



Forschungszentrum
Ultraschall

HOME
HOCHSCHULE
MERSEBURG^{FH}

University of
Applied Sciences

Zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

vorgelegte Abschlussarbeit zum Thema:

Untersuchung von Mikrodrehteilen und ihrer spektralen Eigenschaften in der Ultraschallprüfung

vorgelegt von: Dustin Hoffmann

Betreuer:
Prof. Dr. rer. nat. Klaus-Vitold Jenderka
(Hochschule Merseburg)

Dr. rer. nat. Ralf Steinhausen
(Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle)

Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit (B. Eng.) von Herrn Dustin Hoffmann

Thema: **Untersuchung von Mikrodrehteilen und ihrer spektralen Eigenschaften in der Ultraschallprüfung**

Betreuer: Prof. Klaus-V. Jenderka, Hochschule Merseburg
 Dr. Ralf Steinhausen, Forschungszentrum Ultraschall, Halle

Aufgabenstellung

Die Ultraschalluntersuchung bietet viele Anwendungsmöglichkeiten, die weit über die allgemein bekannten Methoden, wie Wanddickenmessung oder medizinische Bildgebung hinaus gehen. Letztere Methoden verwenden fast ausschließlich einen Ultraschallpuls um eine Echolot-Untersuchung durchzuführen. Dabei werden Grenzschichten auf Grund der akustischen Unterschiede abgebildet und lassen sich bei bekannter Schallgeschwindigkeit bezüglich ihrer Größe und Tiefe vermessen und bildgebend darstellen. Eine deutlich andere Anwendung des Ultraschalls ist es, die mechanische Welle und ihrer Möglichkeit von Interferenz- und Resonanzerscheinungen zu verwenden, um Rückschlüsse auf Probeneigenschaften gewinnen zu können. In der Arbeit soll untersucht werden, in wie weit sich die physikalischen Eigenschaften von kleinen Drehteilen (Halbzeuge für diverse Maschinenteile, wie Wellen und Ventileinsätze) anhand von Resonanzen abbilden lassen, um die Messung im Rahmen der Qualitätssicherung während der Produktion einsetzen zu können. So ist bekannt, dass bestimmte Eigenschwingungen von der Dimension abhängen. Ein längerer Stab hat erwartungsgemäß eine tiefere Eigenfrequenz der Längsschwingung als ein kürzerer. Es sollen verschiedene Messaufbauten für die Messung von Eigenschwingungen (Längs- und Biegeschwingungen) erprobt und charakterisiert werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei insbesondere auf der Reproduzierbarkeit der Messungen einerseits und auf der Zuordnungen der auftretenden Resonanzen zu reinen Eigenschaften des Prüflings und denen des Messaufbaus. Außerdem sollen Aussagen über die prinzipielle Prüfbarkeit von unterschiedlichen Abweichungen und Fehler getroffen werden.

Schwerpunkte

- Charakterisierung des Messaufbaus bzgl. der eingeleiteten Kräfte und der Reproduzierbarkeit
- Test verschiedener Messaufbauten für die Messung von Längs- und Biegeschwingungen
- Untersuchung des Einflusses der Anregungsformen (Puls-, cw- und Sweep-Anregung)
- Optimierung des Messaufbaus
- Erstellung von großen Datensätzen mit unterschiedlichen Messbedingungen für die Bereitstellung zum Postprocessing mittels KI

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Reflexion und Transmission an Grenzflächen	3
2.2	Schallschwächung	5
2.3	Schwingungsmoden	6
2.4	Schwingungsformen dünner Stäbe	7
2.4.1	Längsschwingung	7
2.4.2	Torsionsschwingung	8
2.4.3	Biegeschwingung	9
2.4.4	Schlussfolgerung für zylindrische Stäbe	9
3	Durchführung	11
3.1	Stabtypen	11
3.2	Messaufbau	13
3.3	Das Anregungssignal	15
3.4	Auswertung einer Messung	17
4	Maßnahmen und Experimente zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit	21
4.1	Einfluss der Messapparatur	23
4.2	Schräglage	24
4.3	Schwankungen der einspannenden Kraft	26
4.4	Probleme bei der Anregung zur Biegeschwingung	28
4.5	Schlussfolgerung	31
5	Zusammenfassung der Messergebnisse	33
6	Test mit verändertem Messaufbau	39
7	Fazit	43
	Literaturverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundschwingung und die ersten beiden Oberschwingungen einer Saite [4]	7
3.1	links: Stabhalterungen für Biegeschwingungen(vorn) und Längsschwingungen(hinten); rechts: Verschiedene Stabtypen	11
3.2	PPS während des Wiegens der Z-Achse; unten im Bild: Vorrichtung an der später der Schallempfänger befestigt wird, der Schallsender befindet sich bereits an der Z-Achse; links im Bild: Schalter zum Fixieren/Lösen der drei Achsen (X- und Y-Achse im Moment fixiert)	14
3.3	Verlauf eines Sweep-Signals	16
3.4	typisches A-Bild; aufgenommen für den Standardstab einer Länge von 45 mm, angeregt zur Longitudinalschwingung, mit einer Pulsdauer von 20 ms und einer Frequenzspanne von 0 bis 750 kHz	17
3.5	Dem vorangegangenen A-Bild zugehörige FFT	19
4.1	Fünf Wiederholungsmessungen des 43 mm Stabes mit einem Sweep von 10 bis 750 kHz Frequenzspanne und 20 ms Pulsdauer, angeregt zur Längsschwingung	22
4.2	Vergleich einer Messung ohne Stab (nur die Halterungen für die Längsschwingung) mit einer Messung mit einem 47 mm Stab, jeweils bei einer Gewichtskraft der Z-Achse von 150 g und einem Sweep von 10 bis 800 kHz	23
4.3	Vergleich der Spektren desselben Stabes, eingespannt in unterschiedlichen Neigungswinkeln zu den Wandlerfrontflächen	25
4.4	Stabhalterung für die Biegeschwingung	28
4.5	Ausschnitt einer Messung zur Reproduzierbarkeit der Biegeschwingung, gemessen mit dem 45 mm Stab, Pulsdauer: 40 ms, Frequenzspanne: 10 bis 800 kHz, Gewicht der Z-Achse: 150 g	29
4.6	Einfluss des horizontalen Abstandes zwischen Sender und Empfänger a , 5 bis 150 kHz Sweep mit einer Pulsdauer von 20 ms	31
5.1	mögliche Eigenschwingung der Stäbe	34
5.2	höhere Schwingungsmode	36
6.1	neuer Versuchsaufbau mit Klopfer, Mikrophon und zentraler Halterung	40
6.2	Vergleich der Spektren, aufgenommen mit dem neuem Versuchsaufbau	41

Tabellenverzeichnis

2.1	Reflexion und Transmission an einer Grenzfläche	3
2.2	Einfluss der relativen Abmessungsänderungen auf die relative Eigenfrequenzänderung $\frac{\Delta f}{f_0}$	10
3.1	Eigenfrequenzen f_n und die ersten beiden höheren Harmonischen für den Standardstab in allen drei Längen bei den drei unterschiedlichen Schwingungsarten	12
4.1	Schwankung der einspannenden Kraft	27
5.1	Überprüfung möglicher Eigenfrequenzen des Standardstabes	35
5.2	Überprüfung möglicher höherer Schwingungsmoden des Standardstabes	36
6.1	zu erwartende Schwingungen der Stäbe für den neuen Versuchsaufbau	40

Symbolverzeichnis

ρ_1	Dichte des Mediums 1
ρ_2	Dichte des Mediums 2
c_1	Schallgeschwindigkeit im Medium 1
c_2	Schallgeschwindigkeit im Medium 2
Z_1	Schallkennimpedanz des Mediums 1
Z_2	Schallkennimpedanz des Mediums 2
I_e	Schallintensität der einfallenden Welle
I_t	Schallintensität der transmittierten Welle
I_r	Schallintensität der reflektierten Welle
R	Reflexionsanteil
T	Transmissionsanteil
I	Schallintensität
d	Länge einer von einer Schallwelle durchlaufenen Strecke
α	Abschwächungskoeffizient (bezogen auf Schalldruck)
α_I	Abschwächungskoeffizient (bezogen auf Intensität)
λ	Wellenlänge
l	Länge eines Stabes
f	Frequenz einer Schallwelle
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle
L	Länge des schwingungsfähigen Systems
B	Breite des schwingungsfähigen Systems
H	Höhe des schwingungsfähigen Systems
n	Schwingungsordnung (1, 2, 3, ...)
E	Elastizitätsmodul
Δf	Eigenfrequenzänderung
Δl	Längenänderung des Stabes
c_T	transversale Schallgeschwindigkeit
G	Schubmodul
κ_n	Eigenwerte des Stabes
I_y	axiale Flächenträgheitsmoment
A	Querschnittsfläche des Stabes
r	Radius des Stabes
$Y[i]$	Amplitude an der Stelle i des erzeugten Signals
i	Laufvariable der for-Schleife zur Generierung des Signals
U_{PP}	Peak-to-Peak-Spannung am Ausgang des Funktionsgenerators
a	horizontaler Abstandes zwischen Sender und Empfänger bei der Biegeschwingung

1 Einleitung

Medizin, Echolot, Schichtdicken- oder Durchflussmessungen - Für Ultraschalltechnik gibt es heutzutage zahlreiche Anwendungen. Auch aus der Werkstoffprüfung ist sie, aufgrund der Tatsache, dass sie zerstörungsfrei durchführbar ist, nicht mehr wegzudenken.

Bisher werden vorwiegend größere Gegenstände oder Stoffe geprüft. Ein Hersteller von Drehteilen von nur wenigen Zentimetern Länge sucht nun nach einer kostengünstigen und für die Massenproduktion geeigneten Möglichkeit, seine Produkte auf eventuelle Defekte oder Deformationen prüfen zu lassen. In diesem Zusammenhang sollen diese Stäbe mittels Ultraschallprüftechnik analysiert werden. So soll erforscht werden, ob und mit welcher Sicherheit solche Deformationen beziehungsweise Defekte am Stab festzustellen sind.

Zu dieser Thematik gibt es bisher keine relevanten Forschungsarbeiten, an die diese Untersuchung anknüpfen könnte. Umso intensiver muss auf die Reproduzierbarkeit der Messungen geachtet und über eventuelle Verbesserungen am Messaufbau nachgedacht werden. Grundidee für den Versuchsaufbau ist die Einspannung eines Drehteils zwischen zwei Ultraschallwandlern, auf deren Oberflächen jeweils eine metallische Halterung geklebt wurde. Anschließend können akustische Signale vom Sender zum Empfänger geschickt werden, wobei der Stab als eine Art Filter fungiert. Je nach Länge, Dicke und Art der Schwingung weist ein Stab eine charakteristische Eigenfrequenz und entsprechend höhere Schwingungsmoden auf. Diese betreffenden Frequenzen werden kaum bei der Transmission durch den Stab abgeschwächt, während die restlichen Frequenzen idealerweise vom Stab herausgefiltert werden. Durch Änderungen am Stab verschieben sich diese Frequenzen.

Inwieweit ein Stabdefekt, wie beispielsweise ein Riss die Eigenfrequenz beeinflusst, ist unklar. Verschiebungen, die durch eine Längenänderung hervorgerufen werden, können jedoch auch berechnet und anschließend verglichen werden. Dazu liegen zahlreiche teilweise in ihrer Länge verschiedene Stäbe bereit. Die Analyse einer Messung erfolgt zunächst, indem das empfangene Signal fouriertransformiert wird. So ergibt sich ein Frequenzspektrum, wo entsprechende Eigenfrequenzen visuell erfassbar sein sollen. Projiziert man zwei Spektren übereinander, sind eventuelle Unterschiede sofort erkennbar. Auf diese Weise gilt es zu aller erst die allgemeine Reproduzierbarkeit der Messungen zu prüfen, sodass verschiedene Stabtypen anhand ihrer Spektren unterschieden werden können. Idealerweise wäre diese Art der Differenzierung letztlich exakt genug, um auch kleine Defekte am Stab feststellen zu können. Dazu kann es nützlich oder nötig sein, verschiedene Arten der Anregung zu testen sowie einstellbare Einflüsse des Messaufbaus zu variieren, wie beispielsweise die einspannende Kraft. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse helfen, den Aufbau stets zu optimieren als auch die beste Einstellung zu finden, um bestimmte Stabeigenschaften nachzuweisen.

Sobald eine ausreichend gute Reproduzierbarkeit gewährleistet werden kann, sollen

sehr große Mengen Daten gesammelt werden. Diese sollen letztlich durch verschiedene Prozesse des maschinellen Lernens analysiert werden, sodass eine Unterscheidung der Stäbe automatisch und nicht länger durch eine Person erfolgt.

Letzten Endes untersucht diese Arbeit die Durchführbarkeit der Ultraschallprüfung von sehr kleinen Stäben. Dabei müssen unter anderem grundlegende Einflüsse auf die Messungen erkannt und analysiert werden. Im Zuge dessen wird der Versuchsaufbau stets angepasst, sodass schließlich eine Fülle an Messdaten als Grundlage für eine maschinelle Auswertung gesammelt werden kann.

2 Grundlagen

Für das Verständnis der folgenden Arbeit sind diverse Grundlagenkenntnisse notwendig. Dabei stehen vor allem das Verhalten des Schalls an Grenzflächen, seine Ausbreitung und verschiedene Schwingungsformen im Fokus.

2.1 Reflexion und Transmission an Grenzflächen

Eine Schallwelle breitet sich in einem Medium aus, welches im Folgenden als Medium 1 bezeichnet wird, bis sie an dessen Grenzflächen gelangt. Dort wird die weitere Ausbreitung gestört. Liegt hinter der Grenzfläche ein Vakuum, kann keine Schallwelle über sie hinausgelangen. In dem Fall würde sie an dieser Grenzfläche reflektiert oder gestreut werden, je nachdem, ob die Fläche glatt oder rau ist. [1] Haftet unmittelbar hinter der Grenzfläche ein weiterer Stoff - im Folgenden Medium 2 genannt -, findet eine Kraftübertragung statt, sodass die Welle in Medium 2 weiterlaufen kann. Dies geschieht meistens mit einer mehr oder minder veränderten Bewegungsrichtung, Stärke und Art. Bei der Werkstoffprüfung mit Ultraschall spielt die Wirkung von Grenzflächen auf die Schallausbreitung in drei Fällen eine Rolle:

- bei der Übertragung vom Sender in den Prüfkörper beziehungsweise vom Prüfkörper zum Empfänger
- bei Bauteilfehlern im Inneren des Prüfstücks. Diese werden durch ihre Wirkung auf die Schallausbreitung als Grenzflächen nachgewiesen.
- weitere Grenzflächen können die Schallausbreitung im Prüfstück, etwa durch Reflexionen beeinflussen

Medium 1 mit der Dichte ρ_1 und der Schallgeschwindigkeit c_1 grenzt direkt an Medium 2 mit ρ_2 und c_2 . Eine ebene Schallwelle verläuft in Medium 1 und trifft dann senkrecht auf die glatte, ebene Grenzfläche zu Medium 2. Dann laufen zwei ebene Wellen wieder senkrecht von dieser Grenzfläche weg. Eine wird in die ursprüngliche Richtung reflektiert. Die andere verläuft in Medium 2 weiter.

Zur Betrachtung werden die folgenden Größen herangezogen:

Tabelle 2.1: Reflexion und Transmission an einer Grenzfläche

Medium 1	Medium 2
$Z_1 = \rho_1 c_1$	$Z_2 = \rho_2 c_2$
einfallende Welle mit Schallintensität I_e \rightarrow reflektierte Welle mit Schallintensität I_r \leftarrow	transmittierte Welle mit Schallintensität I_t \rightarrow

Das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit nennt man die Schallkennimpedanz Z eines Mediums. Diese wirkt sich unmittelbar auf den reflektierten Anteil R beziehungsweise den transmittierten Anteil T der einfallenden Welle aus. Beide Anteile sind über das Verhältnis ihrer jeweiligen Schallintensität zur Schallintensität der einfallenden Welle definiert.

$$R = \frac{I_r}{I_e} \quad T = \frac{I_t}{I_e} \quad (2.1)$$

Der Reflexions- beziehungsweise Transmissionsanteil ist ein dimensionsloser Zahlenwert zwischen 0 und 1. Die Summe der beiden Werte ergibt dabei genau 1. In Formel 2.2 ist der Zusammenhang zwischen den Schallkennimpedanzen der beteiligten Stoffe und dem Reflexions- sowie dem Transmissionsfaktor dargestellt.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

[1] Beispielhaft kann man nun R beziehungsweise T an der Grenzfläche Luft/Stahl berechnen. Die Schallkennimpedanzen von Luft und Stahl für longitudinale Wellen unter Normalbedingungen betragen $Z_{\text{Luft}} = 428,3 \text{ Ns/m}^3$ und $Z_{\text{Stahl}} = 45 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$.
 [2] Unter der Annahme, dass sich die longitudinale Schallwelle in Luft bewegt und auf eine Grenzfläche zu Stahl trifft, gilt nach Formel 2.2 für R :

$$R = \frac{45 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3 - 428,3 \text{ Ns/m}^3}{45 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3 + 428,3 \text{ Ns/m}^3} = 0,99998 \quad (2.3)$$

Die akustischen Impedanzen der beiden Stoffe liegen also soweit auseinander, dass eine Schallwelle an dieser Grenzfläche nahezu vollständig reflektiert wird.

