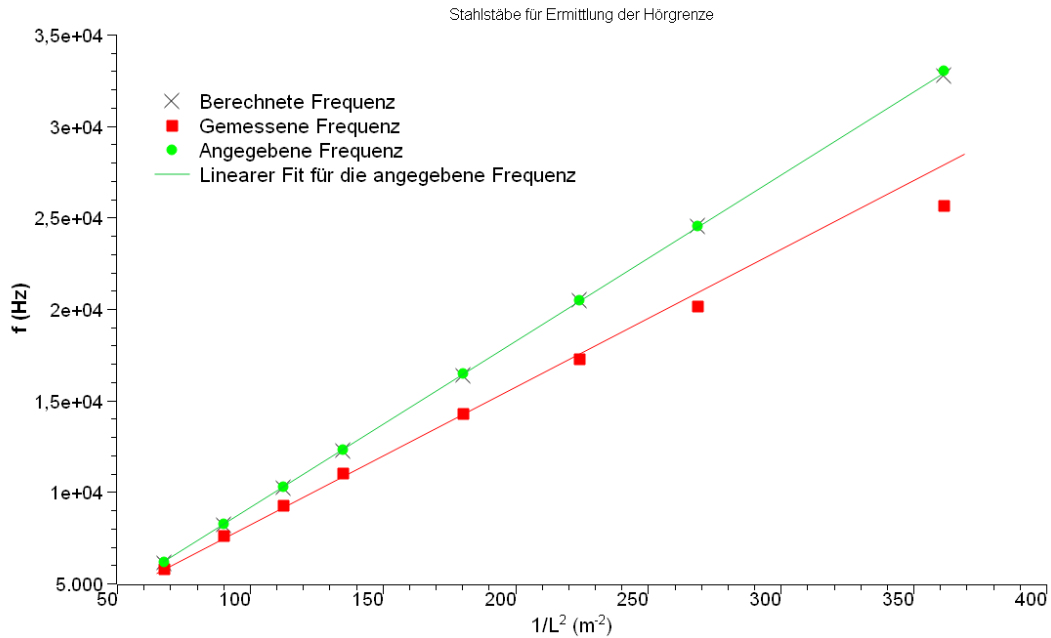


Abbildung 117: Diagramm Stahlstäbe für Ermittlung der Hörgrenze

5. Fazit

Das Untersuchen der vielen verschiedenen Stimmgabeln und Stimmgabelapparate der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien, war besonders spannend, wenn zugleich auch eine große Herausforderung. Erfreulicherweise ist schlussendlich beinahe jedes Experiment geglückt, auch wenn es nicht immer einfach war. Die Frequenzmessungen mittels Mikrofon und Oszilloskop sowie mittels der Software Audacity bestätigen die nominellen Frequenzen der untersuchten einfachen oder auch elektromagnetisch anregbaren Stimmgabeln. Einzig ein Experiment mit der Stimmgabeluhr konnte nicht durchgeführt werden, da hierfür das Ziffernblatt abgenommen werden hätte müssen und das hätte ein zu großes Risiko für einen etwaigen Schaden mit sich gebracht. Es ist wirklich bewundernswert, wie viel Geschichte erhalten bleibt. Sogar Geräte aus dem 19. Jahrhundert funktionieren einwandfrei und können jederzeit in Betrieb genommen werden. Das Vorhandensein der vielen Stimmgabeln in der physikhistorischen Sammlung hängt wohl auch mit dem Amt der Stimmgabelverifikation zusammen, welches Physiker der Universität Wien innehatten.

Das Experimentieren hat gezeigt, dass Geduld und Kreativität Grundvoraussetzung sind. Einige Versuche klappten nicht gleich beim ersten Mal und es musste auf kreative Lösungsansätze zurückgegriffen werden. So waren bei einigen elektromagnetisch anregbaren Stimmgabeln die elektrischen Kontakte zu improvisieren oder beim Vibrationsmikroskop führte die Spitze einer einfachen Nähnadel zum Erfolg.

Für die große Stimmgabelkassette von Rudolph Koenig konnte die Abhängigkeit der Frequenz vom reziproken Quadrat der Zinkenlänge gezeigt werden. Diese Beziehung gilt auch für die Stahlstäbe, welche zum Feststellen der Hörgrenze verwendet werden können. Schwebungen durch Anschlagen verschiedener Stimmgabeln ließen sich gut darstellen, ebenso die Bedeutung des Stimmgabelresonators. Eindrucksvoll war die Schwingung der 32 Hz Stimmgabel des Stimmgabelunterbrechers zu beobachten. Einen Höhepunkt der Arbeit stellte die Erzeugung von Lissajous-Figuren mittels zweier verspiegelter elektrisch angeregter Stimmgabeln und Laserstrahl dar. Noch interessanter und herausfordernder war die Erzeugung von Lissajous-Figuren mit dem Vibrationsmikroskop.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Briefpapier, Stimmgabelkommission (ÖZBP)	6
Abbildung 2: Überlagerung zweier Schwingungen annähernd gleicher Frequenz und Amplitude: Schwebungskurve (vgl. Lüders, 2017, S. 259)	10
Abbildung 3: Lissajous-Figuren für verschiedene Frequenzverhältnisse und unterschiedlichen Phasenverschiebungen (vgl. Demtröder, 2018, S. 342)	12
Abbildung 4: Stimmgabeln mit Zinnfuß (Tonometer)	16
Abbildung 5: Stimmgabeln mit hölzernen halboffenen Resonanzkörper	21
Abbildung 6: Akustik-Kasten der physikhistorischen Sammlung	23
Abbildung 7: Mikrofon mit den beiden Reglern	25
Abbildung 8: Eigenrauschen des Rode-Mikrofons, Regler befindet sich ganz links.	26
Abbildung 9: Eigenrauschen des Rode-Mikrofons, Regler befindet sich ganz rechts.	26
Abbildung 10: Universalmikrofon	27
Abbildung 11: Große Stimmgabel-Kassette von Rudolph Koenig	29
Abbildung 12: Stimmgabel mit Skala SI_2 bis UT_3	30
Abbildung 13: Spaltblenden für stroboskopische Untersuchungen	30
Abbildung 14: Frequenz vs. $1/L^2$	31
Abbildung 15: Stative zur Befestigung der Stimmgabel	32
Abbildung 16: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1}	32
Abbildung 17: Oszilloskopbild für die Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} ohne Gewichte und Endschrauben (10 Perioden).	33
Abbildung 18: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} mit den Endschrauben (Peak bei 50 Hz).	34
Abbildung 19: Oszilloskopbild der Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} mit den Massen für 32 Hz	35
Abbildung 20: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} 1 bei der Einstellung 40 Hz	35
Abbildung 21: Oszilloskopbild der Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} mit der Einstellung 42,5 Hz	36
Abbildung 22: Frequenzspektrum der Stimmgabel UT_{-1} - SOL_{-1} bei der Einstellung 42,5 Hz	36