2.2 Schallschwächung

Grenzflächen treten in der Realität auch innerhalb eines Mediums auf, da diese in der Regel nicht streng homogen sind. Inhomogenitäten wie z. B. Fremdstoffeinschlüsse oder unterschiedliche, benachbarte Kristallite in einer Legierung, wie etwa Stahl, führen zu einer abrupten Änderung der akustischen Impedanz. Trifft eine Schallwelle schräg auf die Grenzfläche einer solchen Korngrenze, wird die Welle gemäß Formel 2.2 in verschiedene reflektierte und durchgehende Wellen aufgespalten. Jede dieser Wellen unterliegt beim Auftreffen auf die nächste Korngrenze demselben Effekt. Dieser Prozess wird als Streuung bezeichnet. Wie stark eine Welle streut, hängt von dem Verhältnis von Wellenlänge zu Korngröße ab. Bei konstanter Wellenlänge beziehungsweise Frequenz wächst die Streuung circa mit der dritten Potenz der Korngröße.[1]

Neben der Streuung tritt auch die Absorption als weiterer Effekt der Schallschwächung auf. Diese betrifft sämtliche Schallwellen, die in dem Medium verlaufen, auch die bereits gestreuten Wellen. Die Absorption beschreibt eine Umwandlung von Schallenergie in Wärme. Man kann sich die Absorption als Abbremsen der Teilchenschwingung, etwa durch Reibung, vorstellen. Aus diesem Sachverhalt folgt auch, dass eine hochfrequente Schwingung mehr Energie verliert, als eine niederfrequente, was bedeutet, dass die Abschwächung durch Absorption proportional mit der Frequenz zunimmt.

Wird ein Signal ausgewertet, führt die Absorption zu einer Verringerung der gemessenen Schallenergie. Diesem Effekt kann man mit einer höheren Sendeleistung oder Verstärkung des Signals entgegenwirken. Die Streuung führt oftmals zu einem stärkeren Rauschen, da die Laufzeiten der Schallwellen verändert werden. Sowohl eine erhöhte Sendeleistung als auch eine größere Verstärkung würden an dieser Stelle nicht helfen, da diese das Rauschen ebenfalls verstärken. Demzufolge kann man sich hier nur Abhilfe verschaffen, indem man mit möglichst tiefen Frequenzen misst, da diese nicht nur weniger von der Absorption sondern auch von der Streuung betroffen sind.

Die Schwächung des Schalldrucks einer ebenen Welle lässt sich durch folgende Exponentialfunktion darstellen:

$$p = p_0 * e^{-\alpha d} \quad (2.4)$$

Hierbei bezeichnen p_0 und p die Schalldrücke zum Anfang und Ende einer durchlaufenen Strecke der Länge d mit dem Schwächungskoeffizienten α . Möchte man diese Gleichung auf die Schallintensitäten anwenden, anstatt auf die Schalldrücke, wird α ersetzt durch α_I . Da die Intensität proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist, gilt:

$$\alpha_I = 2\alpha$$

Demnach ist das Schwächungsgesetz der Intensität:

$$I = I_0 * e^{-2\alpha d} = I_0 * e^{-\alpha_I d} \quad (2.5)$$

Logarithmiert man Gleichung 2.4 natürlich, ergibt sich für die Gesamtschwächung in Neper über der Strecke d :

$$d * \alpha = \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \text{ Neper} \quad (2.6)$$

Allerdings wird das Dezibelmaß in der Messtechnik gegenüber dem Neper präferiert. Dieses ergibt sich, wenn man in Gleichung 2.6 anstelle des natürlichen, den Logarithmus zur Basis 10 benutzt und mit 20 multipliziert. Daraus folgt:

$$d * \alpha = 20 * \lg\left(\frac{p_0}{p}\right) \text{ dB} \quad (2.7)$$

Der Schwächungskoeffizient wird demzufolge in Dezibel pro Meter angegeben. Für gut durchlässige Werkstoffe, wie etwa Stahl oder Aluminium, beträgt α abhängig von der Wellenlänge des Schalls rund 1 bis 10 dB/m.[1]

Zur Veranschaulichung des Dezibelmaßes stelle man sich vor, der Schalldruck einer Welle wird über eine Strecke auf ein Fünftel des Ausgangsdrucks reduziert. Daraus folgt eine Gesamtabschwächung über diese Strecke von $20 \lg 5 = 14 \text{ dB}$. Wird der Schalldruck nicht nur auf ein Fünftel, sondern sogar auf ein Zehntel herabgesetzt, ergibt sich eine Abschwächung von $20 \lg 10 = 20 \text{ dB}$.

2.3 Schwingungsmoden

Als Moden bezeichnet man Eigenschwingungen eines schwingungsfähigen Systems. Verschiedene Moden unterscheiden sich in ihrer räumlichen Verteilung der Intensität. Diese wird maßgeblich durch die Parameter bestimmt, unter denen sich die Welle ausbreitet. Mit folgender Formel lassen sich die Moden für einen Raum bestimmen.[3]

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_H}{H}\right)^2} \quad (2.8)$$

Hierbei ist:

- f : Frequenz der Mode
- c : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle
- L : Länge des Raumes
- B : Breite des Raumes
- H : Höhe des Raumes
- n : Ordnungszahl der Eigenschwingung, Schwingungsordnung (1,2,3,...)

Da im Folgenden vorwiegend Stäbe untersucht werden, können Breite und Höhe des schwingungsfähigen Systems vernachlässigt werden, sodass lediglich die Länge eine Rolle spielt. Sind beide Enden des Stabes fixiert, ergibt sich nach Anregung eine stehende Welle mit zwei festen Enden, wie bei einer schwingenden Saite. Hierbei entspricht die Wellenlänge der Grundschwingung der doppelten Saitenlänge. Die Wellenlängen höherer Moden ergeben sich aus dem Produkt ihrer entsprechenden Schwingungsordnung und der Wellenlänge der Grundschwingung.

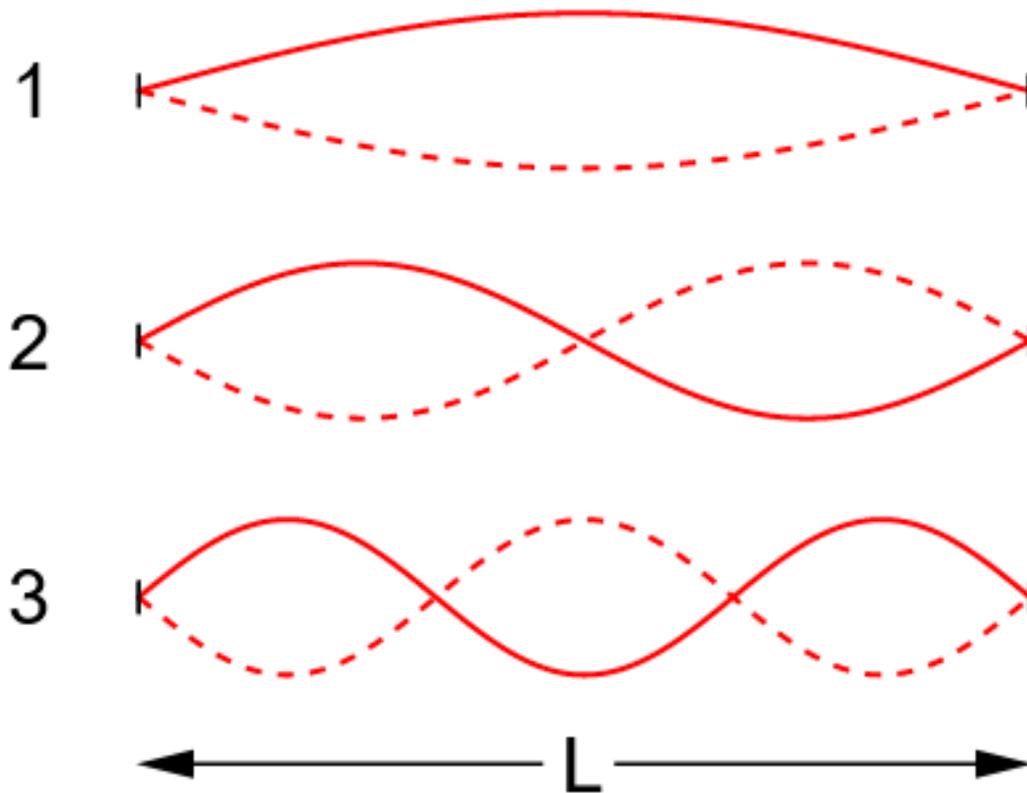


Abbildung 2.1: Grundschwingung und die ersten beiden Oberschwingungen einer Saite [4]

2.4 Schwingungsformen dünner Stäbe

Unterliegt ein schwingungsfähiges System einer zeitlich veränderlichen Anregung, kommt es gegebenenfalls zu einem verstärkten Mitschwingen des Systems, das man als Resonanz bezeichnet. Dies ist der Fall, wenn sich die Frequenz der äußeren Anregung der sogenannten Eigenfrequenz des Systems annähert. Die Eigenfrequenz ist dabei charakteristisch für den jeweilig angeregten Oszillator. Da in dieser Arbeit das Frequenzspektrum verschiedener dünner Stäbe untersucht werden soll, muss zunächst auf die unterschiedlichen Schwingungsformen eingegangen werden. Es sind sowohl Längs-, Biege- als auch Torsionsschwingungen möglich.

2.4.1 Längsschwingung

Zur Betrachtung der Längsschwingung eines dünnen Stabes kann man die Analogie der Saitenschwingung, zu sehen in Abbildung 2.1, nutzen. Demnach liegt eine Eigenfrequenz vor, wenn die doppelte Länge des Stabes einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge der entsprechenden Schallwelle entspricht. Also bei

$$\lambda = \frac{2l}{n} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

Die zu der Wellenlänge zugehörige Frequenz folgt aus dem Zusammenhang mit der Schallgeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.10)$$

Fasst man die Formeln 2.9 und 2.10 zusammen, erhält man

$$f_n = \frac{n * c}{2l} \quad (2.11)$$

Wobei für die longitudinale Schallgeschwindigkeit in Stäben folgender Zusammenhang mit den Materialeigenschaften Elastizitätsmodul E und Dichte ρ gilt:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.12)$$

So liegt bei $n = 1$ die Grundschiwingung des Stabes, während sich die höheren Harmonischen bei den ganzzahligen Vielfachen dieser Frequenz befinden.

Aus Gleichung 2.11 lässt sich der Zusammenhang

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = -\frac{\Delta l}{l} \quad (2.13)$$

schlussfolgern. Demnach bewirkt eine relative Verkürzung des Stabes eine Erhöhung der jeweiligen Eigenfrequenzen um denselben Prozentsatz.

2.4.2 Torsionsschwingung

Die Eigenfrequenzen der Torsionsschwingung lassen sich analog zu denen der Längsschwingung berechnen.[5] Dazu nimmt man Gleichung 2.11 und ersetzt die longitudinale Schallgeschwindigkeit c durch die transversale c_T , sodass sich

$$f_n = \frac{n * c_T}{2l} \quad (2.14)$$

ergibt. Hierbei ist zu beachten, dass zur Berechnung der transversalen Schallgeschwindigkeit nunmehr nicht das Elastizitäts- sondern das Schubmodul G herangezogen wird. So wird Gleichung 2.12 zu:

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.15)$$

In Bezug auf die Abhängigkeit der Änderung der Eigenfrequenzen Δf von der Längenänderung Δl gilt weiterhin Gleichung 2.13.

2.4.3 Biegeschwingung

Verglichen mit der Längs- beziehungsweise Torsionsschwingung eines Stabes ist die Biegeschwingung wesentlich komplizierter. Es ist zu beachten, dass die Enden des Stabes bei der Anregung der Biegeschwingung nicht eingespannt, also frei sind. Für die Eigenfrequenzen gilt die Formel[5]:

$$f_n = \frac{\kappa_n^2}{2\pi * l^2} * \sqrt{\frac{E * I_y}{\rho * A}} \quad (2.16)$$

In diesem Fall wird wieder die longitudinale Schallgeschwindigkeit nach Gleichung 2.12 für die Berechnung genutzt. κ steht für die Eigenschwingungen, I_y für das axiale Flächenträgheitsmoment und A für die Querschnittsfläche des Stabes. Da es sich bei den zu untersuchenden Proben hauptsächlich um runde Stäbe handelt, ist die Querschnittsfläche die eines Kreises und für das Flächenträgheitsmoment gilt:

$$I_y = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (2.17)$$

2.4.4 Schlussfolgerung für zylindrische Stäbe

Mit der Querschnittsfläche

$$A_{\text{Kreis}} = \frac{\pi r^2}{4}$$

wird aus Formel 2.16:

$$f_n = \frac{\kappa_n^2 * r}{4\pi * l^2} * \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.18)$$

Zur Bestimmung der Eigenwerte κ_n muss die Eigenwertgleichung für frei schwingende Stäbe[5] erfüllt sein

$$0 = \cos \kappa * \cosh \kappa - 1 \quad (2.19)$$

Diese Gleichung hat die numerischen Lösungen

$$\kappa_1 = 4,73, \kappa_2 = 7,8532 \text{ und } \kappa_{n \geq 3} = (2n + 1)\pi/2$$

Mit eventuellen Änderungen der Abmessungen des zylinderförmigen Standardstabes kommt auch eine Verschiebung der Eigenfrequenz. Änderungen von Stablänge oder Radius wirken sich folgendermaßen auf die Eigenfrequenzen eines solchen Stabes aus:

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = -2 \frac{\Delta l}{l} \frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta r}{r} \quad (2.20)$$

Zusammenfassend lassen sich die Einflüsse der Abmessungsänderungen auf die Eigenfrequenzen eines zylindrischen Stabes für alle drei Schwingungsarten in einer Tabelle gegenüberstellen

Tabelle 2.2: Einfluss der relativen Abmessungsänderungen auf die relative Eigenfrequenzänderung $\frac{\Delta f}{f_0}$

Mode	Größe	Einfluss
Längsschwingung	Radius	0
Längsschwingung	Länge	$-\frac{\Delta l}{l_0}$
Torsionsschwingung	Radius	0
Torsionsschwingung	Länge	$-\frac{\Delta l}{l_0}$
Biegeschwingung	Radius	$\frac{\Delta r}{r_0}$
Biegeschwingung	Länge	$-2\frac{\Delta l}{l_0}$

Es zeigt sich, dass die Änderung der Abmessung in gleicher Weise auf die Eigenfrequenzen bei der Torsions- und bei der Längsschwingung wirkt. Auf diese beiden Schwingungsmoden hat der Radius beziehungsweise Durchmesser des Stabes keinen Einfluss, anders als bei der Biegeschwingung, wo eine relative Änderung des Radius dieselbe relative Änderung der Eigenfrequenz hervorruft. Eine relative Längenänderung resultiert in einer entgegengesetzten Frequenzänderung um denselben (Torsions- und Längsschwingung) beziehungsweise um den halben relativen Anteil (Biegeschwingung).

3 Durchführung

3.1 Stabtypen

Für die Untersuchung der Eigenfrequenz stehen verschiedene Arten von Stäben zur Verfügung. Eine kleine Auswahl ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Rechts im Bild ist der Stab dargestellt, der im Fokus der Messungen steht. Er kann als zylinderförmig mit leicht angephasten Rändern betrachtet werden. Durch diese recht unkomplizierte Geometrie lässt sich die Auswirkung der Abmessungen auf die Eigenfrequenzen besonders gut untersuchen. Dazu liegt dieser Stabtyp - im Folgenden als Standardstab bezeichnet - in den drei Längen 43, 45 und 47 mm in sehr großer Stückzahl vor. So können die zuvor angestellten Überlegungen zur Eigenfrequenz und deren Verschiebung optimal überprüft werden. Denn um später Aussagen über eventuelle Defekte eines Stabes treffen zu können, sollte man im Vorfeld andere Faktoren, die sich auf das Resonanzverhalten auswirken, wie zum Beispiel eine ausgefallene Geometrie, ausschließen.



Abbildung 3.1: links: Stabhalterungen für Biegeschwingungen(vorn) und Längsschwingungen(hinten); rechts: Verschiedene Stabtypen

Links im Bild sieht man verschiedene Halterungen, welche zur Einspannung der Stäbe dienen. Dabei werden die Vorderen zur Biege- und die Hinteren zur Längsschwingung verwendet. Eine Anregung zur Torsionsschwingung lässt sich unter den

gegebenen Voraussetzungen leider nicht bewerkstelligen. Beide Halterungstypen sind so geformt, dass ein zylindrischer Stab sie nicht vollständig ausfüllen kann, sodass stets ein Luftspalt zwischen dem Stab und der Halterung liegt. Dazu steht bei der Längsschwingung ein kegelförmiges Loch der kreisförmigen Grundfläche des Stabes gegenüber. Die am Stabende angebrachte Phase dient lediglich der Fixierung in dem Loch, ist allerdings nicht ausgeprägt genug, als dass der Stab den Luftspalt ausfüllen könnte. Bei der Biegeschwingung liegt die runde Mantelfläche in einer nach unten hin spitz zulaufenden Lagerung. So soll der Stab möglichst unabhängig vom Rest des Versuchsaufbaus schwingen können, sodass nur Stabeigenschaften Auswirkungen auf das zu messende Signal haben.

Die Längenmaße der Stäbe wurden mit einem Messschieber überprüft und es wurde ein Durchmesser von 2 mm ermittelt. Weiterhin kann man als Körperform des Standardstabes einen Zylinder annehmen, wodurch sich ein Volumen von

$$V = l * \frac{\pi}{4} * r^2 \quad (3.1)$$

ergibt. Die Massen von zwanzig Stäben wurde gemessen und daraus die mittlere Masse für einen Stab berechnet. Hierbei wurden keine ausschlaggebenden Unterschiede festgestellt. Die Messungen variierten lediglich im Bereich der Genauigkeit der Waage von $\pm 0,01$ g. Der Quotient dieser Masse und des Volumens ergibt eine Dichte von $7,8 \text{ g/cm}^3$, welche auf Stahl hindeutet.[6]

Basierend auf den Abmessungen sowie dem Material, aus dem die Stäbe bestehen, lassen sich nach Formel 2.11, 2.16 beziehungsweise 2.14 die entsprechenden Eigenfrequenzen für Längs-, Biege- beziehungsweise Torsionsschwingungen berechnen. Dazu benötigt man die longitudinale und die transversale Schallgeschwindigkeit in Stahl. Diese betragen:

$$c_l = 5850 \text{ m/s und } c_t = 3230 \text{ m/s [7]}$$

Damit lässt sich die folgende Tabelle aufstellen.

Tabelle 3.1: Eigenfrequenzen f_n und die ersten beiden höheren Harmonischen für den Standardstab in allen drei Längen bei den drei unterschiedlichen Schwingungsarten

Schwingungsart	n	$f_n(43 \text{ mm})/\text{kHz}$	$f_n(45 \text{ mm})/\text{kHz}$	$f_n(47 \text{ mm})/\text{kHz}$
Längsschwingung	1	68	65	62,2
	2	136	130	124,5
	3	204,1	195	186,7
Biegeschwingung	1	5,6	5,1	4,7
	2	15,5	14,2	13
	3	30,4	27,8	25,5
Torsionsschwingung	1	37,6	35,9	34,4
	2	75,1	71,8	68,7
	3	112,7	107,7	103,1

Diese Werte dienen lediglich als Orientierung, da weitere Komponenten des Messaufbaus, wie etwa die Halterung eines Stabes oder die Ultraschallwandler, voraussichtlich

die Eigenfrequenz beeinflussen werden. Damit die Spektren der einzelnen Stäbe vergleichbar sind, muss dieser Einfluss des Messaufbaus auf die Eigenfrequenz minimiert und vor allem konstant gehalten werden.

3.2 Messaufbau

Damit ein solcher Stab zwischen den zwei Wandlern eingespannt werden kann, müssen diese den Stab mit einer definierten Kraft und Richtung halten. Dafür ist ein pneumatisches Positionierungssystem (kurz: PPS) im Labor verfügbar. Dieses besitzt drei jeweils orthogonal zueinanderstehende Achsen, die sich unabhängig voneinander bewegen beziehungsweise fixieren lassen.

Im Grundzustand sind alle Achsen fixiert, lassen sich aber nach Betätigung des zugehörigen Schalters bewegen. In einem solchen Fall wird Druckluft auf die entsprechende Achse gegeben, sodass die der Bewegung entgegenwirkende Reibung minimiert wird. Als ein guter Druck, um die Achsen mühelos wie präzise bewegen zu können, hat sich 3 bar herausgestellt. Sind die Achsen fixiert, wird vergleichsweise wenig Druckluft verbraucht. Da der Kompressor sich recht schnell erhitzt, wenn er arbeitet, sollte sparsam mit der komprimierten Luft umgegangen werden, um längere beziehungsweise häufige Abkühlpausen des Kompressors zu vermeiden. Dementsprechend selten sollten die Achsen bewegt werden, weil hierbei stets mehr Luft entweicht. Notwendig ist eine Repositionierung der Achsen nur, wenn die Wandler oder die Anregungsart der Schwingung verändert werden sollen. Wenn man lediglich den Stab austauschen möchte, ohne gleich einen anderen Stabtyp testen zu wollen, genügt es, eine der Achsen (im Folgenden als Z-Achse bezeichnet) kurz auszulenken und nach dem Stabwechsel wieder an die alte Position zurückzufahren.

Die Z-Achse ist diejenige, die parallel zur akustischen Achse liegt, an der auch der Schallsender befestigt ist und die eigentliche Einspannung des Stabes übernimmt, indem sie eine vordefinierte Gewichtskraft auf ihn ausübt. Die beiden anderen Achsen Y und X müssen so ausgerichtet werden, dass der Stab genau senkrecht zwischen den beiden Schallwandlern eingespannt wird. Man kann also sagen, dass die Z-Achse eine Auf- und Abwärtsbewegung des Schallsenders ermöglicht, was dem Wechsel der Stäbe sowie einer Änderung der einwirkenden Kraft dient, während die X- beziehungsweise die Y-Achse eine senkrechte Einspannung des Stabes realisieren, indem sie den Sender zur Seite beziehungsweise vor- und rückwärts bewegen.

Die einwirkende Kraft der Z-Achse ist über ein weiter oben am Gerät angebrachtes Rädchen einzustellen. So wirkt der Luftdruck des Kompressors der Gewichtskraft der Achse entgegen. Mit der Waage 'Nohlex SF-890' kann die resultierende Kraft gemessen werden. Mit einem Wägebereich von bis zu 50 kg und einer Genauigkeit von ± 2 g verfügt dieses Modell über die nötigen Eigenschaften, die Kraft der Z-Achse zu ermitteln. Nach mehrfachem Messen des Gewichtes der Achse wurde eine Schwankung von einigen Gramm festgestellt. Dazu ist ein Experiment durchgeführt worden, bei dem das wiederholte Wechseln eines Stabes simuliert, die Z-Achse also mehrmals auf die Waage gesetzt, fixiert, dann wieder gelöst und angehoben wurde. Dabei registrierte man die Schwankung der von der Waage angezeigten Masse. Genaueres ist in Kapitel 4.1 Einfluss der Messapparatur nachzulesen. Die entsprechende Schwankung ist auch stark vom Kompressor abhängig. Denn der gewünschte

Ausgangsdruck, welcher in diesem Fall 3 bar beträgt, wird am Kompressor eingestellt, woraufhin dieser die Luft im Kompressorinnenraum bis auf einen maximalen Druck von 8 bar komprimiert. Ist dieser Maximaldruck erreicht, wird keine weitere Luft komprimiert, bis der gewünschte Ausgangsdruck nicht mehr gewährleistet werden kann, was bei etwa 5 bar der Fall ist. Druckluft, die verloren geht oder vom PPS verbraucht wird, wird dem System anschließend wieder vom Kompressor zugeführt, sodass der eingestellte Druck von 3 bar erhalten bleibt. Dieser Regelkreislauf hat zur Folge, dass sich der Kompressor im Messbetrieb in regelmäßigen Abständen an- und abschaltet. Dies bewirkt eventuell auch Druckschwankungen direkt an der Z-Achse, woraus die Gewichtsschwankungen resultieren können. Diese Schwankung, bedingt durch das An- beziehungsweise Abschalten des Kompressors, ist auf der Waage sichtbar, auch wenn die Z-Achse nur aufliegt und nicht angehoben und dann erneut gewogen wird. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den vorliegenden Proben um sehr dünne Stäbe handelt, sollte nicht das maximal mögliche Gewicht auf die Z-Achse gegeben werden. Andernfalls riskiert man eine Verbiegung der Probe. Zu Beginn der Messungen wurde das zulässige Gewicht zunächst auf 1 kg begrenzt. Das PPS ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Seine Achsen stehen auf drei Füßen. Unweit über dem Boden befindet sich eine Granitplatte, die ebenfalls auf drei verstellbaren Punkten gelagert ist. Die Lagerung auf drei Punkten ermöglicht eine einfache Nivellierung des Systems, welche im Vorfeld mithilfe einer Libelle durchgeführt wurde. Die Granitplatte liegt direkt unter der Z-Achse und dient bei diesem Experiment als Messareal. Sowohl für die Messung der Gewichtskraft als auch des Resonanzsignals der Stäbe wird eine ebene Fläche ohne Neigungen benötigt, um das Ergebnis nicht zu beeinflussen. Demzufolge befindet sich neben der Waage auch der Rest der Stabhalterung, samt Schallempfänger, also das Gegenstück zu der Befestigung an der Z-Achse, auf der Granitplatte.

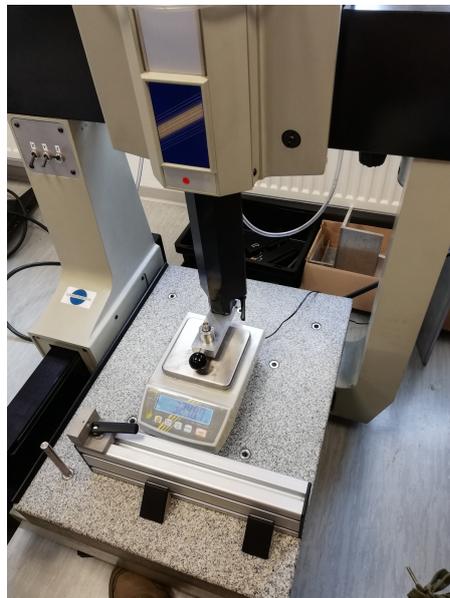


Abbildung 3.2: PPS während des Wiegens der Z-Achse; unten im Bild: Vorrichtung an der später der Schallempfänger befestigt wird, der Schallsender befindet sich bereits an der Z-Achse; links im Bild: Schalter zum Fixieren/Lösen der drei Achsen (X- und Y-Achse im Moment fixiert)

3.3 Das Anregungssignal

Zum Aussenden und Empfangen des Schalles wurden vom FZ-U selbst gebaute Ultraschallwandler mit einer Eigenfrequenz von 400 kHz benutzt. Das Signal wird von einem Funktionsgenerator 'HP agilent 33120a' erzeugt. Es durchläuft den Stab und nach Eintreffen am Empfänger zusätzlich verstärkt. Hierfür stehen zwei unterschiedliche Verstärker zur Verfügung. Zu Anfang der Untersuchungen wurde ein Verstärker benutzt, dessen Übertragungsbereich etwa bei 0 bis 700 kHz liegt. Sein Verstärkungsmaß ist über die Software 'Sonostudio' regulierbar. Es sollte so gewählt werden, dass sich die Amplitude des Signals bei circa 80% des darstellbaren Maximums befindet. Je nach angeregter Schwingung sind dafür zwischen 30 und 90 dB Verstärkung nötig. Da dieser Übertragungsbereich jedoch nicht ausreichend ist, um alle angeregten Eigenfrequenzen eines Stabes adäquat zu verstärken, wurde für die Messungen später auch ein zweiter Verstärker genutzt. Dieser verfügt über einen Übertragungsbereich von 10 kHz bis 1,5 MHz. Er hat jedoch die Nachteile, dass sein Ausgangssignal sehr verrauscht ist, was eine Auswertung erschwert und dass sein Verstärkungsmaß bei konstant 50 dB liegt, sodass die Amplitude des Signals lediglich manuell über die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators reguliert werden kann.

Die Analyse des Signals erfolgt anschließend mithilfe von Sonostudio. Um einen Überblick über die Resonanzen des Probestabes zu erhalten, wurde selbiger bei mehreren Frequenzen im Burstbetrieb untersucht. Dabei wurde der Stab längs in Schwingung versetzt und generell wurden Resonanzfrequenzen im Bereich von 5 kHz bis zu 1200 kHz gefunden. Da es sich hierbei auch um recht viele Resonanzen handelt, eignet sich eine Mischung aus Sweep und Burst am besten zur Untersuchung. Ein Sweep ist ein Signal, das mit einer Anfangsfrequenz von f_0 startet und innerhalb einer Signaldauer t seine Frequenz (meist linear) auf eine Endfrequenz f_{\max} erhöht beziehungsweise verringert. Ohne den Burstbetrieb würde das Signal direkt nach Erreichen von f_{\max} wieder auf f_0 springen. Weil das aber eine sinnvolle Darstellung und damit auch Auswertung des Signals verhindert, muss dieser Sweep als Burst, also gepulst, gesendet werden. So gibt es, sobald f_{\max} erreicht wurde, eine Unterbrechung definierter Dauer, während derer kein Signal ausgesendet wird. Leider lässt sich am Funktionsgenerator ohne Weiteres kein solches Signal, eine Kombination aus Burst und Sweep, erstellen. Daher muss der Funktionsgenerator extern angesteuert werden, sodass die entsprechende Funktion übertragen werden kann. Für solche Anwendungsfälle verfügt der Generator über die Möglichkeit, ein Signal in Form von maximal 65534 Datenpunkten zu speichern. Diese Datenpunkte werden mit der Software 'Igor Pro' berechnet und an den Generator übergeben. Da dieser Datensatz von der gewünschten Frequenzspanne sowie der Gesamtdauer des Signals abhängt, sind diese Parameter über ein Interface in der Igor-Applikation vom Nutzer bestimmbar.

Eine typische Pulsdauer beträgt, je nach Frequenzspanne, die der Sweep durchlaufen soll, zwischen 20 und 100 ms. Der Trigger für diesen Puls wird ebenfalls extern von Sonostudio auf den Funktionsgenerator übertragen und seine Pulsfolgefrequenz muss so gewählt werden, dass die Zeit zwischen zwei Pulsen in jedem Fall größer ist, als die Dauer eines einzelnen Pulses. Der Anstieg der Frequenz innerhalb des Sweeps wird als linear definiert. Zwischen der Start- und Endfrequenz muss der Verlauf

entsprechend interpoliert werden. Dazu wird die Startfrequenz f_{Start} 65534-mal in regelmäßigen Schritten erhöht, bis sie den Wert der Endfrequenz f_{End} annimmt. Dies erfolgt innerhalb einer for-Schleife mit der Laufvariable i . Die Amplitude Y an der Stelle i wird anhand folgender Formel aus der Frequenz und der Signaldauer generiert.

$$Y[i] = \sin\left(2 * \pi * \frac{i}{65535} * t * f\right) \quad (3.2)$$

Hierbei ist f die Frequenz an der Stelle i und t die zuvor eingestellte Signaldauer. So werden 65535 Datenpunkte eines sinusförmigen Signals erzeugt und mit einer Peak-to-Peak-Spannung von bis zu $U_{\text{PP}} = 10 \text{ V}$ vom Funktionsgenerator zum Schallwandler geschickt.

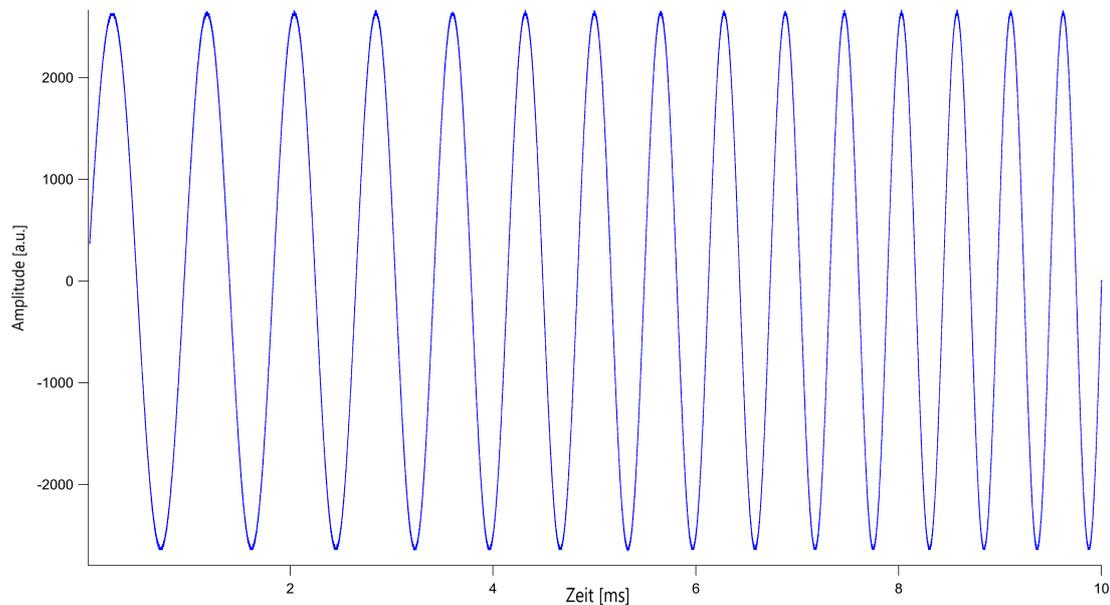


Abbildung 3.3: Verlauf eines Sweep-Signals

Einen Eindruck, wie ein solches Signal aussehen kann, gewinnt man aus Abbildung 3.3. Hier wurde die Frequenz innerhalb von 10 ms lediglich von 1 auf 2 kHz erhöht. Wie zuvor beschrieben, werden im Messbetrieb wesentlich höhere Frequenzen verwendet. Außerdem ist der Anstieg der Frequenz währenddessen deutlich größer. Die Sweep-Parameter wurden in diesem Fall an eine gute Darstellbarkeit des Signals angepasst.