Abbildung 23: Oszilloskopbild für die Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit Endschrauben	37
Abbildung 24: Frequenzspektrum der Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit Endschrauben	38
Abbildung 25: Oszilloskopbild für die Stimmgabel SI-2 – UT-3 mit der Einstellung VS 464	38
Abbildung 26: Frequenzspektrum der Stimmgabel SI2-UT3 mit der Einstellung VS 464	39
Abbildung 27: Sammlung der Stimmgabeln mit Zinnfuß	41
Abbildung 28: Versuchsaufbau für Messung von Schwebungen	42
Abbildung 29: Audacity: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 64 und Nr. 65	43
Abbildung 30: Oszilloskopbild: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 64 und Nr.65	43
Abbildung 31: Audacity: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 63 und Nr. 65	44
Abbildung 32: Oszilloskopbild: Schwebungsaufnahme mit Stimmgabeln Nr. 63 und Nr.65	44
Abbildung 33: Stimmgabeln V4, V11, V14 und V21	47
Abbildung 34: Elektromagnetisch angeregte Stimmgabel (Gobrecht, 1974, S. 519)	47
Abbildung 35: Elektromagnetische Stimmgabel 19/1027 mit 750 Hz	48
Abbildung 36: Versuchsaufbau für Betrieb der Stimmgabel 19/1027	49
Abbildung 37: Elektrische Schaltskizze für die Stimmgabel 19/1027	49
Abbildung 38: Oszilloskopbild: Unmittelbar nach Abschalten der elektromagnetischen Anregung der Stimmgabel mit 750 Hz.	50
Abbildung 39: Oszilloskopbild: Anregung durch Holzhammer der Stimmgabel mit 750 Hz	51
Abbildung 40: Frequenzspektrum: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel mit 750 Hz	51
Abbildung 41: Elektromagnetische Stimmgabel 19/2027 mit 500 Hz	52
Abbildung 42: Versuchsaufbau	52
Abbildung 43: Oszilloskopbild: Unmittelbar nach Abschalten der elektromagnetischen Anregung der Stimmgabel mit 500 Hz.	53

Abbildung 44: Elektromagnetische Stimmgabel 19/1028 mit 750 Hz	53
Abbildung 45: Versuchsaufbau für Stimmgabel 19/1028	54
Abbildung 46: Stimmgabel 10/1028 wird mit Draht und Krokoklemmen kontaktiert	55
Abbildung 47: Oszilloskopbild: Stimmgabel mit 750 Hz angeregt mit Holzhammer	55
Abbildung 48: Holzkassette mit „verspiegelten“ Stimmgabeln	56
Abbildung 49: Verspiegelte Stimmgabeln V 72/3 und V 72/4 (von links nach rechts)	57
Abbildung 50: Stimmgabel V72/4 auf Stativ befestigt	57
Abbildung 51: Versuchsaufbau für die Erzeugung von Lissajous-Figuren	58
Abbildung 52: Schaltskizze zum Versuchsaufbau Lissajous-Figuren	59
Abbildung 53: Oszilloskopbild: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 72/3	60
Abbildung 54: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 72/3	60
Abbildung 55: Oszilloskopbild: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 72/4	61
Abbildung 56: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 72/4	61
Abbildung 57: Stimmgabel 72/4: Frequenz in Abhängigkeit der Masse	61
Abbildung 58: Sinuswelle	62
Abbildung 59: Oszilloskopbild: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V72/2	63
Abbildung 60: Horizontale Linie - nur die horizontal schwingende Stimmgabel ist in Betrieb	64
Abbildung 61: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3	64
Abbildung 62: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3	64
Abbildung 63: Lissajous-Figur mit V 72/2 und V 72/3 mit ungleichen Amplituden	64
Abbildung 64: Oszilloskopbild: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/1	65
Abbildung 65: Lissajousfiguren mit Stimmgabel V 72/1 und V 72/2: die Kreisform wird nicht ganz erreicht	66

Abbildung 66: Lissajous-Figuren für die Überlagerung der Stimmgabeln V 72/1 und V 72/2. Die Figuren variieren mit einer kleinen Schwebungsfrequenz (ca. 0,4 Hz).	67
Abbildung 67: Stimmgabel V 72/1: Frequenz in Abhängigkeit der Zusatzmasse	68
Abbildung 68: Kurvenabschnitte abhängig von Belichtungszeit	68
Abbildung 69: Stimmgabel V 72/1 mit Zusatzmassen	69
Abbildung 70: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/1 mit einer Zusatzmasse von 167g	69
Abbildung 71: Stimmgabel V 72/2 mit Massestücken	70
Abbildung 72: Frequenzermittlung der Stimmgabel V 72/2 mit einer Zusatzmasse von 165g	70
Abbildung 73: Lissajous-Figuren während einer Schwebungsperiode	71
Abbildung 74: Schwebung erzeugt von Stimmgabel V 72/1 und V 72/2. Beide sind auf ca. 60 Hz justiert.	71
Abbildung 75: Elektromagnetische Stimmgabel V 49 mit improvisiertem Kontaktdraht	72
Abbildung 76: Versuchsaufbau V 49	73
Abbildung 77: Mechanische Anregung der Stimmgabel V 49	73
Abbildung 78: Elektromagnetische Anregung der Stimmgabel V 49	74
Abbildung 79: Stimmgabelresonator	75
Abbildung 80: Normalstimmgabel mit Resonator V 18	75
Abbildung 81: Versuchsaufbau mit Stimmgabelresonator	76
Abbildung 82: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel von V 18	77
Abbildung 83: Schwingungsverlauf, Stimmgabelresonator V 18	77
Abbildung 84: Spektrum: Stimmgabelresonator V 18 bei Resonanz	78
Abbildung 85: Vorderseite des Stimmgabelunterbrechers	79
Abbildung 86: Rückseite des Stimmgabelunterbrechers und zweite Stimmgabel	79
Abbildung 87: Versuchsaufbau Stimmgabelunterbrecher	80
Abbildung 88: Schaltskizze Stimmgabelunterbrecher	81
Abbildung 89: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel UT ₁	81
Abbildung 90: Spektrum: elektromagnetische Anregung der Stimmgabel UT ₁	82
Abbildung 91: Spektrum: mechanische Anregung der Stimmgabel UT ₋₁	83