3.4 Auswertung einer Messung

Das Messsignal wird vom Funktionsgenerator an einen Schallwandler übermittelt. Dort wird es in eine entsprechende mechanische Schwingung - also in Schall - umgewandelt. Demzufolge handelt es sich bei diesem Schallwandler um den Sender. Auf dem Weg zum Empfänger passiert diese Schwingung nicht nur den Stab, sondern auch Teile der Wandler, Klebstoffschichten und die Halterungen. An jeder vorhandenen Grenzfläche treten also Reflexionen und damit Signalverluste auf. Außerdem werden auf dieser Strecke Teile des Schalls absorbiert, wodurch das Signal allgemein abgeschwächt wird. Dies geschieht in Abhängigkeit von der Frequenz, die das anregende Signal zu diesem Zeitpunkt aufweist. Bei einigen Frequenzen wird die Schwingung maßgeblich verstärkt. Das ist der Fall, sobald man in die Nähe der Eigenfrequenzen der vom Schall durchlaufenen Komponenten beziehungsweise der Vielfachen kommt. So werden die Komponenten durch Resonanz zur Schwingung angeregt. Bei Frequenzen kleiner als 20 kHz sind die Resonanzen sogar hörbar. Die Schwingung wird vom Empfänger aufgenommen. Anschließend wird das Signal verstärkt und zu der Prüfanlage 'Sonoair' weitergeleitet. Dort erfolgt die Darstellung des Signals in Form eines A-Bildes. Ein Beispiel für ein solches A-Bild ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

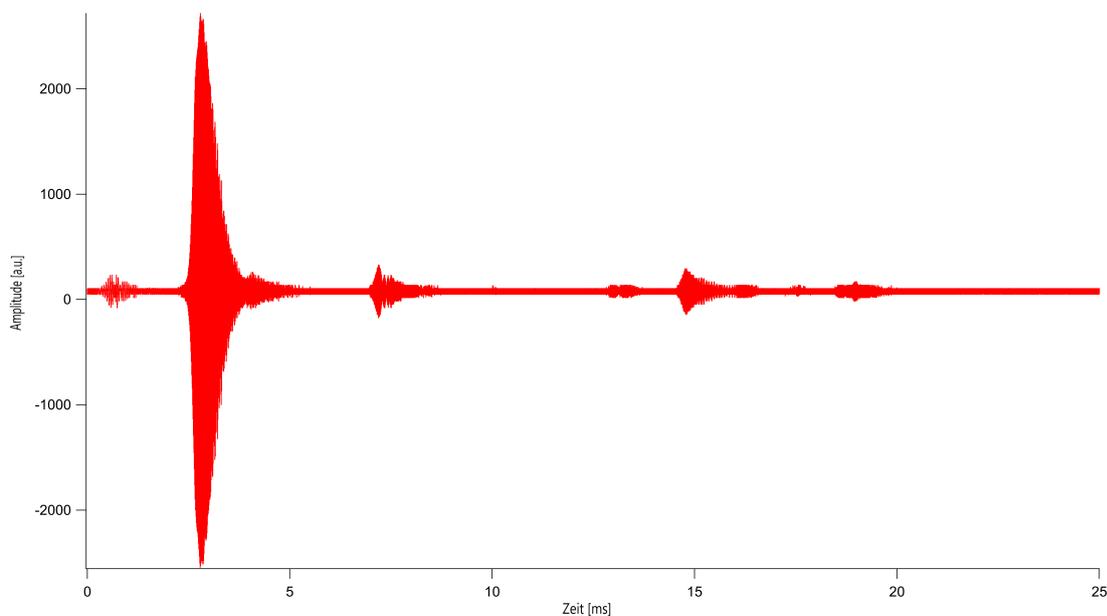


Abbildung 3.4: typisches A-Bild; aufgenommen für den Standardstab einer Länge von 45 mm, angeregt zur Longitudinalschwingung, mit einer Pulsdauer von 20 ms und einer Frequenzspanne von 0 bis 750 kHz

Die Amplitude des Signals wird über der Zeitachse aufgetragen. Sie wird in arbiträren Einheiten angegeben; unter anderem, weil der absolute Betrag der Amplitude kaum eine Rolle spielt, sondern eher die Relation der einzelnen Resonanzen eines Stabes zueinander beziehungsweise zu denen eines anderen Stabes. Die jeweiligen prominenten, lokalen Hochpunkte der Amplitude werden als Peaks (zu deutsch: Spitzen) bezeichnet. Aufgrund des linearen Anstiegs der Frequenz des Sweeps, kann man mithilfe der Daten für die Sweepdauer sowie für die Anfangs- und Endfrequenz

schon erahnen, bei welchen Frequenzen resonante Schwingungen auftreten. Für diese Messung betrug die Pulsdauer 20 ms und die Frequenz startete mit 0 kHz und erhöhte sich linear bis zu 750 kHz. Der höchste Peak liegt bei circa 3 ms nach Beginn des Sweeps auf der Abszisse, also nach 15% der gesamten Sweepdauer. Dementsprechend liegt die Frequenz dieser Schwingung bei ebenfalls 15% der Differenz zwischen Start- und Endfrequenz, was bei 112,5 kHz wäre. Weiterhin sieht man einige kleinere Peaks. Die Letzten reichen bis kurz vor 20 ms. Daran kann man auch erkennen, dass die Anregung durch den Sweep nach dieser Zeitspanne vorüber ist. Weist der Stab Eigenfrequenzen auf, die nicht direkt vom Sweep ausgesendet werden, können die entsprechenden Eigenschwingungen trotzdem angeregt werden, insofern die jeweilige Resonanz stark genug ist. In diesem Fall wären im A-Bild auch außerhalb der Zeitspanne der Pulsdauer Peaks zu sehen.

Um einen detaillierteren Aufschluss über die Lage der Peaks im Frequenzspektrum zu erhalten, wird ein solches A-Bild einer sogenannten Fast Fourier Transformation (kurz: FFT) unterzogen. Die FFT wird ebenfalls durch 'Igor Pro' realisiert und ist durch den Experimentator auch graphisch auswertbar. Prinzipiell wird bei einer FFT ein zeitabhängiges Signal kontinuierlich in seine Frequenzanteile zerlegt. Dabei wird vor allem ein genauerer Blick auf die tatsächlichen Frequenzen der Schwingungen möglich. Außerdem werden auf diese Art Schwingungen, deren Frequenzen nicht explizit beim Sweep ausgesendet wurden, korrekterweise bei ihrer eigentlichen Frequenz dargestellt.

Ein weiteres Problem, das die zeitabhängige Darstellung des A-Bildes mit sich bringt, ist, dass starke, angeregte Schwingungen noch etwas nachschwingen, sodass ihr Echo einige Zeit später erneut vom Empfänger registriert wird. Dieses Echo würde weiter hinten auf der Zeitachse in Form eines kleineren Peaks auftauchen. Um dieses Problem zu unterbinden, werden alle vorerst gefundenen Peaks eines Stabes genauer untersucht. Dafür wird ein Sweep generiert, dessen Start- und Endfrequenz kurz vor dem Beginn beziehungsweise kurz nach dem Ende des entsprechenden Peaks im Frequenzspektrum liegen. So wird die dazugehörige Schwingung quasi einzeln angeregt. Ist der Peak dann immer noch an derselben Stelle im Spektrum, handelt es sich also um eine 'echte' Schwingung. Andernfalls wäre es nur ein scheinbarer Peak, der durch das Nachschwingen des Stabes beziehungsweise durch das Echo starker Eigenschwingungen entstanden ist. Die dem A-Bild in Abbildung 3.4 zugehörige FFT ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

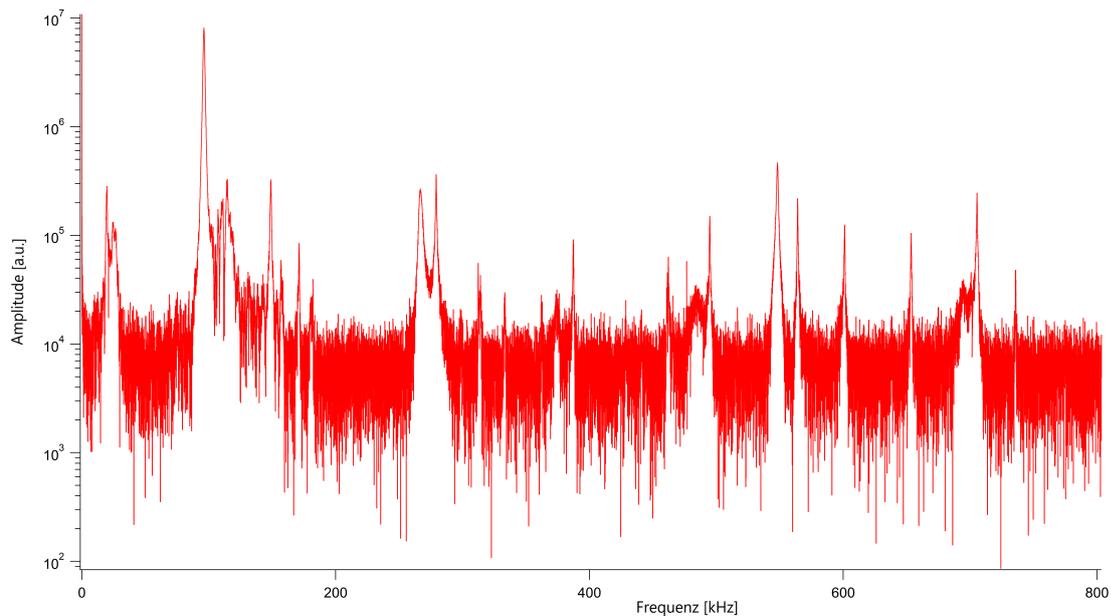


Abbildung 3.5: Dem vorangegangenen A-Bild zugehörige FFT

Wie auch in Abbildung 3.4 wird die Ordinate mit arbiträren Einheiten beziffert. Nur wird sie bei der graphischen Darstellung einer FFT im Gegensatz zum A-Bild im Regelfall logarithmiert. Visuell werden dadurch auch verhältnismäßig kleine Peaks gut hervorgehoben. Kleinere Peaks weisen eine Amplitude von circa 10^5 a.u. auf, das Zehnfache der Rauschamplitude, wodurch sie sich deutlich vom Hintergrund abgrenzen. Dennoch ist der größte Peak, der, wie anhand des A-Bildes prognostiziert wurde, bei circa 112 kHz liegt, mit einer Amplitude von 10^7 a.u. hundertmal so groß, wie diese besagten kleinen Peaks. Ohne die logarithmische Darstellung der Y-Achse wären die kleinen Peaks in der graphischen Darstellung so klein gegenüber dem Peak bei 112 kHz, dass sie sich optisch gar nicht mehr vom Rauschen abheben würden. Um nun die Unterschiede beziehungsweise Gemeinsamkeiten zwischen mehreren Messungen erfassen zu können, bietet 'Igor Pro' die Möglichkeit weitere Spektren in dieselbe Grafik zu laden und diese bei Bedarf umzufärben. Außerdem kann eine FFT im Nachhinein mit einem Faktor multipliziert werden, sodass sie entlang der Y-Achse verschoben wird. So sind Frequenzverschiebungen einzelner Peaks, wie sie etwa bei einer Längenänderung des Stabes auftreten, leicht erkennbar. Auf diese Weise lassen sich beliebig viele Messungen direkt vergleichen.

4 Maßnahmen und Experimente zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit

Für eine sinnvolle Auswertung der Spektren müssen die Messungen reproduzierbar sein. Demnach sollten gleichartige Stäbe auch ein gleiches Frequenzspektrum aufweisen. Auf diese Weise ließen sich zwei verschiedene Stäbe durch den Vergleich ihrer jeweiligen Spektren unterscheiden. Auch wenn die Messapparatur Auswirkungen auf das Spektrum hat, sollten diese im Idealfall konstant sein, sodass sämtliche Änderungen im Spektrum auf eine Veränderung der Probe zurückzuführen sind. In der Realität gibt es jedoch eine Vielzahl veränderlicher Einflüsse auf das Spektrum. Teilweise wurden sie erst durch einige vergleichende Messungen aufgedeckt. Solche Einflüsse beeinträchtigen die Spektren auf verschiedene Weisen. Einige sind systematisch - andere zufällig. Manche beeinflussen die Amplitude - manche die Frequenz, während wieder andere lediglich zu einem stärker verrauschten, also schwerer zu analysierendem Spektrum führen. Dieses Kapitel widmet sich den verschiedenen Einflüssen auf das Spektrum abseits des Stabes sowie der Minimierung beziehungsweise Eliminierung derselbigen. Dabei stehen logischerweise vor allem diejenigen Einflüsse im Fokus, die eine Änderung der Frequenz nach sich ziehen, da ein Stab hauptsächlich über seine Eigenfrequenzen identifiziert wird. Fatal wäre es, wenn die durch den Messaufbau bedingte Frequenzschwankung im Spektrum größer wäre, als die zu erwartende Verschiebung der Eigenfrequenzen bei den Standardstäben verschiedener Längen.

Damit bei zukünftigen Messungen zwischen den Spektren verschiedener Stäbe unterschieden werden kann, sollte zunächst die Variation der Spektren desselben Stabes bei etlichen Wiederholungsmessungen unter denselben Bedingungen bekannt sein. So können mögliche Einflüsse des Messaufbaus bewusst verstärkt und zum Vergleich herangezogen werden. Auf diese Weise kann man die Größe der jeweiligen Einflüsse beziffern. So wurden mit demselben Stab etwa zehn Wiederholungsmessungen jeweils für die Biege- als auch für die Längsschwingung aufgenommen. Dabei gilt zu beachten, dass beide Wandler parallel zueinander sind und dass der Kraftvektor der Z-Achse und damit auch der Wellenvektor der Schallwellen senkrecht auf der Staboberfläche steht. Diese Konfiguration wird zu Beginn einer Messreihe eingestellt. Zwischen den jeweiligen Wiederholungsmessungen wird lediglich die Z-Achse gelöst, während die X- und die Y-Achse fixiert bleiben. Dann wird der Stab kurz bewegt und wieder von der Z-Achse eingespannt. Dieser Vorgang simuliert einen Stabwechsel, da dies die kleinstmögliche Veränderung an der Messapparatur ist, die beim Austauschen eines Stabes gegen einen anderen auftreten könnte. Denn hierbei ändert sich nichts Grundlegendes an der Ausrichtung des Stabes gegenüber den Wandlern. Einzig eine Rotation nach dem Bewegen des Stabes zwischen zwei

Messungen wäre denkbar. Da es sich bei allen Stäben aber um rotationssymmetrische Objekte handelt, sollte dies in der Praxis jedoch keine Rolle spielen.

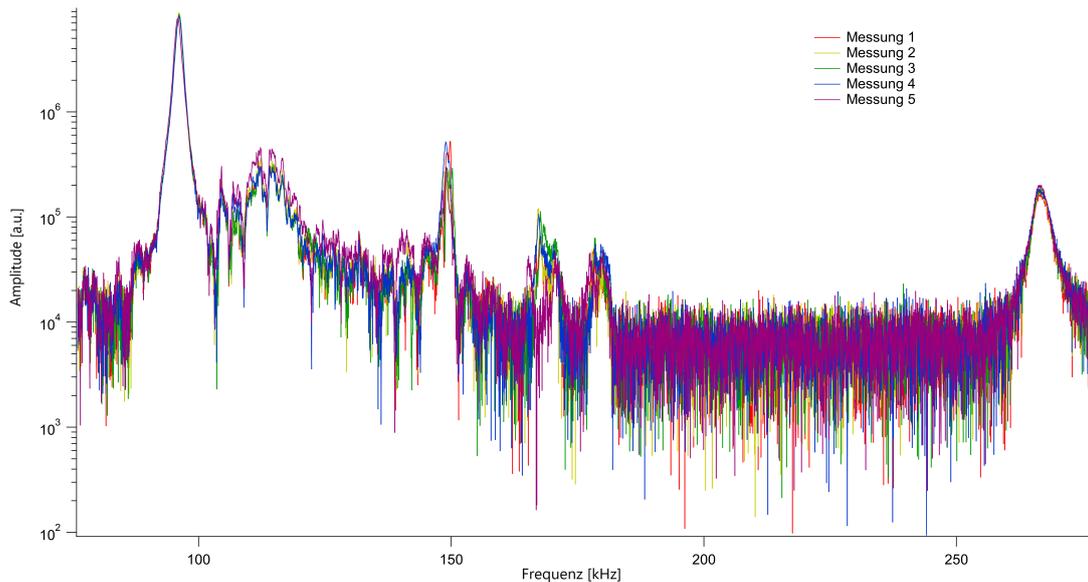


Abbildung 4.1: Fünf Wiederholungsmessungen des 43 mm Stabes mit einem Sweep von 10 bis 750 kHz Frequenzspanne und 20 ms Pulsdauer, angeregt zur Längsschwingung

In Abbildung 4.1 sind fünf aufeinander folgende Messungen desselben Stabes dargestellt. Zur besseren Visualisierung ist hier nur ein Ausschnitt von 75 bis 280 kHz abgebildet. Dort sieht man, dass sich die Messungen hauptsächlich im Rauschbereich unterscheiden. Das Rauschen ist aber zufällig und bietet ohnehin keinen Informationsgehalt über die Stäbe. Die Peaks wiederum liegen sowohl in Bezug auf die Frequenz als auch in Bezug auf die Amplitude sehr dicht beieinander. Sieht man sich die jeweilig am Rand der Abbildung platzierten Peaks bei 96 beziehungsweise 266 kHz an, scheinen sich besonders ausgeprägte Peaks verschiedener Messungen eher zu gleichen, als jene, die kleiner und schmaler sind. Nach der grafischen Auswertung weiterer Wiederholungsmessungen bestätigt sich diese Beobachtung. Frequenz, Amplitude und allgemeine Form des gleichen Peaks mehrerer Messungen unterscheiden sich umso stärker voneinander, desto geringer das Verhältnis von Peak- zu Rauschamplitude in der unmittelbaren Umgebung des Peaks ist.

Der Peak bei circa 149 kHz ist dementsprechend in allen fünf Messungen leicht verschieden. In Messung 1 und Messung 4 haben sie den größten Abstand zueinander. Diese Abweichung lässt sich bei 'Igor Pro' anhand zweier Cursor bestimmen. Sie beträgt 0,88 kHz. In Tabelle 3.1 wurden die Eigenfrequenzen der Längsschwingung der drei Standardstäbe berechnet. Die Eigenfrequenzen des 43 und des 45 mm Stabes unterscheiden sich lediglich um 2,8 kHz. Dieser Frequenzabstand ist nur dreimal so groß, wie die statistische Abweichung des 149 kHz Peaks in Abbildung 4.1. Die Tatsache, dass sich eine Frequenzverschiebung, die durch die Änderung der Stababmessungen bedingt ist, kaum von einer zufälligen Schwankung bei derselben Messung unterscheidet, könnte bei der Auswertung eine Hürde darstellen. Jedoch sollte man nicht außer Acht lassen, dass die Längenänderung hin zu höheren Harmonischen eine größere Frequenzverschiebung bewirkt. Nichtsdestotrotz sollten derartige, statistisch bedingte Abweichungen bei gleichen Messungen bestmöglich minimiert werden.

4.1 Einfluss der Messapparatur

Aufgrund der Einspannung des Stabes ist dieser sehr fest mit den Wandlern und dem gesamten PPS verbunden. Somit kann es zu einer gekoppelten Schwingung kommen. In diesem Fall werden durch die Krafteinwirkung der Einspannung bestimmte Schwingungsmoden des Stabes unterdrückt oder die Schwingung überträgt sich auf das PPS. Dies kann maßgebliche Auswirkungen auf die Eigenfrequenz haben. Um dieser Kopplung entgegenzuwirken, sind die Vertiefungen für die Stabhalterung kegelförmig gefertigt, sodass die ebene Grundfläche der vorwiegend zylindrischen Stäbe stets einen gewissen Abstand zum Boden der Halterung aufweist. Bei senkrechter Einspannung besteht direkter Kontakt zur Halterung also nur an den Kanten des Stabes. Dennoch sind nicht unerhebliche Einflüsse durch den Messaufbau zu erwarten. Hinzu kommt, dass auch die Schallwandler eine Resonanzfrequenz haben, welche entsprechend stärker im Spektrum zum Vorschein kommen sollte. Um einen Eindruck über die durch den Aufbau verursachten äußeren Einflüsse zu gewinnen, wurden die Wandler samt Halterung ohne Stab direkt aufeinander platziert. Das daraus resultierende Spektrum wurde anschließend mit dem eines eingespannten Standardstabes von 47 mm Länge verglichen.

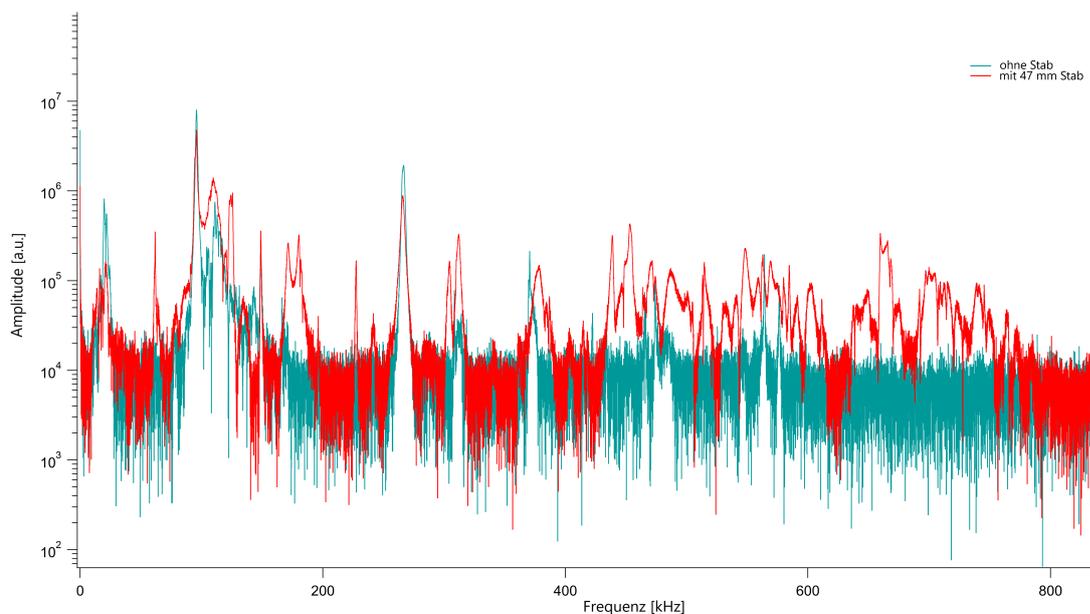


Abbildung 4.2: Vergleich einer Messung ohne Stab (nur die Halterungen für die Längsschwingung) mit einer Messung mit einem 47 mm Stab, jeweils bei einer Gewichtskraft der Z-Achse von 150 g und einem Sweep von 10 bis 800 kHz

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, ergibt sich auch ohne eingespannten Stab ein Spektrum, das teilweise große Ähnlichkeiten mit dem vermeintlichen Spektrum des Stabes aufweist. So teilen sich beide Spektren etwa die beiden jeweils höchsten und signifikantesten Peaks bei 96 und 289 kHz. Da diese beiden Peaks in beiden Messungen quasi identisch vorliegen, steht fest, dass sie durch den Messaufbau und nicht vom Stab verursacht werden. Stabinformationen sind also in den weniger dominanten Peaks zu erwarten. Eine fehlerhafte Annahme wäre jedoch, dass durch den eingespannten Stab lediglich das Spektrum des blanken Messaufbaus um die

Eigenfrequenzen des Stabes erweitert würde. Vielmehr handelt es sich hierbei um zwei schwingungsfähige Systeme, die durch die Einspannung miteinander gekoppelt sind, was zur Ausbildung neuer Eigenfrequenzen führt. Daher dient Abbildung 4.2 lediglich dazu, eine Vorstellung über die Größe des Einflusses des Messaufbaus zu erhalten.

Fest steht, dass das Spektrum eines eingespannten Stabes maßgeblich vom Aufbau beeinflusst wird. Daher ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl an Peaks im Spektrum nicht beziehungsweise kaum durch die Dimensionen eines Stabes verändert werden.

4.2 Schräglage

Um eine optimale Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, sollten Messungen, die zum Vergleich gedacht sind, grundsätzlich unter denselben Bedingungen durchgeführt werden. Dies fängt bei der Art der Einspannung an. Sie ist bei der Längsschwingung prinzipiell leichter zu untersuchen, weil der Experimentator weniger Aspekte bei der Einspannung beachten muss. Bei der Biegeschwingung können sich deutlich mehr Ungenauigkeiten bei der Einspannung einschleichen. Deswegen wird dieses Thema etwas später in diesem Kapitel behandelt.

Für beide Schwingungsarten gilt, dass die Schallemissionsflächen der Wandler parallel zueinander und zum Boden sind. Unter anderem dafür wurde das PPS vorbereitend für die Messungen nivelliert. Explizit bei der Längsschwingung sollte darauf geachtet werden, dass der Stab senkrecht zwischen den jeweiligen Halterungen der Wandler eingespannt ist. So wirkt die Gewichtskraft genau entlang der Längsachse des Stabes und er würde ausschließlich zur Longitudinalschwingung angeregt werden, da die Schallwellen entlang der Mittelachse gerade durch den Stab laufen würden. Würden alle Schallwellen auf diese Weise eingekoppelt werden, wären zum Beispiel keine störenden Reflexionen der Schallwellen an der Mantelfläche des Stabes möglich. Für eine korrekte Einspannung sollte sich der Schallsender genau über dem Empfänger befinden, sodass sie sich dieselbe Mittelachse teilen, auf der sich bei perfekter Einspannung auch der Stab befindet. Dann wird die Z-Achse soweit heruntergelassen, dass der Stab zwischen den Halterungen an den Wandlern eingespannt wird. Anschließend sollte der Prüfer den Stab von mehreren Seiten begutachten und kontrollieren, dass der Stab nicht schief eingespannt ist. Dazu kann man sich eine Libelle zu Hilfe nehmen. Dies gestaltet sich aber bei den vorliegenden Stäben recht schwierig, da man bei den Stablängen von nur wenigen Zentimetern auch eine entsprechend kleine Libelle bräuchte, um diese adäquat Kante-an-Kante an den Stab anzulegen. Aus diesem Grund wurde die Kontrolle der Stabstellung per Augenmaß vorgenommen. Dementsprechend unwahrscheinlich ist es, dass die Einspannung tatsächlich ideal ist. Daher wurden Untersuchungen angestellt, mit dem Ziel den Einfluss der Schräglage eines Stabes herauszufinden. Dazu wurden Messungen miteinander verglichen, wo der Stab zum einen bewusst schräg eingespannt wurde oder wo zum anderen sehr akribisch auf eine exakte Einspannung geachtet wurde.

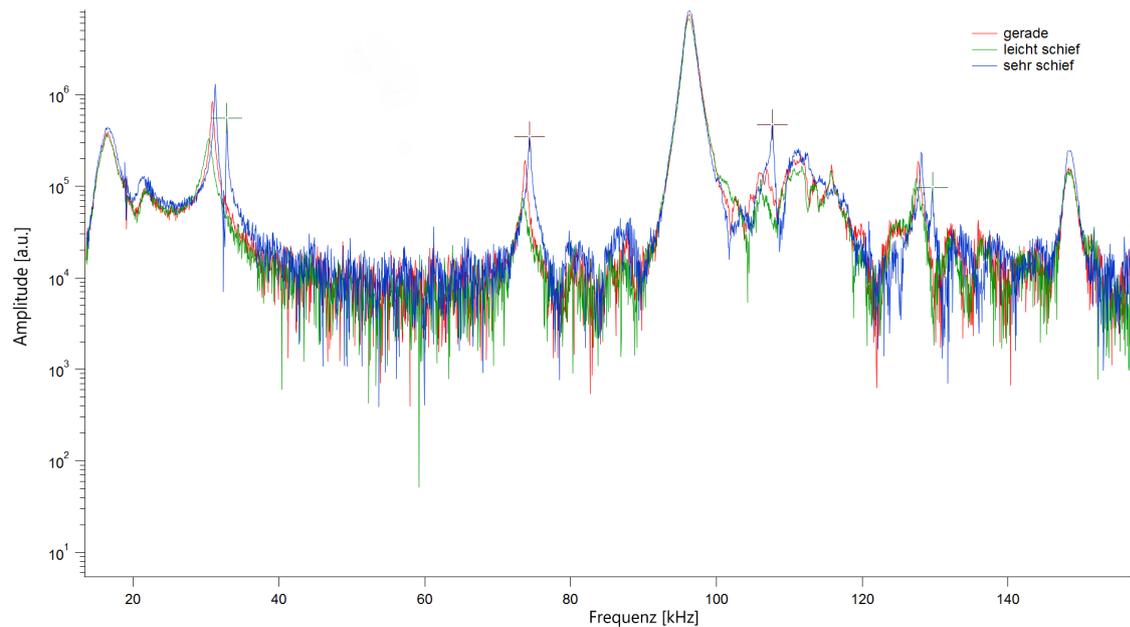


Abbildung 4.3: Vergleich der Spektren desselben Stabes, eingespannt in unterschiedlichen Neigungswinkeln zu den Wandlerfrontflächen

Es wurden die Spektren von insgesamt drei verschiedenen Stabpositionen für den 45 mm Stab zum Vergleich in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Frequenz stieg von 5 auf 200 kHz mit einer Pulsdauer von 20 ms. Die Z-Achse wurde auf ein Gewicht von 300 g eingestellt. Das Spektrum, das in dieser Grafik in Rot zu sehen ist, gehört zu einer Messung, wo die senkrechte Einspannung des Stabes genauestens überprüft wurde. Bei den anderen beiden Messungen wurde der Stab bewusst schief zwischen den beiden Wandlern eingespannt; die Zentren der Wandler waren also nicht auf derselben akustischen Achse. Das grüne Spektrum ist einer Messung zuzuordnen, in der der Stab nur leicht schräg eingespannt wurde. Dem blau gefärbten Spektrum liegt eine Messung zu Grunde, bei der der Stab sehr schief zwischen den Wandlern stand. Dabei bedeutet 'sehr schief', dass der Sender soweit vom Empfänger entfernt wurde, dass der Stab gerade noch zwischen den Wandlern gehalten werden konnte. Die Art der Einspannung war also ganz offensichtlich nicht ideal und könnte bei einer anderen Messung nicht ungewollt in dieser Art auftreten. Im Gegensatz dazu war der Neigungswinkel beim 'leicht schief' eingespannten Stab weniger auffällig, entspräche also schon eher einem Fehler, der bei zukünftigen Messungen unbeabsichtigt vorkommen könnte.

Abbildung 4.3 zeigt, dass ein geringfügiger Neigungswinkel des Stabes gegenüber der Schallemissionsflächen der Wandler kaum Änderungen im Spektrum hervorruft. Die Spektren des gerade und des leicht schief eingespannten Stabes stimmen im Wesentlichen überein. Die Messung des sehr schief eingespannten Stabes hebt sich etwas deutlicher von den anderen beiden ab. Die entsprechenden Stellen im Frequenzspektrum wurden jeweils mit einem Fadenkreuz markiert. An diesen Stellen ist eine prinzipielle Verschiebung der Peaks in Richtung höherer Frequenzen abzusehen. Bei der ersten und der letzten Markierung erkennt man, dass die Messung des sehr schief eingespannten Stabes etwa 2 kHz über der gemeinsamen Resonanz aller drei Messungen einen weiteren Peak aufweist. Dieses Phänomen könnte man sich

dadurch erklären, dass durch die Schiefstellung der senkrechte Abstand zwischen den Wandlerfrontflächen verkleinert wurde. Außerdem wird dadurch der Luftspalt zwischen Halterung und Stab verschmälert. Beides könnte dazu führen, dass die Strecke im Stab kleiner wird. Dies könnte die Verschiebung zu höheren Frequenzen hervorrufen, da kürzere Stäbe verhältnismäßig höhere Eigenfrequenzen haben.

Diese Untersuchung zeigt, dass das Einspannen des Stabes nach Augenmaß ausreichend ist. Wesentliche Unterschiede zwischen den Spektren zeigen sich erst, wenn der Stab merklich schief zwischen den Wandlern steht. Der Prüfer sollte auf eine möglichst senkrechte Einspannung des Stabes achten, jedoch würde auch eine leichte Schräglage nicht störend auf das Spektrum einwirken.

4.3 Schwankungen der einspannenden Kraft

Wie bereits erläutert, lässt sich die Gewichtskraft der Z-Achse die zur Einspannung des Stabes dient, gewissermaßen festlegen. Dazu steht auf der Granitplatte des PPS eine Waage bereit. Mit dieser lassen sich Massen bis zu 50 kg mit einer Unsicherheit von 2 g bestimmen. Aufgrund des geringen Durchmessers der Stäbe wurde die maximal zulässige Kraft vorerst auf höchstens 1000 g begrenzt. Schon beim Einstellen der Gewichtskraft der Z-Achse ist auf der Waage zu erkennen, dass die Kraft gewissen Schwankungen unterlegen ist. Diese treten insbesondere auf, wenn der Kompressor arbeitet, um den Druck aufrecht zu erhalten. Dementsprechend sollte einerseits die maximale Schwankung der Gewichtskraft und andererseits die Auswirkung der Gewichtskraft auf eine Messung bekannt sein.

Um die Schwankung der Gewichtskraft zu untersuchen, wird die Z-Achse auf der Mitte der Waage platziert. Das Wunschgewicht wird im zunächst unfixierten Zustand eingestellt. Anschließend wird die angezeigte Masse über mehrere Pumpzyklen des Kompressors überwacht. Dazu wird die Achse vor Notierung des Gewichts angehoben, wieder auf die Waage gesetzt und dann fixiert. Voraussichtlich sind hierbei die Messungen des Gewichtes unmittelbar vor, nach und während des Pumpens des Kompressors besonders interessant, da hier die größten Druckunterschiede vorliegen. Darüber hinaus könnte diese Schwankung auch mit der gewünschten Gewichtskraft zusammenhängen.

Stellt man eine Masse von 200 g ein, variiert das Gewicht zwischen 160 und 240 g. Hier gibt es also eine Ungenauigkeit von ± 40 g. Um den vermuteten Zusammenhang zwischen eingestelltem Gewicht und Schwankung zu untersuchen, wurde diese Ungenauigkeit ebenfalls für eine Ausgangsmasse von 900 g bestimmt. Hier ergab sich eine Abweichung vom eingestellten Gewicht von etwa ± 60 g. Die absolute Abweichung der anvisierten Gewichtskraft nimmt also leicht zu. Relativ betrachtet, wird der hierbei entstehende Fehler hingegen kleiner. Allerdings scheint diese Schwankung in keinerlei Zusammenhang zu dem aktuellen Kompressorzustand zu stehen. Die Ungenauigkeit ist vor, nach und während des Pumpens nicht auffällig verschieden. Die zugrunde liegenden Messwerte sind in Tabelle 4.1 zu sehen.

Tabelle 4.1: Schwankung der einspannenden Kraft

gewünschte Masse	200 g	900 g
Gewicht vor Pumpen	158 g, 224 g, 176 g 219 g, 205 g	956 g, 903 g, 872 g 884 g, 920 g
Gewicht während Pumpen	239 g, 244 g 165 g, 212 g	917 g, 839 g 891 g, 844 g
Gewicht nach Pumpen	188 g, 191 g 242 g, 159 g	940 g, 864 g 959 g, 961 g
Mittelwert	201,7 g	903,8 g
Standardabweichung	30,1 g	40,9 g
mittlere absolute Abweichung	26,77 g	35,54 g
mittlere relative Abweichung	13,4%	3,9%

Blickt man auf den Einfluss der Gewichtskraft auf eine Messung, stellt man eine Zunahme der Amplitude des registrierten Signals mit steigender Gewichtskraft fest. Die Frequenzen der entsprechenden Peaks unterliegen keinen signifikanten Änderungen. Die Rauschamplitude ist ebenfalls konstant. Das Signal-Rausch-Verhältnis steigt also mit zunehmender Gewichtskraft. Diese Erkenntnis wurde aus etlichen Messungen gewonnen, bei denen mehrere Stäbe mit einer verschiedenen großen Gewichtskraft eingespannt wurden. Darüber hinaus wurde das A-Bild bei einer wirkenden Masse der Z-Achse von 500 g registriert. Daraufhin wurde die Gewichtskraft mittels des Rädchens an der Z-Achse soweit herunter gedreht, bis die Amplitude des A-Bildes nur noch bei der Hälfte der Ursprünglichen war. Danach wurde die Z-Achse erneut gewogen. Nach Halbierung der Amplitude betrug die wirkende Masse lediglich noch 160 g. Will man hingegen die Amplitude verdoppeln, ist ein Anstieg der Gewichtskraft der Z-Achse von 500 g auf 880 g notwendig. Der Zusammenhang zwischen Amplitude und Gewichtskraft ist im relevanten Bereich also nahezu linear. Bei einer Ungenauigkeit der eingestellten Gewichtskraft von ± 60 g liegt diese innerhalb einer Messreihe bis zu 120 g auseinander, ohne dass Änderungen an der Z-Achse vorgenommen werden. Diese 120 g betragen etwa ein Drittel von dem was es braucht, um die Amplitude zu verdoppeln beziehungsweise zu halbieren. Davon ausgehend können sich die Amplituden der Peaks zweier Messungen, die nur zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit dienen, um bis zu 33 % unterscheiden. Demzufolge ist die Amplitude also keineswegs reproduzierbar, was jedoch für die Bestimmung von Eigenfrequenzen nur zweitrangig ist. Entscheidend ist, dass sich eine Erhöhung oder Verminderung der Gewichtskraft nicht auf die Frequenzen der Peaks im Spektrum auswirkt. Die Frequenz eines Peaks schwankt auch nach Verdopplung der Gewichtskraft nur innerhalb der Ungenauigkeit, die bei der oben beschriebenen Messung zur Reproduzierbarkeit bestimmt wurde.