Abbildung 92: Spektrum: elektromagnetische Anregung der Stimmgabel UT-1	83
Abbildung 93: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT-1 und Oszilloskop	
Vorderseite	84
Abbildung 94: Versuchsaufbau mit Stimmgabel UT-1 und Oszilloskop Rückseite	84
Abbildung 95: Oszilloskopbild: Stromunterbrechungen	85
Abbildung 96: Stimmgabeluhr V 44 mit den beiden Stativen	86
Abbildung 97: Ziffernblatt der Stimmgabeluhr	86
Abbildung 98: Rückseite der Stimmgabeluhr	87
Abbildung 99: Vibrationsmikroskop V 55 Vorderseite mit improvisiertem Unterbrecherkontakt	88
Abbildung 100: Vibrationsmikroskop V 55 Rückseite mit dem originalen Quecksilberkontakt	89
Abbildung 101: Vibrationsmikroskop 2109 Vorderseite	90
Abbildung 102: Vibrationsmikroskop 2109 seitliche Ansicht	90
Abbildung 103: verspiegelte Stimmgabel V 72/3	91
Abbildung 104: Versuchsaufbau Vibrationsmikroskop	91
Abbildung 105: Beleuchtete Nadel	92
Abbildung 106: Nadelspitze im Mikroskop	93
Abbildung 107: Vertikale Linie im Vibrationsmikroskop	93
Abbildung 108: Lissajous-Figuren im Vibrationsmikroskop	94
Abbildung 109: Holzkassette mit Stahlzylinder	95
Abbildung 110: Versuchsaufbau zur Frequenzmessung der Stahlzylinder	96
Abbildung 111: Versuchsaufbau mit Stahlzylinder SOL 6	96
Abbildung 112: Spektrum des Zylinders SOL 5	97
Abbildung 113: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder SOL 5	97
Abbildung 114: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder UT 7	98
Abbildung 115: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder SOL 7	98
Abbildung 116: Frequenzaufnahme mit Oszilloskop für den Zylinder UT 8	99
Abbildung 117: Diagramm Stahlstäbe für Ermittlung der Hörgrenze	101

Hinweis: Folgende Fotos wurden von Franz Sachslehner aufgenommen: 4-7, 10-13, 15, 16, 27, 28, 33, 35, 36, 41, 42, 44-46, 48, 51-58, 60-62, 65, 66, 68, 69, 71, 73, 76, 79-81, 85-87, 93-111.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestandsaufnahme Stimmgabeln mit Zinnfuß	15
Tabelle 2: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne Resonanzkörper	17
Tabelle 3: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln mit hölzernem Resonanzkörper	17
Tabelle 4: Bestandsaufnahme - Stimmgabeln ohne aktuelle Inventarnummer	22
Tabelle 5: Auflistung der Stimmgabeln in der Stimmgabelkassette. Die 2. Maßzahl bei der Größe ist ohne runden Fuß zu verstehen.	29
Tabelle 6: Größte Stimmgabel	40
Tabelle 7: Kleinste Stimmgabel	40
Tabelle 8: Für Schwebungen verwendete Stimmgabeln und deren nominelle Frequenzen	41
Tabelle 9: Eigenfrequenzen der verwendeten Stimmgabeln	42
Tabelle 10: Messeregebnisse der 3., 4. und 5. Schwebung	45
Tabelle 11: Untersuchen der Stimmgabeln V4, V11, V14 und V21	46
Tabelle 12: Auflistung der verspiegelten Stimmgabeln.	57
Tabelle 13: Eigenschaften der acht Stahlzylinder	95

Literaturverzeichnis

- Angetter, D., Martischnig, M. (2005): Biografien österreichischer [Physiker]innen: Eine Auswahl. Wien: Österreichisches Staatsarchiv. S. 71-73, S. 136-138. Abgerufen unter: https://www.zobodat.at/biografien/PHYSIKER_Biografien_Broschuere.pdf (02.01.2022)
- Bickerton, RC., Barr, GS. (1987): The origin of the tuning fork. In: Journal of the Royal Society Medicine, Volume 80, S. 771-773.
- Bundesgesetzblatt Österreich Nr. 152, 5. Juli 1950 Online-Zugriff: https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1950_152_0/1950_152_0.pdf (05.02.2022).
- Demtröder, W. (2018): Experimentalphysik: Mechanik und Wärme. 8. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Spektrum. S. 341-342.
- Deutsches Volksblatt (9.11.1892). Nr. 1384, S. 2. Normalstimmung. o. V. Abgerufen von: <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=dvb&datum=18921109&seite=14&zoom=33> (02.01.2022)
- Ehrenhaft-Nachlass: Unterlagen und Korrespondenzen der staatlichen Kommission zur Prüfung und Beglaubigung von Stimmgabeln. Wien 1885 bis 1938. Österreichische Zentralbibliothek für Physik (ÖZBP).
- Ehringhaus, A., Trapp, L. (1958): Das Mikroskop: Seine wissenschaftlichen Grundlagen und seine Anwendung. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart. S. 119.
- Feldmann, H. (1997): Geschichte der Stimmgabel. I: Erfindung der Stimmgabel, ihr musik- und naturwissenschaftlicher Verlauf. Bilder aus der Geschichte der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, präsentiert von Instrumenten aus der Sammlung des Deutschen Medizinhistorischen Museums Ingolstadt.

In: Laryngo-Rhino-Otologie 76, S. 116 - 122. Online-Zugriff: <https://europepmc.org/article/med/9172630> (31.12.2021).

- Feldmann, H. (1997): Geschichte der Stimmgabel. III: Auf dem Weg zur quantitativen Reintonmessung. Bilder von der Geschichte der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, vertreten durch Instrumente aus der Sammlung des Deutschen Medizinhistorischen Museums Ingolstadt. In: Laryngo-Rhino-Otologie 76, S. 428 - S. 434. Online-Zugriff: <https://europepmc.org/article/MED/9333296> (31.12.2021).
- Gobrecht, H. (1974): Bergmann Schafer Lehrbuch der Experimentalphysik. zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium. Band 1. Mechanik, Akustik, Wärme. 9. Verbesserte Auflage. Walter de Gruyter: Berlin, New York. S. 512 und S. 519.
- Greenslade Jr, Thomas B. (2018): Adventures with Lissajous Figures. Morgan & Claypool Publishers, San Rafael, S. 2-10.
- Gürkov, R., Krause, E. (2009): Ohr und Nase: Mit Weber und Rinne der Schwerhörigkeit auf der Spur. Münchener Medizinische Wochenschrift-Fortsch. Med. Nr. 23 (151. J.g.). S. 35-36.
- Hirth M., Gröber S. und Kuhn, J. (2016): Harmonic resonances in Metal Rods – Easy Experimentation with a Smartphone and Tablet PC. Phys. Teach. 54, S. 163-167.
- Hobel, L. (2020): Diplomarbeit Universität Wien: Experimente mit historischen akustischen Geräten. S. 32 und S. 89-93.
- „Information Assistent“ Verein für Informationsmanagement (Hrsg.): (2004): Österreichische Zentralbibliothek für Physik. Geschichte, Dokumente, Dienste. Wien: Algotprint Verlags AG. Online-Zugriff: <https://phaidra.univie.ac.at/o:937193> (16.02.2022). S. 9.