In Folge der verschiedenen Messungen wurde der dafür verwendete Stab leicht verbogen. Grund dafür war die zu groß gewählte Gewichtskraft der Z-Achse. Die Deformation des Stabes fiel zunächst im A-Bild auf, da sich dieses mit der Rotation des Stabes in der Einspannung deutlich sichtbar änderte. Dementsprechend wurde die Begrenzung für das maximal zulässige Gewicht von 1000 g auf 500 g herabgesetzt. Damit trat dieses Problem nicht weiter auf.

4.4 Probleme bei der Anregung zur Biegeschwingung

Auch bei der Anregung zur Biegeschwingung ist die Art der Einspannung kritisch. Wie zuvor angesprochen sind hier weitaus mehr Fehler möglich, als bei der Längsschwingung. Für die Biegeschwingung muss der Stab nunmehr parallel zum Boden ausgerichtet werden, anstatt orthogonal. Dabei liegt der Stab links auf der Halterung des Empfängers auf und rechts auf einer zusätzlich angebrachten Halterung, die nicht auf einen Schallwandler geklebt ist. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.4



Abbildung 4.4: Stabhalterung für die Biegeschwingung

Sind diese beiden Halterungen auf derselben Höhe, ist eine ideal horizontale Ausrichtung des Stabes gegeben. Außerdem muss auf den Abstand zwischen den beiden Halterungen geachtet werden. Ist dieser zu gering gewählt, ragt der Stab gegebenenfalls über eine Halterung hinaus. Eine weitere Fehlerquelle stellt die Position des Senders dar. Dieser sollte im Idealfall auf der Mitte des Stabes aufliegen. Im Endeffekt sollte dieser Aufbau optimalerweise in sich symmetrisch sein, wobei die Symmetrie-Achse zentral durch den Schallsender verlaufen würde.

Wie auch bei der Längsschwingung sollte zunächst bekannt sein, inwieweit sich die Spektren zweier aufeinanderfolgender Messungen unterscheiden, die unter denselben Bedingungen aufgenommen wurden. Dazu wird wieder ein Stab eingespannt und nach Aufnahme des ersten A-Bildes kurz aus der Einspannung genommen, indem lediglich die Z-Achse gelöst wird. Danach wird der Stab gegebenenfalls leicht rotiert wieder in die Vorrichtung gespannt, sodass ein weiteres A-Bild generiert werden kann.

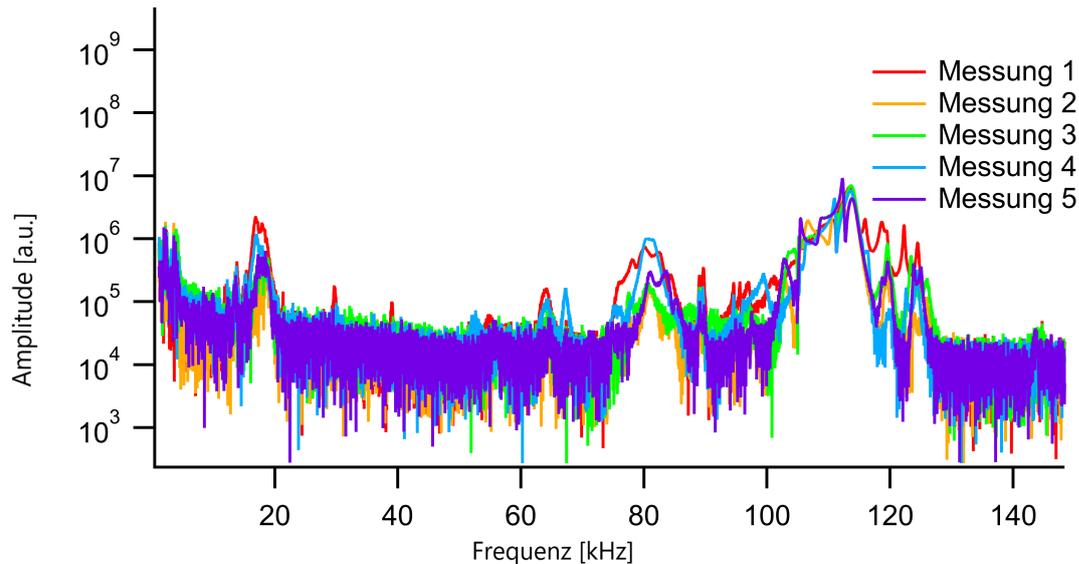


Abbildung 4.5: Ausschnitt einer Messung zur Reproduzierbarkeit der Biegeschwingung, gemessen mit dem 45 mm Stab, Pulsdauer: 40 ms, Frequenzspanne: 10 bis 800 kHz, Gewicht der Z-Achse: 150 g

Hier wurden 5 einzelne Messungen repräsentativ für die gesamte Messreihe ausgewählt und vergleichend in einer Grafik abgebildet. Das vergleichsweise starke Rauschen abseits der Peaks ist auf die Verwendung eines anderen Verstärkers zurückzuführen. Bezüglich der Reproduzierbarkeit ist dieses Rauschen jedoch unerheblich, da die für die Auswertung entscheidenden Peaks ebenfalls stark voneinander abweichen. Gemeinsame Peaks sind bei beispielsweise 19, 82 und 117 kHz zwar noch erkennbar, im Vergleich zur Längsschwingung sind diese aber deutlich verschiedener. Durch ihre unterschiedlichen Formen und Breiten liegen diese Erhebungen oft nicht bei der gleichen Frequenz, sodass die augenscheinlich selben Peaks eine Ungenauigkeit von etwa ± 3 kHz aufweisen. Die Amplitude ist für die Zuordnung charakteristischer Peaks zwar weniger entscheidend, dennoch fällt hier ein Unterschied zwischen den einzelnen Messungen auf, der im Bereich einer ganzen Größenordnung liegt. Die Biegeschwingung ist gegenüber der Längsschwingung also wesentlich schlechter reproduzierbar und dadurch grundsätzlich weniger für die Auswertung geeignet. Rechtsseitig des Stabes ist das Lager so konzipiert, dass maximal 2 mm des Stabes auf der Halterung liegen können, bis die Grundfläche des zylindrischen Stabes an dem Lager anstößt. Darauf basierend wurde geprüft, ob das Spektrum des Stabes abhängig vom Abstand zwischen Stabgrundfläche und Lagerwand ist. Es wäre vorteilhaft, sollte hier keine Abhängigkeit vorliegen, da zu erwarten ist, dass ein Kontakt zwischen Lagerwand und Stab Auswirkungen auf die Schwingungen des Stabes hat, weil die Schallwellen durch den engen Kontakt deutlich besser in das Lager eingekoppelt werden könnten und dieses ebenfalls stärker zur Schwingung angeregt werden könnte. Dieser Einfluss auf das Spektrum birgt keinerlei Informationen über den jeweiligen Stab und sollte daher im Idealfall ausgeschlossen werden. Dazu muss das Spektrum aber für jeden möglichen Abstand des Stabes zur Wand gleich sein, da dieser nicht präzise genug einstellbar ist, um für aufeinanderfolgende Messungen den gleichen Abstand zu gewährleisten. Der Kontakt zur Lagerwand

stellt zwar einen störenden Einfluss dar, jedoch ist dieser leichter konstant zu halten. So wurden mehrere Spektren für verschieden große Abstände aufgenommen und mit der herkömmlichen Messung zur Reproduzierbarkeit, bei der kein Abstand zwischen Stab und Lagerwand bestand, verglichen.

Dabei wurde durchaus eine Abhängigkeit des Spektrums vom Abstand zur Wand festgestellt. Demnach ruft ein wachsender Abstand eine Verbreiterung bereits existierender Peaks sowie die Entstehung völlig Neuer hervor. Dieses Phänomen lässt sich damit erklären, dass durch die Art der Einspannung verschiedene Schwingungsmoden unterdrückt werden. An den Wirkungspunkten der einspannenden Kräfte werden auf diese Weise eventuelle Schwingungsbäuche supprimiert, während solche Moden, die an dieser entsprechenden Stelle einen Schwingungsknoten besitzen nicht eingeschränkt werden und dadurch besser zur Geltung kommen. So kommt es zur Entstehung von weiteren Peaks im Spektrum.

Weil sich das Spektrum also wesentlich mit der Abstandsvergrößerung zwischen Stab und Wand ändert, man diesen Abstand aber nicht angemessen reproduzieren kann, wird generell auf den Abstand verzichtet, sodass der Stab bei jeder Messung zur Biegeschwingung an der Wand der Halterung anliegen sollte.

Definitiv einen Einfluss auf das Spektrum sollte der horizontale Abstand zwischen Sender und Empfänger haben. Dieser beträgt im Optimalfall exakt die halbe Stablänge, da der Schallsender in der Mitte des Stabes aufliegen sollte, während sich der Empfänger an einem Ende des Stabes befindet. Hierbei werden die Halterungen, die auf die Wandler geklebt sind, zu einem Problem. Denn diese erschweren zum einen das korrekte Anlegen eines Stahlmaßes oder Messschiebers und zum anderen sind sie bis zu 2 mm breit, wodurch der Mittelpunkt der Halterung lediglich abzuschätzen ist, wenn man die Z-Achse auf dem Stab platziert. Aufgrund dessen ist beim Einspannen des Stabes von einer durchschnittlichen Abweichung von ± 2 mm auszugehen. Allerdings ist zu bedenken, dass diese Abweichung für dieselbe Messreihe stets konstant ist, da innerhalb einer Messreihe für gewöhnlich keine Änderungen der Positionen von X- und Y-Achse vorgenommen werden.

Zur Untersuchung der Auswirkung dieses Abstandes wurde der Schallsender bewusst nicht zentral auf dem Stab abgesetzt, sondern deutlich näher am Empfänger beziehungsweise deutlich weiter von ihm entfernt. Für alle dieser Fälle wurden etliche wiederholende Messungen durchgeführt, sodass genügend Messwerte vorhanden sind, um die drei verschiedenen Sender-Positionen miteinander zu vergleichen. Die Messung wurde für jede Ausführung des Standardstabes wiederholt. In Abbildung 4.6 werden drei Spektren des 47 mm-Stabes repräsentiert, die jeweils einen unterschiedlichen horizontalen Abstand a zwischen Sender und Empfänger aufweisen. So ergibt sich folgende Grafik:

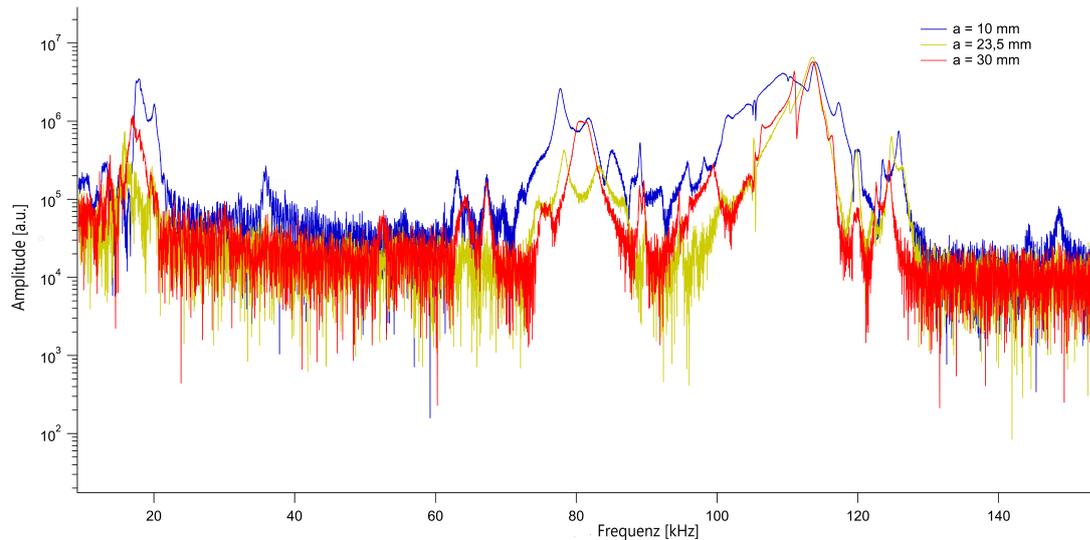


Abbildung 4.6: Einfluss des horizontalen Abstandes zwischen Sender und Empfänger a , 5 bis 150 kHz Sweep mit einer Pulsdauer von 20 ms

Generell fällt auf, dass der blaue Graph ein deutlich größeres Amplitude-Rausch-Verhältnis besitzt, als die anderen beiden Graphen. Dies wird durch den verringerten Abstand a ausgelöst, denn auf einer kürzeren Strecke wird die Schwingung insgesamt auch schwächer gedämpft. Einzelne Peaks, die aufgrund ihrer Form und Distanz zu weiteren signifikanten Erhebungen im Spektrum zur selben Schwingungsmoden gehören, wie beispielsweise bei 17 kHz oder bei 125 kHz, unterscheiden sich zwar relativ stark in ihrer Frequenz, liegen aber noch im Rahmen der ± 3 kHz, die zuvor als statistisch bedingte Ungenauigkeit bestimmt wurden. Darüber hinaus kommen bei den Messungen mit dem Sender abseits der Stabmitte neue Peaks zum Vorschein, zum Beispiel im blauen Graph bei 35 kHz, die dadurch bedingt sind, dass durch die veränderte Abstandsstrecke a völlig neue Schwingungsmoden gefördert beziehungsweise unterdrückt werden.

4.5 Schlussfolgerung

Aus den verschiedenen Messreihen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit einer Einzelmessung lässt sich schlussfolgern, dass die Längsschwingung insgesamt besser zum Erkennen beziehungsweise Unterscheiden relevanter Stabeigenschaften geeignet ist, als die Biegeschwingung. Die Art der Einspannung, die nötig ist, um zur Biegeschwingung anzuregen, unterdrückt leider gleichzeitig auch einige Schwingungsmoden und hat daher einen beeinträchtigenden Einfluss auf die Messung. Außerdem bietet die Einspannung zur Längsschwingung deutlich weniger mögliche Fehlerquellen beim Aufbau. Eventuelle Unterschiede zwischen wiederholenden Messungen rühren im Wesentlichen von einer Schiefelage des Stabes oder der Schwankung der einspannenden Gewichtskraft her. Bei den vom Aufbau sowie der Einspannung verursachten Einflüssen handelt es sich um systematische Messfehler, da diese einseitig gerichtet und durch eine bekannte Ursache bedingt sind, während der Einfluss der schwankenden Gewichtskraft auf die Messung ein zufälliger Fehler ist. Diese

Probleme betreffen die Biegeschwingung gleichermaßen. Allerdings kommen hier noch weitere Umstände, die zu Messungenauigkeiten führen, hinzu, wie etwa der horizontale Abstand zwischen Sender und Empfänger. Dies führt dazu, dass die ermittelte Ungenauigkeit bei der Biegeschwingung mit ± 3 kHz bis zu sechsmal größer ist, als die bei der Längsschwingung. Die Ungenauigkeit bei der Biegeschwingung ist teilweise also größer als der Unterschied der Eigenfrequenzen bei einer Änderung der Stablänge um 2 mm. Demnach ist die Längsschwingung bezüglich der Eigenfrequenzen entsprechend aussagekräftiger und zur fortführenden Analyse der Stäbe zu bevorzugen.

5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Letztlich soll eine Messung anhand des Spektrums dem entsprechenden Stab zugeordnet werden können. So soll die Verschiebung der Eigenfrequenz, wie sie durch die Änderung der Stababmessungen verursacht wird, im Spektrum überprüft werden. Aus den Vorbetrachtungen zur Reproduzierbarkeit einer einzelnen Messung mit dem PPS folgt, dass jener Zusammenhang voraussichtlich besser bei der Längsschwingung sichtbar wäre. Hinzu kommt, dass die Verschiebung der Eigenfrequenz bei der Längsschwingung lediglich von der Änderung der Stablänge abhängt und daher leichter zu untersuchen ist. Dazu wird jede Ausführung des Standardstabs mehrfach vermessen. Nacheinander werden jeweils etwa 100 gleichlange Stäbe geprüft. Die maximale Frequenz, die das Sweep-Signal dabei erreicht hat, betrug 800 kHz. Dementsprechend wurde zur Intensivierung des gemessenen Signals der nicht-steuerbare Verstärker benutzt. Die Verstärkung bleibt also konstant bei 50 dB und die Amplitude muss über die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators reguliert werden. Diese beträgt in den meisten Fällen maximal 10 V, je nach Stablänge aber auch teilweise weniger. Bei dem 47 mm Stab wurde die Spannung etwa auf 6 bis 7 V eingestellt. Dadurch wird verhindert, dass die Amplitude im A-Bild übersteuert. Bei dem 43 mm Stab reichen in vielen Fällen selbst 10 V nicht für eine maximale Amplitude. Diese beträgt zwischen 40 und 60% des Maximums. So kommt es zu vergleichsweise großen Amplitudenunterschieden zwischen den jeweiligen Messreihen.

Aus Tabelle 3.1 ist bekannt in welchem Frequenzbereich die Eigenschwingungen zu erwarten sind und welche Frequenzverschiebung die jeweilige Längenänderung theoretisch bewirken sollte. Im Idealfall sollten die Peaks, die zur selben Schwingungsmoden gehören, im entsprechenden Spektrum auch eine ähnliche Form und Größe haben. In Anbetracht der Reproduzierbarkeit, speziell der der Amplitude sowie der Tatsache, dass auch bei der Längsschwingung einspannungsbedingt bestimmte Moden unterdrückt beziehungsweise abgeschwächt werden, ist jedoch nicht davon auszugehen, dass eine Eigenschwingung in jedem Spektrum gleichartig auftritt. Dennoch konnten Peaks gefunden werden, bei denen es sich höchstwahrscheinlich um Eigenschwingungen handelt. Diese sind in Abbildung 5.1 zu sehen. Sie sind jeweils mit einer schwarzen Pfeilspitze markiert und liegen bei 112,6; 118,6 und 122,8 kHz beziehungsweise bei 266,6; 278,3 und 291,6 kHz. Das Anregungssignal reichte hierbei von 10 bis 1200 kHz und die Pulsdauer betrug 100 ms, bei einem eingestellten Gewicht von 300 g.

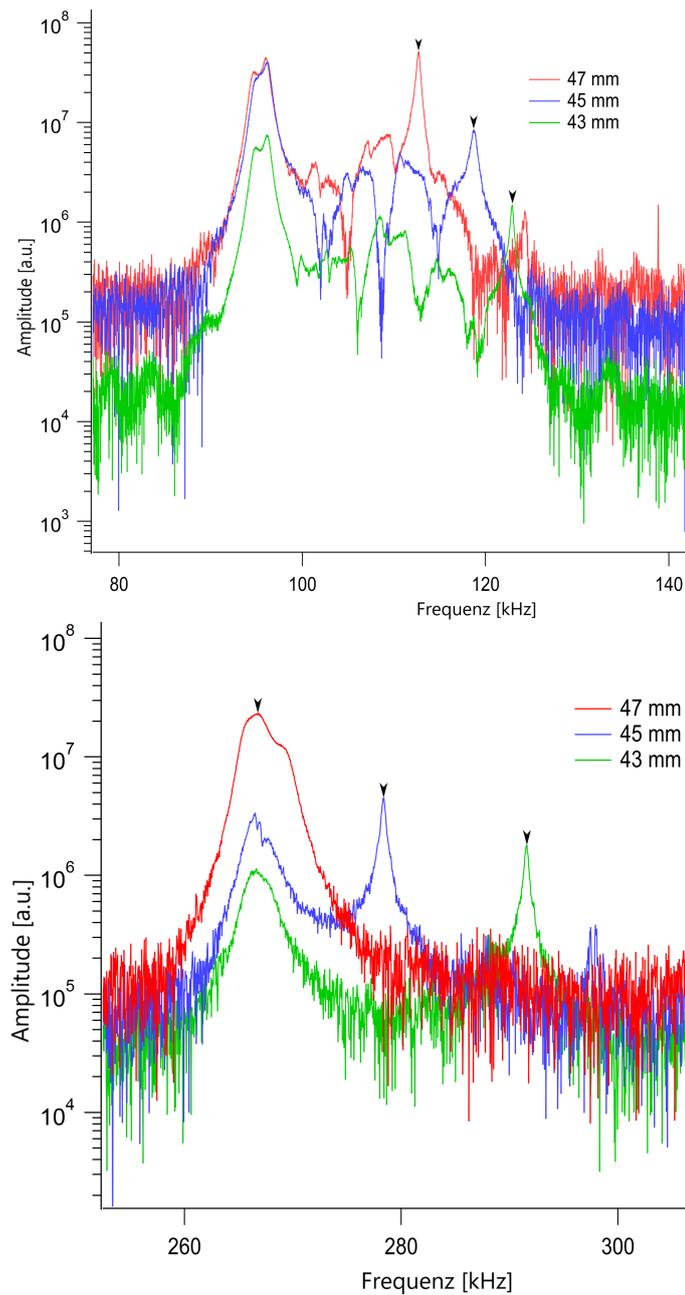


Abbildung 5.1: mögliche Eigenschwingung der Stäbe

Nun lassen sich diese gefundenen Peaks mit den Errechneten aus Tabelle 3.1 vergleichen. Da bereits bekannt ist, dass die Schwingung des Stabes nicht zu vernachlässigend stark an die Halterung gekoppelt ist, spielt dabei in erster Linie das Verhältnis von relativer Längenänderung zu relativer Frequenzänderung eine Rolle. Laut Theorie sollte dieses bei einer Längsschwingung bei 1 liegen, die relativen Änderungen sollten also gleichgroß sein.

Tabelle 5.1: Überprüfung möglicher Eigenfrequenzen des Standardstabes

Standardstab der Länge: rel. Längenänderung $\Delta l/l$	47 mm /	45 mm 0,0465	43 mm 0,093
1. Schwingung	112,6 kHz	118,6 kHz	122,8 kHz
relative Frequenzänderung $\Delta f/f$	/	0,0533	0,0906
Verhältnis $\frac{\Delta l/l}{\Delta f/f}$	/	0,87	1,03
2. Schwingung	266,6 kHz	278,3 kHz	291,6 kHz
relative Frequenzänderung $\Delta f/f$	/	0,0439	0,0938
Verhältnis $\frac{\Delta l/l}{\Delta f/f}$	/	1,06	0,99

Für diese beiden abgebildeten Schwingungen entsprechen die Änderungen der Eigenfrequenzen mit relativ geringer Abweichung denen, die laut Theorie aus der jeweiligen Längenänderung folgen. Die entsprechenden Peaks sind in dem Spektrum optisch sehr dominant und grenzen sich deutlich vom Rauschen sowie von den jeweils anderen Graphen ab. Hier herrscht auch eine recht große Ähnlichkeit, was die Höhe und Form der Peaks betrifft, wodurch es wahrscheinlicher ist, dass diese Peaks zur selben Schwingung gehören. Eine Ausnahme bildet der 47 mm Stab bei der 2. Schwingung. Dort liegt der Peak der vermeintlichen Eigenschwingung unmittelbar auf einem weiteren Peak, der unabhängig von der Stablänge immer bei dieser Frequenz von 266,6 kHz auftritt. Somit kommt es zur Überlagerung einer Schwingung des Systems und einer vermeintlichen Eigenschwingung des Stabes, weshalb der Peak an dieser Stelle entsprechend größer ist, als bei den anderen beiden Stäben.

Entgegen der theoretischen Erwartungen sind jedoch keine möglichen Eigenschwingungen aller drei Stäbe zwischen 60 und 70 kHz zu finden. Es ist davon auszugehen, dass die errechneten Frequenzen aufgrund der starken Kopplung zwischen Stab und Halterung hinfällig sind. Daher werden eventuelle Eigenfrequenzen in erster Linie durch ihre Frequenzverschiebung nach Änderung der Stablänge ausgezeichnet. Daneben trägt auch das Verhältnis der Eigenfrequenz zu den jeweiligen höheren Moden zur Identifikation bei. So sind die Frequenzen aller Oberschwingungen ganzzahlige Vielfache der Frequenz der Grundschiwingung. Die Frequenz der ersten Oberschwingung beträgt demnach das Doppelte der Eigenfrequenz.

Die zur 2. Schwingung zugehörigen Frequenzen aus Tabelle 5.1 betragen in etwa das 2,4-fache der Frequenzen der ersten Schwingung. Sie können also als Grundschiwingung und erste Oberschwingung betrachtet werden.

Auf der Suche nach höheren Harmonischen stellt man fest, dass die unterschiedlich langen Stäbe mit wachsender Frequenz zunehmend mehr Verschiedenheiten aufweisen. Gemeinsame Peaks treten immer seltener auf, während sich Separate häufen. Auch Größe und Form sind sehr wechselhaft. Dies erschwert das Finden weiterer Eigenschwingungen erheblich. Dennoch konnten zwei weitere Schwingungen ausgemacht werden, die hauptsächlich ihres Frequenzunterschiedes der Stäbe zueinander nach zu urteilen, zu Eigenschwingungsmoden des entsprechenden Stabes gehören könnten. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist jedoch deutlich geringer, als bei der vermeintlichen Grund- sowie der ersten Oberschwingung. Dies ist vorrangig der generellen Unähnlichkeit der Spektren der jeweiligen Stäbe im höheren Frequenzbereich geschuldet. Während die Peaks der Grundschiwingung in Abbildung 5.1 visuell noch relativ leicht auszumachen sind, ist dies bei den höheren Harmonischen nicht mehr

möglich. Hier gilt fast ausschließlich die Frequenzverschiebung als Entscheidungskriterium. Einen Eindruck dieser Problematik lässt sich in Abbildung 5.2 gewinnen.

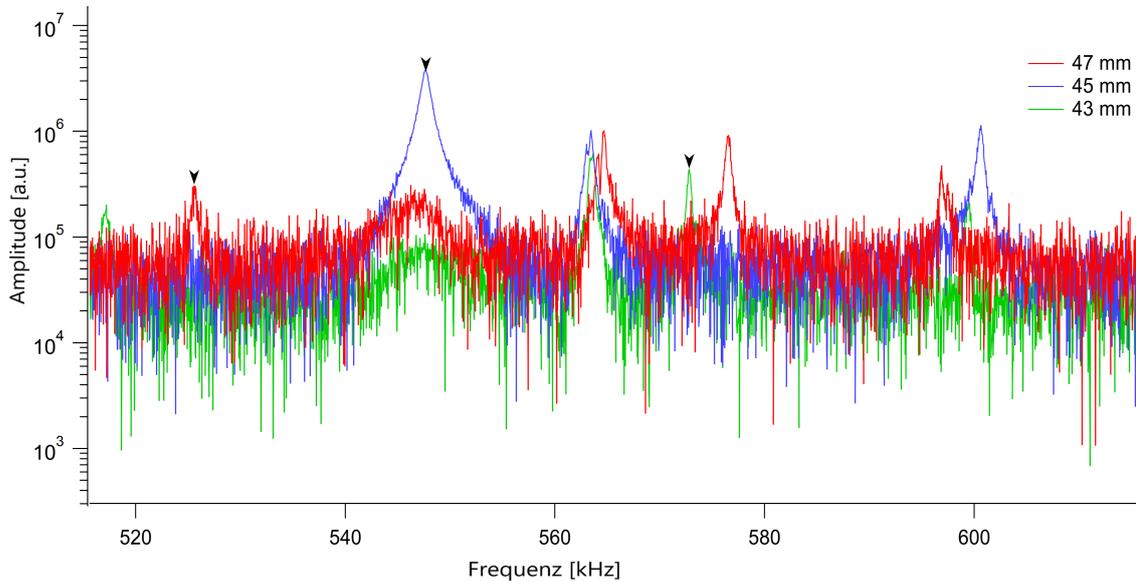


Abbildung 5.2: höhere Schwingungsmode

Die drei markierten Peaks unterscheiden sich optisch sehr deutlich. Während der des 45 mm Stabes extrem groß und präsent ist, ist der Peak des 47 mm Stabes nur sehr schwer auszumachen und von einem starken Rauschen betroffen. Unglücklicherweise ist zum Beispiel eben jener Peak nicht in dem Spektrum jeder Messung zu sehen. Er geht manchmal im Rauschen unter. Hier wurde also eine zur Darstellung geeignete Messung gewählt. Andere, vermeintlich nicht vom Probestab abhängige Peaks in dieser Grafik sind teilweise viel besser zu erkennen. Lediglich der Frequenzabstand dieser markierten Peaks zueinander führte zu dieser Entscheidung. Die Frequenzen sowie deren Verhältnisse zur Längenänderung für diese und eine höherwertige Schwingung, bei der es sich um eine Eigenschwingung handeln könnte, sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 5.2: Überprüfung möglicher höherer Schwingungsmoden des Standardstabes

Standardstab der Länge: rel. Längenänderung $\Delta l/l$	47 mm /	45 mm 0,0465	43 mm 0,093
3. Schwingung	525,7 kHz	547,7 kHz	572,8 kHz
relative Frequenzänderung $\Delta f/f$	/	0,0418	0,0945
Verhältnis $\frac{\Delta l/l}{\Delta f/f}$	/	1,11	0,98
4. Schwingung	676,2 kHz	705,5 kHz	743,8 kHz
relative Frequenzänderung $\Delta f/f$	/	0,0433	0,1000
Verhältnis $\frac{\Delta l/l}{\Delta f/f}$	/	1,07	0,93

Auch bei diesen beiden Schwingungen deutet das Verhältnis von Längen- zu Frequenzänderung auf eine Eigenschwingung hin. Auf der Annahme basierend, dass die Grundfrequenz bei circa 120 kHz liegt, könnte es sich bei der hier als 3. Schwingung bezeichneten Mode um die dritte Oberschwingung handeln. Die 4. Schwingung aus

der Tabelle wäre dementsprechend die vierte Oberschwingung. Dieser Theorie nach sollte jedoch die zweite Oberschwingung bei ungefähr 400 kHz aufzufinden sein, was bei den Messungen jedoch nicht bestätigt werden konnte.

Eine so deutliche Stabänderung wie die Verlängerung beziehungsweise Verkürzung um 2 mm, die bereits mit bloßem Auge zu erkennen ist, kann also mäßig gut detektiert werden. Positiv ist anzumerken, dass zumindest die Grundschiwingung sowie die erste Oberschwingung klar und regelmäßig zu erkennen sind und somit mit recht großer Sicherheit dem Stab zugeordnet werden können. Die Tatsache, dass die Frequenzen in völlig anderen Bereichen liegen, als aus der theoretischen Berechnung hervorging, lässt jedoch vermuten, dass die Schwingungen der Stäbe extrem stark vom restlichen Messaufbau beeinflusst werden. Es ist also eher unwahrscheinlich, dass auf diese Weise Haarrisse, Poren oder andere sehr kleine Bauteilfehler mit ausreichender Sicherheit gefunden werden können.

Auch bei der Biegeschwingung wurde versucht, solche Eigenschwingungen zu finden. Hier zeichnete sich jedoch bereits nach wenigen Messungen ab, dass der unzureichende Messaufbau beziehungsweise die damit einhergehende, schlechte Reproduzierbarkeit eine Detektion entsprechender Peaks unmöglich macht. Unter den aktuellen Umständen ist die Biegeschwingung also nicht zur Identifizierung beziehungsweise Charakterisierung der Drehteile geeignet.

6 Test mit verändertem Messaufbau

Wie sich in vorangegangenen Messungen herausstellte, führt die bisherige Art der Einspannung zu einer stark gekoppelten Schwingung. Darüber hinaus werden bestimmte Schwingungsmoden durch die Fixierung des Stabes unterdrückt. An den Halterungspunkten können sich keine Schwingungsbäuche ausbilden. Um die Schwingungen des Stabes zu messen, muss dieser jedoch irgendwo fixiert werden. Außerdem ist zur Einkopplung der Schallwellen in den Stab ebenfalls Kontakt zu einem Wandler notwendig.

Damit die Moden grundsätzlich weniger stark beeinflusst werden, kann der Stab auch mittig fixiert werden. Dazu dient ein Ring, dessen Innendurchmesser soweit verkleinerbar ist, dass er einen Stab halten kann. Auf diese Weise werden lediglich solche Moden unterdrückt, die in der Mitte des Stabes einen Schwingungsbauch ausbilden. Dies betrifft Moden, deren Wellenlänge ein ungeradzahliges Vielfaches der Wellenlänge der Grundschwingung entspricht, also die Grundschwingung selbst, die zweite Oberschwingung usw.. Alle anderen Moden haben am Fixierpunkt einen Schwingungsknoten, was theoretisch dazu führen sollte, dass eben diese Moden gefördert und dadurch deutlicher im Spektrum sichtbar sein könnten.

Zur Anregung der Schwingung dient in diesem Fall ein sogenannter Klopfert. Dieser schlägt einmal pro Sekunde sehr schnell gegen eine Seite des Stabes und versetzt ihn dadurch in Schwingung. Ein idealer Knall, welcher durch das Anklopfen imitiert werden soll, enthält sämtliche Frequenzen. So wird also das vom Wandler ausgesandte Sweep-Signal simuliert. Als Ersatz für den Schallempfänger dient ein Mikrophon der Firma 'Xarion', Modell: 'Eta 250', welches an der anderen Seite des Stabes positioniert wird. Dieses Mikrophon wird am FZ-U normalerweise für die Schallfeldcharakterisierung verschiedener Ultraschallwandler genutzt, ist also durchaus in der Lage Luftultraschall zu registrieren. Könnte es das nicht, wäre es für diese Messung ungeeignet, da es keinen direkten Kontakt zum Stab hat. Dennoch sollte sich das Mikrophon so nah wie möglich am Stab befinden, sodass Verluste minimiert werden. Wichtig ist auch, dass sich Klopfert und Stab auf derselben Höhe befinden. Abbildung 6.1 zeigt diesen Versuchsaufbau.