- Innsbrucker Nachrichten (16.11.1892), S. 5. Normalstimmung. o. V. Abgerufen von: <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=ibn&datum=18921116&seite=5&zoom=33> (02.01.2022)
- Karlik, B. & Schmid, E. (1982): Franz Serafin Exner und sein Kreis: Ein Beitrag zur Geschichte der Physik in Österreich. Wien: Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften. S. 32, 37, 28, 40.
- Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R., Coppens, Alan B., Sanders, James V. (2000): Fundamentals of Acoustics. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc. S. 84 und S. 528.
- Leybold Didactic GMBH (o. J.): Gebrauchsanweisung Universalmikrofon. S. 1.
- Leybold's Nachfolger, E. (1904): Einrichtungen und Apparate für den Physikalischen Unterricht sowie für Übungen im Praktikum nebst Literaturangaben und Gebrauchsanweisungen. Köln A. RH. S. 211.
- Linzer Tages Post (13.11.1892). Nr. 21, S. 4. Tagesneuigkeiten: Normalstimmung. o. V. Abgerufen von: <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=tpt&datum=18921113&seite=4&zoom=33> (02.01.2022)
- Lüders, K., Pohl, R. O. (2017): Pohls Einführung in die Physik. Band 1: Mechanik, Akustik und Wärmelehre. 21. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Spektrum. S. 60, S. 259 und S. 365.
- Mathelitsch, L., Granitzer P., Rumpf, K., Verovnik, I. (2018): Physik der Stimmgabeln: Stimmgabeln - einfach und verästelt. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. S. 71-73.
- o. V. (2021): Rode NT-USB Bedienungsanleitung. Online-Zugriff: <https://cdn1.ode.com/nt-usb-manual-de.pdf> (03.01..2021).

- Pantalony, D. (2009): *Altered Sensations. Rudolph Koenig's Acoustical Workshop in Nineteenth-Century Paris*. Dordrecht/Heidelberg/London/New York: Springer, S. xii.
- Pearce, JMS. (1998): Early days of the tuning fork. In: *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 65, S. 728. Online-Zugriff: (31.12.2021). DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/jnnp.65.5.728>
- Pinwinkler, A. (2020): Wilhelm Furtwängler, in: *Die Stadt Salzburg im Nationalsozialismus*. Online-Zugriff: https://www.stadt-salzburg.at/fileadmin/landingpages/stadtgeschichte/nsprojekt/strassennamen/biografien/furtwaengler_wilhelm-v1.pdf (27.11.2021).
- Reuter, C., Czedik-Eysenberg, I. (2017): Die facettenreiche Welt der Kammertöne. In: *Das Orchester* Dezember 2017. S. 10-12.
- Rosenberg, Ruth E. (2021): *Perfect Pitch: 432 Hz Music and the Promise of Frequency*. University of Illinois at Chicago. S. 143.
- Russel, D. A. (2020): The Tuning Fork: An Amazing Acoustics Apparatus. *Acoustics Today*. Vol. 16 (2). DOI: <https://doi.org/10.1121/AT.2020.16.2.48>. S. 48-54.
- Velasco, S., Roman, F. L. und White, J. A. (2010): A simple experiment for measuring bar longitudinal and flexural vibration frequencies. *American Journal of Physics* 78, S. 1429 – 1432.
- Weinhold, A. F. (1913): *Physikalische Demonstrationen. Anleitung zum Experimentieren im Unterricht an höheren Schulen und technischen Lehranstalten*. 5. Aufl., Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig. S. 327.

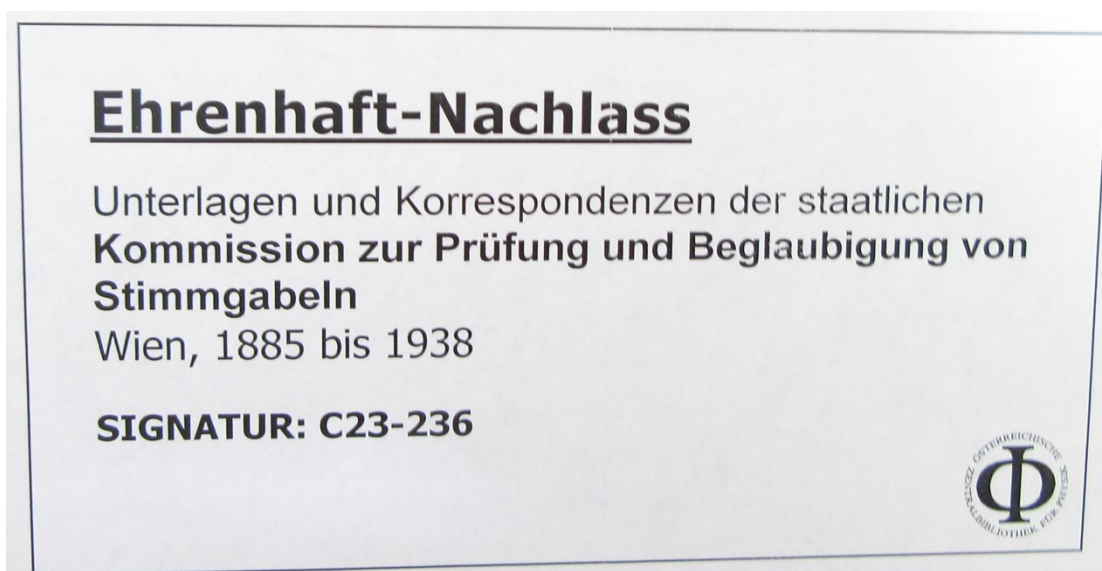
- Wiener Allgemeine Zeitung (21.11.1885), Nr. 2058, S. 5. Wissenschaft, Kultur und Literatur: Internationale Stimmton-Konferenz in Wien. o. V. Abgerufen unter: <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=waz&datum=18851121&seite=5&zoom=33> (02.01.2022)
- Wood, A. B. (1930): A Textbook of Sound, The Macmillian Company, New York. S. 110.

Anhang Ehrenhaft-Nachlass

Anhang 1: Felix Ehrenhaft Nachlass (ÖZBP)



Anhang 2: Felix Ehrenhaft Nachlass (ÖZBP)



Anhang 3: Protokoll (ÖZBP)

Ergebnis der Untersuchung des aus
65 Stingabeln bestehenden Tonometers nach Scheibler, befindlich im
physikalischen Cabinet der k.k. Universität in Wien.

Ausgangspunkt: Gabel Nr. 432

Die Vergleichenngen geschahen bei einer Temperatur von 17 bis 18.25 ° C.

Veränderungen der Tonhöhen der Gabeln durch die äussere Temperatur oder durch die Wärme-
abstrahlung des Untersuchenden, sowie Veränderungen welche die Temperatur auf die
Elasticität des Metalles ausübt, sind bei dieser Vergleichung nicht in Rücksicht
gezogen.

512, 344, 256 wurden von Weidmann abgelesen (oben wie!)
für die Gabel 432 wurde per Messung in Normalgabel 431.975 gebracht

Wien, im Mai 1902

Franz Kneischke
berf. Leinwand.

Anhang 4: Protokoll von Konstantinovsky (ÖZBP)

über die Erhebung der beiden vordere Ketten Erhebungs gabeln gegen die
vergoldete Normalgabel.

Die beiden Stimmungsgabeln wurden durch mehrfaches Königen (Festhalten) an
den Fingerringen und an dem Bogen auf dem Zustand gebracht, in welchem die
nachfolgenden Messungen ausgeführt wurden. Es wurde mit dem Beginn der Messun-
gen etwa 10-15 Minuten nach dem Feilen begonnen. Die Zeit wurde mit einer 1/50 Sek
Stoppuhr gemessen, wobei der gestaute Präzisions halber der Arm erst einige Male im Takt
der Schwingungen gezupft wurde, bevor angestoppt wurde. Der gleiche Vorgang war beim
Abstoppen eingehalten worden.