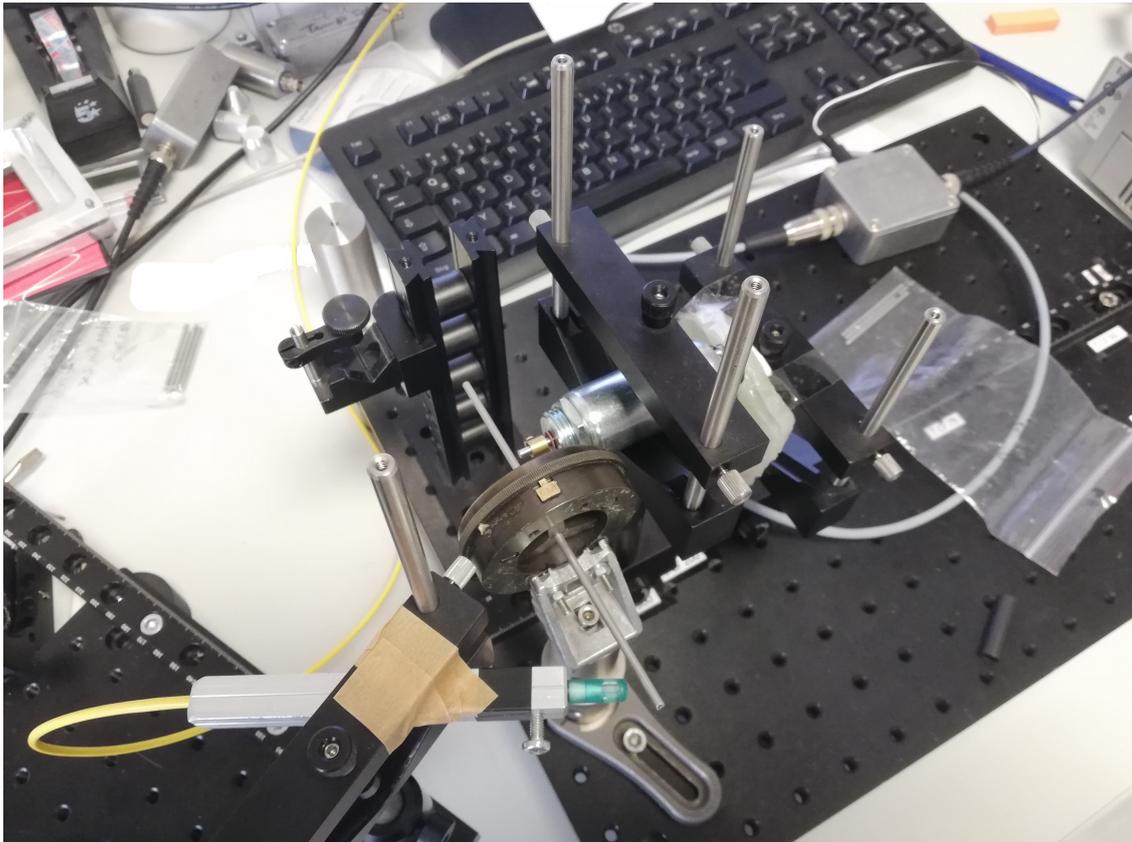


Abbildung 6.1: neuer Versuchsaufbau mit Klopfer, Mikrophon und zentraler Halterung

Unter den gegebenen Umständen ist der Stab bis auf Weiteres nur zur Biegeschwingung anregbar, was bei der Berechnung der Eigenfrequenzen beachtet werden sollte. Aus praktischen Gründen wurden für diese Messreihe Stäbe mit anderen Abmessungen als beim Standardstab benutzt. Diese Stäbe sind etwas dicker, sodass sie besser von dem Ring fixiert werden können. Sie haben alle drei einen Durchmesser von 2,65 mm, unterscheiden sich aber deutlich in ihrer Länge. So gibt es die Ausführung von 47 mm, 56,3 mm und, wie in Abbildung 6.1 zu sehen, 123 mm Länge. Somit sind Schwingungen bei den folgenden Frequenzen zu erwarten:

Tabelle 6.1: zu erwartende Schwingungen der Stäbe für den neuen Versuchsaufbau

n	f(123 mm) / kHz	f(56,3 mm) / kHz	f(47 mm) / kHz
1	0,92	4,83	6,30
2	2,54	13,32	17,37
3	4,97	26,12	34,05
4	8,22	43,18	56,28
5	12,28	64,50	84,08
6	17,15	90,09	117,43

Hierbei gilt zu beachten, dass die Moden mit ungerader Ordnung unterdrückt werden und damit für die Betrachtung des Spektrums hinfällig sind. Die erste Schwingung des 123 mm langen Stabes wäre demnach bei 2,54 kHz im Spektrum zu erwarten. Die Messungen der Stäbe ergaben die in Abbildung 6.2 dargestellten FFT.

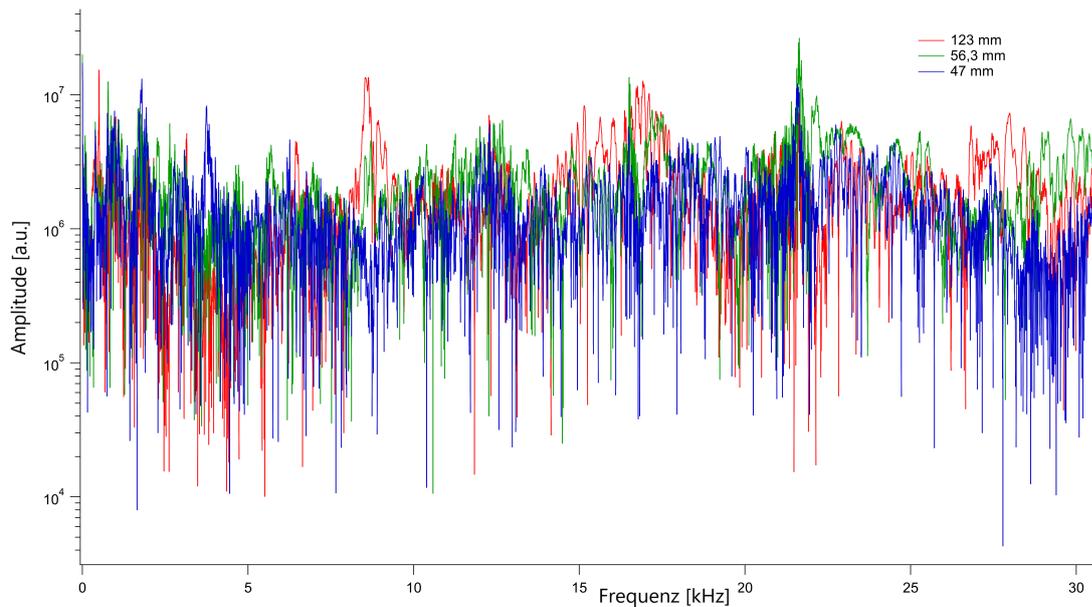


Abbildung 6.2: Vergleich der Spektren, aufgenommen mit dem neuem Versuchsaufbau

Hier treten zwar vereinzelt Peaks auf, die sich vergleichsweise deutlich vom Rauschen abheben. Diese liegen jedoch nicht bei den aus der Berechnung hervorgegangenen Frequenzen oder treten bei allen drei Stäben bei derselben Frequenz auf, woraus sich erschließt, dass der jeweilige Peak durch den Messaufbau bedingt ist. So hat beispielsweise der Graph des 123 mm Stabes bei 2,5 kHz keinen erkennbaren Peak, der sich vom eigenen Rauschen oder von den Spektren der anderen Stäbe abhebt. Für eine sinnvolle Auswertung sind diese Spektren leider nicht zu gebrauchen. Die Hauptursache hierfür könnte in der Signalstärke liegen. Da Luftschall aufgrund der stark verschiedenen Impedanzen an der Grenzfläche zu einem Festkörper nahezu vollständig reflektiert wird, ist das Signal womöglich schlichtweg nicht messbar. Dieses Mikrophon funktioniert für die Charakterisierung von Luftultraschallwandlern zwar hervorragend, jedoch emittieren diese Wandler Schallwellen mit einem Schalldruckpegel von bis zu 140 dB, was unfassbar laut wäre, könnte man diesen Frequenzbereich wahrnehmen. Bei einem angeklopften Metallstab ist der Schalldruckpegel einige Größenordnungen kleiner und somit wahrscheinlich nicht mehr erfassbar.

Anderweitige Fehlerquellen liegen in der Ausrichtung der Komponenten. Mikrophon und Klopfer müssen auf die zentrale Achse des Stabes gerichtet sein. Abweichungen führen zu einem schwächeren Signal, da Aufnahme beziehungsweise Anregung entsprechend verschlechtert werden. Außerdem könnte auch der Ring den Stab leicht abseits der Mitte einspannen. Um dies zu verhindern, wurde die Mitte des Stabes vorher ausgemessen und markiert. Dementsprechend ist beim Einspannen höchstens eine Ungenauigkeit von 0,5 mm zu erwarten, was angesichts der Stablänge sehr wenig erscheint. Diese zusätzlichen Fehlerquellen sind jedoch nicht so verheerend, dass sie die Messung von Eigenschwingungen unmöglich machen würden. Die Hauptursache hierfür liegt höchstwahrscheinlich zu einem Großteil an dem unzureichenden Schalldruckpegel der Schwingung.

7 Fazit

Die vorliegende Bachelorarbeit hat untersucht, inwieweit sich kleinere, aus Metall bestehende Drehteile mittels Ultraschall auf ihre Dimensionen prüfen lassen. Ziel der Untersuchungen war es, anhand des Frequenzspektrums eines Stabes, Aussagen darüber zu treffen, mit welcher Sicherheit sich Stäbe mit Defekten, wie zum Beispiel einem Riss von fehlerlosen Stäben unterscheiden lassen. Dazu sollten zahlreiche Messungen durchgeführt und mit Hilfe verschiedener Prozesse des maschinellen Lernens analysiert werden. Um dies zu ermöglichen, muss eine sehr große Anzahl von Datensätzen produziert werden. Um die notwendige Vergleichbarkeit der Messungen innerhalb eines Datensatzes zu gewährleisten, müssen alle Messungen unter denselben Bedingungen oder Einflüssen durchgeführt werden. Sie müssen reproduzierbar sein.

Diese Reproduzierbarkeit wird durch verschiedenste Faktoren eingeschränkt, welche hauptsächlich vom Messaufbau ausgehen. So kann der Stab beispielsweise leicht schief eingespannt werden, was von Messung zu Messung in einem anderen Winkel geschieht oder die Kraft, welche den Stab einspannt, kann innerhalb eines bestimmten Intervalls schwanken. Beide Effekte haben einen zumindest geringen Einfluss auf die Messungen. Der Aufbau wird durch ein dreiachsiges Positionierungssystem und zwei Ultraschallwandler, auf die jeweils eine Halterung für den Stab angebracht ist, realisiert. Für die Halterungen liegen zwei unterschiedliche Modelle vor, sodass der Stab nach Bedarf in eine Biege- oder in eine Längsschwingung versetzt werden kann. Die Anregung erfolgt über die Schallwandler, wobei der Sender an einen Funktionsgenerator angeschlossen ist, sodass gepulste Schallwellen mit beliebigen Frequenzen durch einen solchen Stab geschickt werden können. Der Stab soll hier als Filter für gewisse Frequenzen dienen, denn anhand seiner Abmessungen ergibt sich eine Eigenfrequenz. Wird der Stab mit einer Schallwelle dieser Frequenz beziehungsweise einem ganzzahligen Vielfachen derselben angeregt, schwingt der Stab mit und überträgt dieses Signal an den Empfänger. Andere Frequenzen kommen nicht oder nur stark abgeschwächt durch den Stab.

Das empfangene Signal wird mittels Fast Fourier Transformation in ein Frequenzspektrum umgewandelt. So wird die Amplitude des Signals in Abhängigkeit seiner Frequenz aufgezeigt. Insofern nichts weiter am Aufbau oder am Stab verändert wird, sind die Spektren zweier Messungen im Idealfall identisch. In der Realität verschlechtern jedoch diverse äußere Einflüsse die Reproduzierbarkeit dieser Spektren, sodass stets einige Unterschiede zu finden sind. Wichtig ist, diese Abweichungen kleiner zu halten, als solche, die durch Defekte oder Änderungen der Stababmessungen hervorgerufen werden. Hierbei fällt auf, dass vor allem die Biegeschwingung starke Differenzen innerhalb einer Messreihe aufweist, was in erster Linie dadurch zu begründen ist, dass die Art der Einspannung in diesem Fall etwas komplizierter ist. So wird die Biegeschwingung des Stabes durch mehr veränderliche Faktoren beeinflusst. Außerdem ist der Stab für die Biegeschwingung an drei statt an zwei

Punkten gelagert, sodass der Stab weniger frei schwingen kann.

Für einen zylindrischen Stab lassen sich die Eigenfrequenzen sowohl für die Biege- als auch für die Längsschwingung relativ einfach berechnen. Daher lässt sich ein Frequenzbereich definieren, in dem die Peaks der Eigenfrequenzen im Spektrum zu sehen sein sollten. Ebenso kann man vorhersagen welche Frequenzänderung durch eine bestimmte Längenänderung am Stab hervorgerufen wird. Dazu liegt derselbe Stabtyp in großer Zahl in jeweils drei unterschiedlichen Längen vor. Die Eigenfrequenz eines längeren Stabes ist verhältnismäßig tiefer, als die eines Kürzeren. Ein entsprechender Zusammenhang sollte sich im Vergleich der Spektren zweier Stäbe, die sich lediglich in ihrer Länge unterscheiden, aufzeigen. Die zu erwartende Frequenzverschiebung ist bei der Biegeschwingung kleiner, während die Ungenauigkeit ihrer Frequenzen größer ist. Deswegen kommt für die Charakterisierung eines Stabes hauptsächlich die Längsschwingung in Frage.

In der Auswertung der Spektren zeigt sich, dass die Biegeschwingung zu keinen verwertbaren Ergebnissen führt. Bei der Längsschwingung hingegen sind einige Peaks zu sehen, bei denen es sich um eine Eigenfrequenz handeln könnte. Diese vermeintlichen Eigenfrequenzen ändern sich der Erwartung entsprechend mit der Stablänge. Ebenso sind im Spektrum Peaks zu finden, die ihrem Verhältnis zur gefundenen Grundfrequenz nach, zu höheren Harmonischen gehören könnten. Im Vergleich der verschiedenen Stablängen stimmt auch hier das Verhältnis von Längen- zu Frequenzänderung. Allerdings werden die Spektren vor allem bei größer werdenden Frequenzen immer undeutlicher. Die Peaks, die eigentlich zur selben Schwingung gehören, sollten für die drei unterschiedlichen Längen eine ähnliche Form haben. Jedoch ist diese teilweise sehr verschieden. So kann die Amplitude einer Schwingung mit einer Stablängenänderung von nur 2 mm um mehrere Größenordnungen schrumpfen beziehungsweise wachsen. So kommt es vor, dass insbesondere höhere Harmonische bei diversen Stablängen nicht in allen Messungen nachweisbar und somit nur in einigen Spektren zu finden sind. Außerdem gibt es viele, oftmals auch sehr dominante Peaks, die unabhängig von den Dimensionen eines Drehteils auftreten. Im niedrigeren Frequenzbereich liegen diese Peaks in der Regel für alle drei Stablängen bei der selben Frequenz und sind damit sehr gut von den Eigenfrequenzen der Stäbe unterscheidbar. Bei höheren Frequenzen gibt es deutlich mehr einzelne Peaks. Daraus folgt, dass mögliche Moden, die zur Eigenfrequenz gehören könnten, mit zunehmender Schwingungsordnung immer schwerer zu finden sind. So konnten letztlich nur die Eigenfrequenz sowie die erste Oberschwingung mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden.

Spätestens beim Vergleich dieser Frequenzen mit den zuvor Berechneten wird klar, dass die Messung extrem stark vom restlichen Aufbau beeinflusst wird. Die tatsächliche Eigenfrequenz ist erheblich höher als die Errechnete. Die Hauptursache hierfür liegt in der Art der Halterung. Um sowohl die senkrechte Lagerung der Drehteile als auch die Einkopplung der Schallwellen zu gewährleisten, wurde der Stab mit einer bestimmten Kraft eingespannt. Bei der Längsschwingung betrifft dies lediglich die Enden, während bei der Biegeschwingung auch Kraft auf die Mitte des Stabes einwirkt. An diesen Stellen ist der Stab gewissermaßen fixiert, was die Ausbildung eines Schwingungsbauches verhindert. Auf diese Weise werden viele Moden unterdrückt. Außerdem wird dadurch der Einfluss des Messaufbaus auf die Eigenfrequenz gefördert, sodass diese nur zu einem geringen Teil vom Stab abhängt.

Diese gewonnenen Erkenntnisse waren ausschlaggebend für einen neuen Versuchsaufbau. Dabei wird der Stab von einem Ring in der Mitte festgehalten. Die Erzeugung und Registrierung des Schalls erfolgt nicht mehr über Schallwandler, sondern ein Klopfer versetzt den Stab in Schwingung, welche von einem Luftschall-Mikrophon, das am anderen Ende des Stabes platziert ist, aufgenommen wird. Dadurch wird der Stab lediglich mittig fixiert. Hier werden zwar auch einige Moden unterdrückt, jedoch nur solche, die einen Schwingungsbauch in der Mitte aufweisen, also die Grundschiwingung, die zweite Oberschiwingung, usw. Alle anderen Moden haben in der Mitte des Stabes einen Schwingungsknoten, sodass diese nicht durch die Einspannung behindert werden und im Spektrum noch deutlicher zu sehen sein sollten.

In den mit dieser Methode aufgenommenen Spektren lassen sich leider auch nicht die errechneten Frequenzen beobachten. Auch hier können die auffälligsten Peaks nicht den Drehteilen zugeordnet werden. Es sind keine Peaks auffindbar, die sich entsprechend der Dimensionsänderung des Stabes verschieben. Hauptgrund dafür ist die unzureichende Lautstärke der Schallwellen. Während ein Wandler Schallwellen mit einem Pegel von circa 140 dB emittiert, sind die von einem solchen Klopfer erzeugten Schwingungen um einige Größenordnungen leiser, wodurch sie höchstwahrscheinlich trotz der hohen Empfindlichkeit des Mikrophons nicht mehr wahrnehmbar sind.

Abschließend lässt sich sagen, dass grundsätzlich zwar Eigenfrequenzen und einige nächsthöhere Schwingungsmoden gefunden werden konnten. Jedoch waren diese Eigenfrequenzen erheblich vom Aufbau beeinträchtigt und nicht mit ausreichender Sicherheit zu bestimmen. Die stabeigenen Schwingungen haben sich im Spektrum nicht so deutlich abgezeichnet, dass man mit dieser Methode Defekte ausmachen oder bestimmen könnte. Nichtsdestotrotz geben die gefundenen Eigenschwingungen Hoffnung, dass mit einer verbesserten Messmethodik, die es schafft, starke, möglichst rauschfreie Signale aufzunehmen, ohne dabei den Großteil der Schwingungen eines solchen Drehteils zu behindern, entsprechende Klassifizierungen nach Defekten möglich sind.

Literaturverzeichnis

- [1] KRAUTKRÄMER, Josef; KRAUTKRÄMER, Herbert: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo : Springer-Verlag, 1986. – ISBN 3-540-15754-9
- [2] https://web.archive.org/web/20160124115658/http://traktoria.org/files/sonar/passive_materials/acoustic_impedance_of_some_solids.htm
- [3] <http://www.sengpielaudio.com/StehendeWellen.htm>
- [4] <https://physikbuch.schule/standing-waves.html>
- [5] PIENTSCHKE, Christoph: *Spektralanalyse - Erste Überlegungen zu den Eigenfrequenzen*. interner Bericht, 2019. - ©FZ-U
- [6] <http://www.rfcafe.com/references/general/velocity-sound-media.htm>
- [7] ROSE, Joseph L.: *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 2004. - ISBN 978-0-521-54889-2

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift des Studierenden