Es zeigte 10 Schwingungen gegen Normalgabel:

" 433 "

in 4.94, 5.02, 5.04, 4.98, 4.96, 5.00, 5.04, 5.04, 5.04, 5.00 Sek
4.92, 5.06, 5.00, 4.96, 4.92 Sek
im Mittel also in 4.980 Sek.

" 437 "

in 4.94, 5.02, 5.00, 5.02, 5.12,
5.00, 5.04, 5.04, 5.04, 5.00 Sek
im Mittel also in 5.022 Sek.

Demnach Schwingungen / pro Sek gegen Normalgabel:

1.991

2.008

Folglich zeigt die Gabel

(Schwingungen / Sek)

" 433 " taträchtlich	433.009 Doppel- oder	866.018 einfache
" 437 " "	437.008 " "	874.016 " "

Temperatur 18°C.

Wien, am 29. X. 23
Konstantinovsky

Anhang 5: Honorarnote (ÖZBP)

Bundesministerium für Unterricht
Leben, 1. Minoritenplatz Nr. 5

Zl. 2638/III-12

Wien, am 25. Februar 1924.

Honorar für Dr. Konstantinowsky,
Entlohnung des Mechanikers Zillner und
der Reinigungsfrau Glaser
z. Zl. 547 und 548 ex 1923.

An
das Präsidium der Stimmgabelverifikationskommission
in
W i e n .

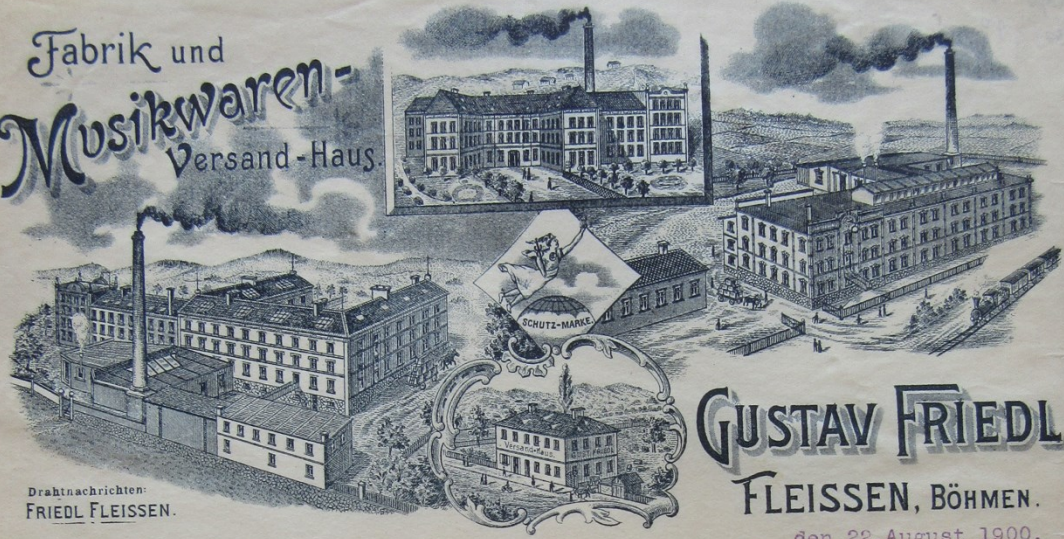
Antragsgemäß wird dem Privatdozenten Dr. Kurt K o n -
s t a n t i n o w s k y für die im Jahre 1923 bei der Verifika-
tion von Stimmgabeln verrichteten Agenden eine Remuneration von
500.000 K, dem Mechaniker Emerich Z i l l n e r und der Reini-
gungsfrau Barbara G l a s e r für ihre dortige Dienstleistung
eine Remuneration von je 100.000 K bewilligt.

Hievon sind die Genannten mit dem Beifügen in Kenntnis
zu setzen, dass die erwähnten Beträge gleichzeitig im Wege der
Postsparkassa an sie zur Auszahlung gelangen.

Für den Bundesminister:
Petrin.
Für die Richtigkeit
der Ausfertigung:
J. Schmeider

Anhang 6: Fabrik und Musikwaren Versand-Haus, Gustav Friedl (ÖZBP)

Fabrik und Musikwaren-Versand-Haus.



GUSTAV FRIEDL
FLEISSEN, BÖHMEN.
den 22. August 1900.

Hochlöbliches physikalisches Cabinet

W i e n

9. Türkenstrasse 3.

Im Besitze Ihrer gesch. Karte vom 17. d. M. beehre ich mich mitzutheilen, dass die Stimmgabel mit 888 Schwingungen angefertigt wurde und auf die Richtigkeit der Schwingungen geprüft werden soll. Die Aufschrift des Etais (Normal 870) hat keinen Bezug auf die Stimmgabel.

Joh. v. Eysenmann

Ueber die Richtigkeit der Schwingungen der Stimmgabel bitte ich mir gef. einen Beglaubigungsschein auszustellen.

Für die allfallsigen Portoauslagen lege ich einen Betrag von Kr. --.70 h. in Briefmarken bei und bitte ich die weiteren Kosten per Nachnahme zu erheben.

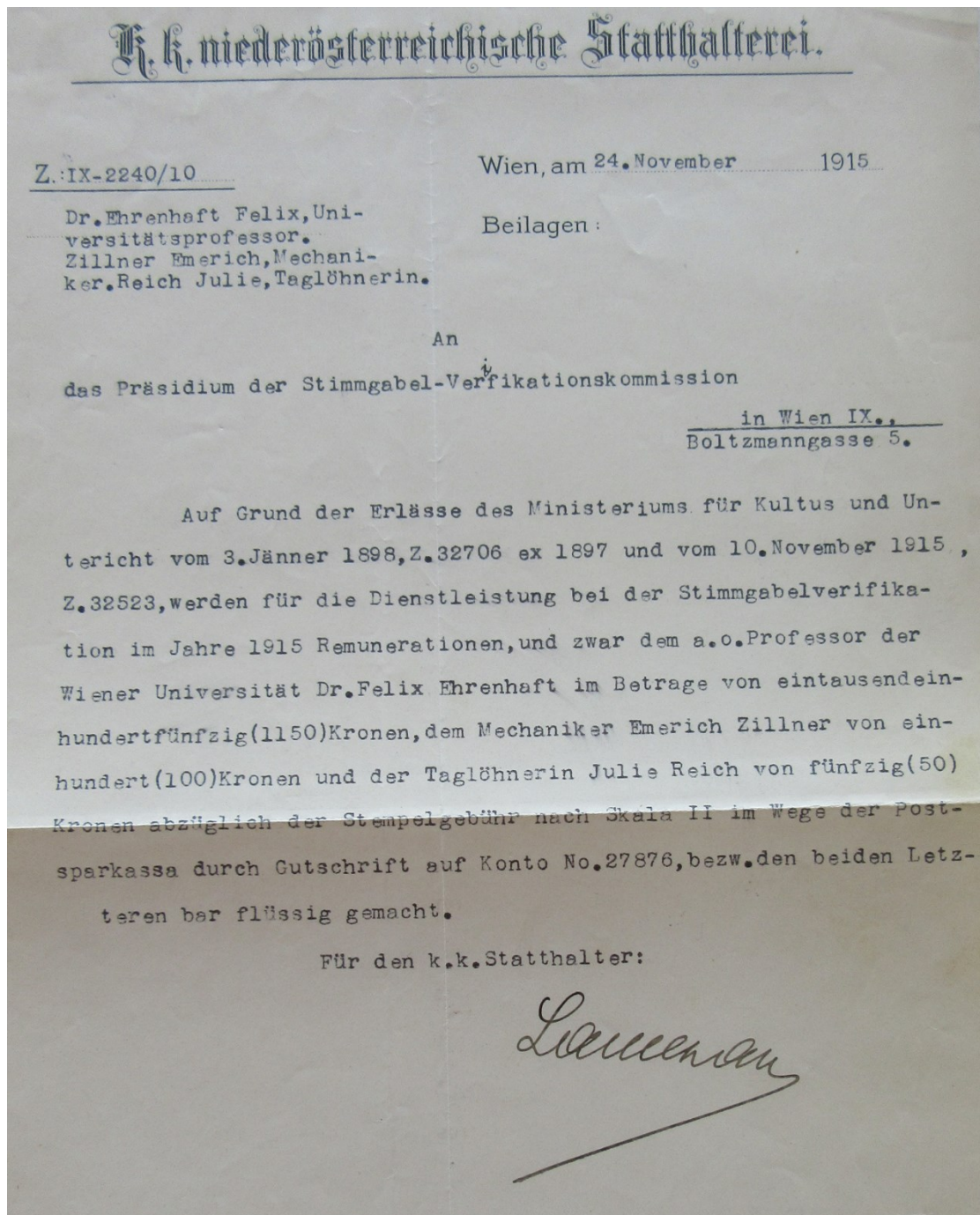
Mit der Bitte die Ihnen verursachten Mühen gütigst zu entschuldigen, sehe ich einer baldigen Einsendung mit Vergnügen entgegen und zeichne mit bestem Dank

Hochachtungsvoll
G. Gustav Friedl

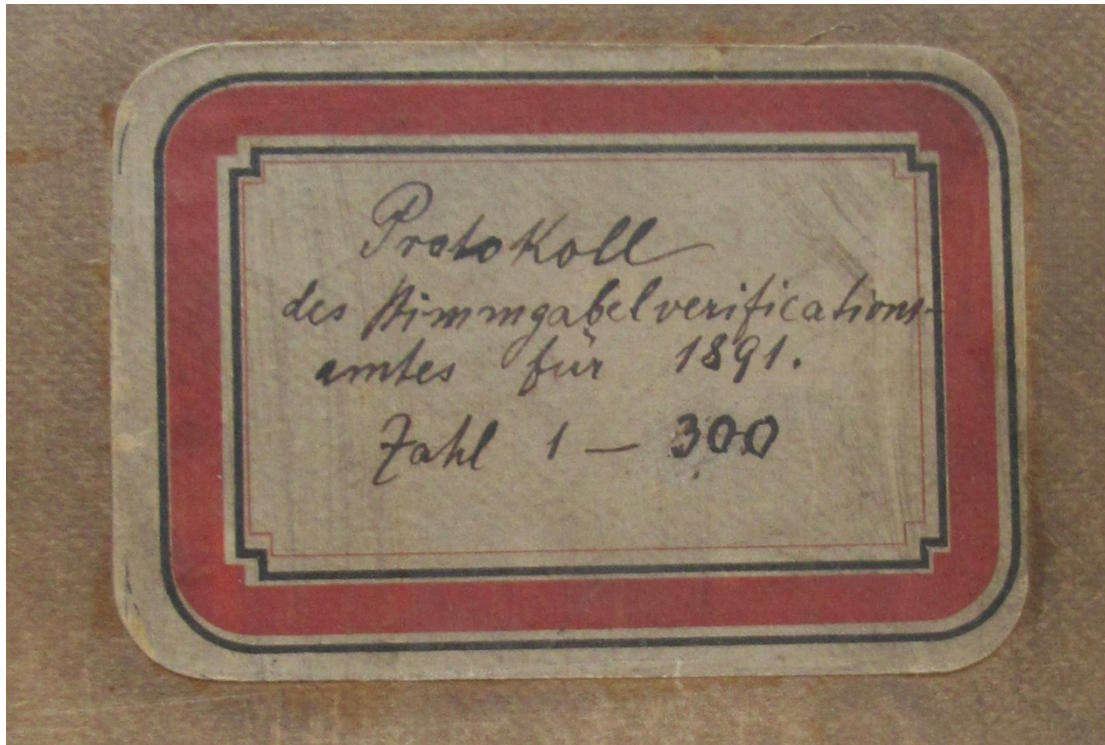
--.70 h. in Briefmarken.

Drahtnachrichten:
FRIEDL FLEISSEN.

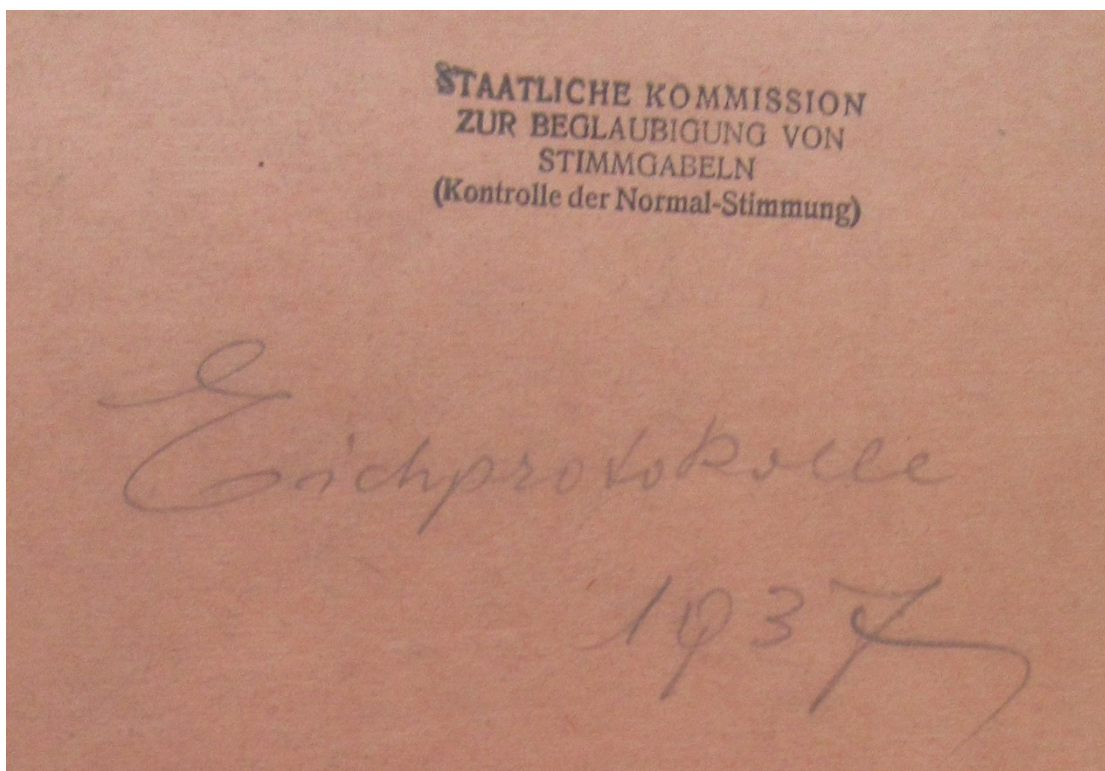
Anhang 7: Honorar, Präsident Felix Ehrenhaft (ÖZBP)



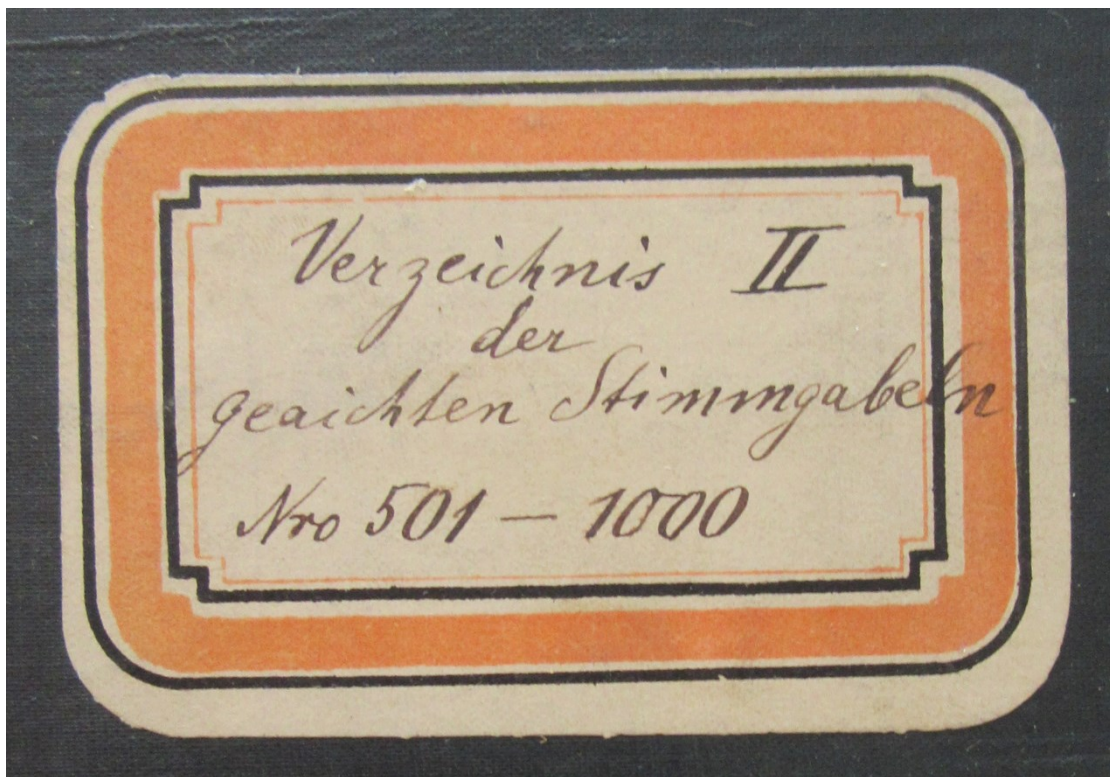
Anhang 8: Protokoll des Stimmgabelverificationsamtes für 1891. Stimmgabeln 1 – 300 (ÖZBP)



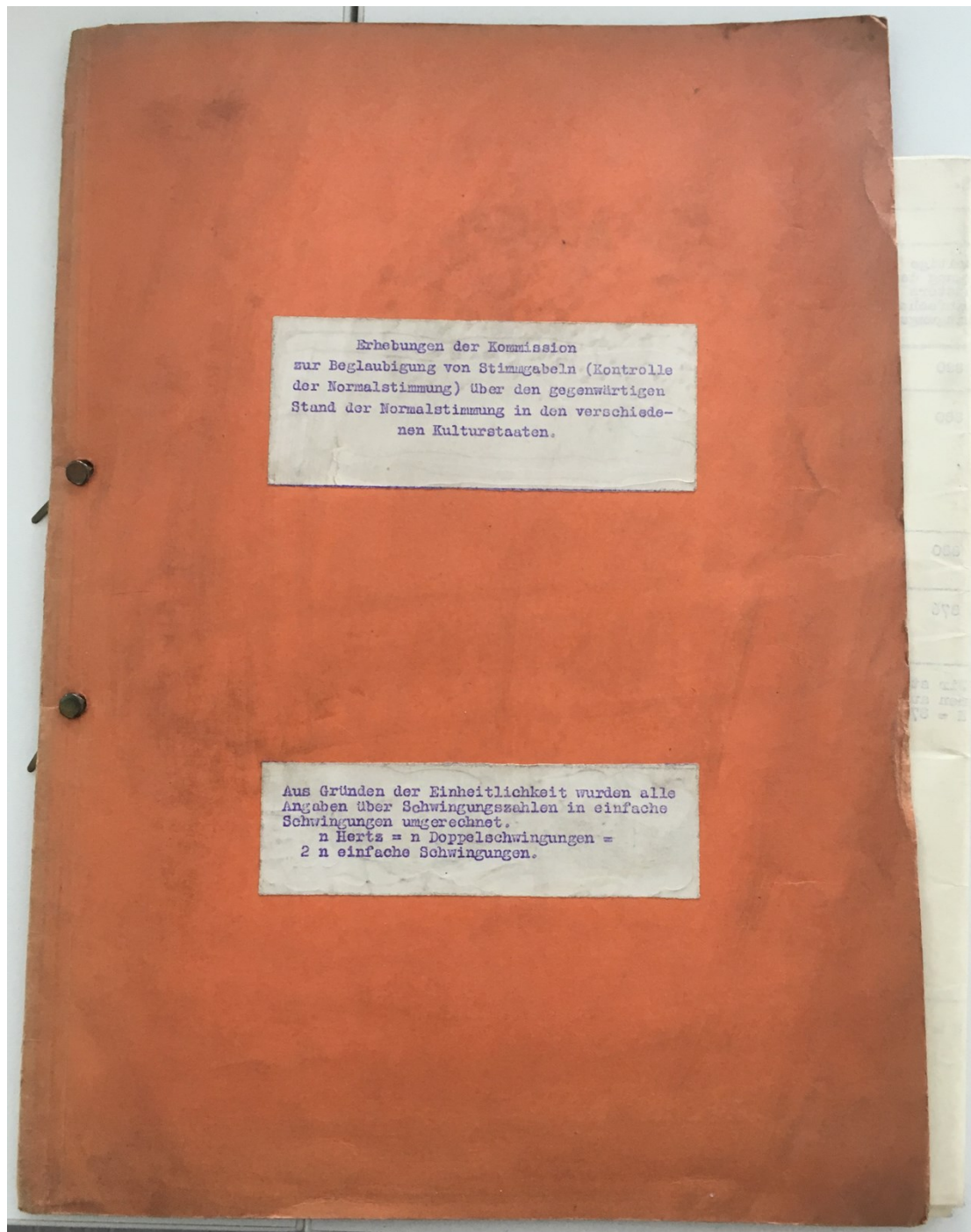
Anhang 9: Eichprotokolle 1937 (ÖZBP)



Anhang 10: Verzeichnis II der geeichten Stimmgabeln, Nr. 501-1000 (ÖZBP)



Anhang 11: Erhebung über den gegenwärtigen Stand der Normalstimmung in den Kulturstaaten (ÖZBP)



Erhebungen der Kommission
zur Beglaubigung von Stimmgabeln (Kontrolle
der Normalstimmung) über den gegenwärtigen
Stand der Normalstimmung in den verschiede-
nen Kulturstaaten.

Aus Gründen der Einheitlichkeit wurden alle
Angaben über Schwingungszahlen in einfache
Schwingungen umgerechnet.
 n Hertz = n Doppelschwingungen =
 $2 n$ einfache Schwingungen.

Anhang 12: Brief von Ehrenhaft mit Bitte zur Diskussion der Wiedereinführung des Normalstimmtons (ÖZBP)

STAATLICHE KOMMISSION ZUR BEGLAUBIGUNG VON STIMMGABELN
(KONTROLLE DER NORMALSTIMMUNG)

Telephon Nr. A-16-0-48
A-19-0-35

WIEN, am 8. Mai 1937.
IX., Strudlhofgasse Nr. 2a
(Physikal. Institut d. Univ.)

Präsident:
Dr. F. Ehrenhaft, o. ö. Univ.-Prof.

Ständiger Vertreter d. B.-Min. f. Unterr.
Dr. K. Thomasberger, Hofrat.

Mitglieder:
A. Hutterstrasser, Komm.-Rat, Klavierfabrikant.
O. Kabasta, Prof., Dir. d. musik. Abtlg. d. Ravag.
Dr. K. Kobald, Prof., Präsi. d. Staatsakad. f. Musik u. darst. Kunst.
T. Kotykiewicz, Harmoniumfabrikant.
J. Krips, Kapellmeister d. Staatsoper.
Dr. A. Lampa, em. o. ö. Univ.-Prof., Hofrat.
Dr. J. Ledtchaler, Prof., Abt.-Leiter d. Staatsakad. f. Musik u. darst. Kunst.
Dr. F. Weingartner, Prof., Gen.-Musikdir.
A. Wunderer, Prof., Reg.-Rat.

Mit den Agenden betraut:
Dr. G. Grotzinger, Univ.-Ass.

Zahl 417 ex 37 Ra.

Ihrer Hochwohlgeboren !

Wie Ihnen bekannt sein dürfte, hat sich die Staatliche Kommission zur Kontrolle der Normalstimmung in der letzten Zeit wieder intensiv mit dem Problem beschäftigt, ob und auf welche Weise die in Oesterreich hinsichtlich der Höhe des Normalstimmtones derzeit herrschenden Ungleichheiten und die damit verbundenen Unzukömmlichkeiten beseitigt werden könnten. Dabei schwebte der Kommission als Endziel ihrer Aktion die allgemeine Wiedereinführung des international festgelegten Normalstimmtones mit $\bar{a} = 870$ einfache Schwingungen vor, wofür nach Abschluss wissenschaftlicher und praktischer Vorarbeiten durch legislatorische Maßnahmen und durch entsprechende Novellierung der Ministerialverordnung aus dem Jahre 1891 die Grundlagen geschaffen werden sollen.

Bei einer im Zuge dieser Aktion kürzlich in der Staatsoper abgehaltenen Orchesterprobe hat sich herausgestellt, daß die Meinungen der Fachleute über die Frage der Wiedereinführung der alten Normalstimmung in Oesterreich geteilt sind und daß die Rückkehr zu dem durch Verordnung festgelegten Normal- $\bar{a}$ möglicherweise auch technische Schwierigkeiten hinsichtlich der Adaptierung der Blasinstrumente, insbesondere bei den Holzbläsern, begegnen könnte.

Es erscheint daher der Kommission unbedingt notwendig, zu einer endgültigen Klärung dieser Fragen eine Aussprache mit einer Reihe von Komponisten, Dirigenten und Chorleitern in Wien und Oester-

o/.

reich, die über die nötigen praktischen Erfahrungen verfügen, abzuführen.

Diese Besprechung ist für den 13. Mai 1937, präzise 4 Uhr nachmittags in den Räumen der Staatlichen Kommission zur Kontrolle der Normalstimmung, Wien IX., Straußhofgasse 2a, 3. Stock (Gebäude der Physikalischen Institute der Universität Wien) anberaumt.

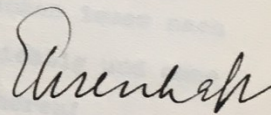
Namens der Kommission beehre ich mich, Euer Hochwohlgeboren zu dieser Besprechung höflichst einzuladen und darf wohl mit Bestimmtheit damit rechnen, daß Euer Hochwohlgeboren im Hinblick auf die Bedeutung und Wichtigkeit dieses Problems für das gesamte österreichische Musikwesen daran teilnehmen und auch Ihre Meinung zu den zur Debatte zu stellenden Fragepunkten äußern werden.

Zu Ihrer Information legen wir ein Elaborat bei, das wir Sie vor der Sitzung zur Kenntnis zu nehmen bitten, da sich hiedurch die Debatte wesentlich vereinfacht.

Mit dem Ausdrucke vorzüglichster Hochachtung

Mit dem Agenden betraut:

der Präsident:



Groetzinger.

Ehrenhaft.

1 Elaborat.

Anhang 13: Schreiben unter Dirigenten (ÖZBP)

Abschrift.

Dr. Wilhelm Furtwängler

z. Zt. London, S.W.1, den 18 Mai 1937

Hyde Park Hotel

Sehr geehrter Herr Professor Wunderer,

Eine Anfrage aus Wien wegen der Schwingungshöhe der Stimmung habe ich bisher noch nicht bekommen, doch kann sie, da ich mich gegenwärtig auf Reisen befinde, mich nicht erreicht haben. Ich gestatte mir deshalb Ihnen zu antworten. Ich bin durchaus der Meinung, dass 870 Schwingungen das Richtige sind und unserem, speziell dem österreichischen und deutschen Musikempfinden mehr entspricht, als eine höhere Schwingungszahl, wie sie in Amerika üblich ist.

Mit besten Empfehlungen

Ihr ergebener

Dr. Wilhelm Furtwängler

Herrn Professor Alexander Wunderer,
Wiener Philharmoniker, Wien,
Canovagasse 4.