

VERSUCH NUMMER

TITEL

AUTOR A

authorA@udo.edu

AUTOR B

authorB@udo.edu

Durchführung: DATUM

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	3
2	Theorie	3
2.1	akustische Modelle	3
2.2	quantenmechanische Modelle	4
2.3	Modell des eindimensionalen Festkörpers	4
2.4	Analogien zwischen den Modellen	5
3	Durchführung	5
4	Auswertung	5
4.1	Vorbereitende Versuche	5
4.1.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	5
4.1.2	Vergleich der Datennahme	8
4.2	Das Wasserstoffmodell	10
4.2.1	Vermessung der Kugelflächenfunktion	10
4.2.2	Peakaufspaltung	14
4.2.3	Bestimmung des Quantenzustandes	15
4.3	Das Wasserstoffmolekül	17
4.3.1	Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Blendendurchmessers	17
4.3.2	Quantenzustand des Wasserstoffmolekül	18
4.4	1D-Festkörper	20
4.4.1	Austausch der Zylinder	22
5	Diskussion	24
	Literatur	24

1 Motivation

Ziel dieses Versuches ist, eine Analogie zwischen akustischen und quantenmechanischen Modellen herzustellen. Dabei handelt es sich genauer um eine Resonatorkette aus Hohlzylindern, welche mit der quantenmechanischen Darstellung eines eindimensionalen Festkörpers verglichen werden soll, um einen Kugelresonator der mit einem Wasserstoffatom verglichen werden soll und um eine Kopplung aus zwei Kugelresonatoren, die mit einem Wasserstoffmolekül verglichen werden soll.

2 Theorie

2.1 akustische Modelle

Schallwellen, also Gasdruckschwankungen im Raum, breiten sich in verschieden geformten Hohlräumen spezifisch aus und zeigen zu unterschiedlichen Frequenzen unterschiedliche physikalische Phänomene. Grundlage ist dabei das Prinzip der stehenden Wellen.

Ein stehendes Wellenmuster bildet sich durch Überlagerung von Wellen und es kommt zu sogenannten Knotenpunkten, -linien oder -flächen im Raum. Das kann beispielsweise passieren, indem eine einlaufende Welle an einer harten Wand reflektiert wird und ihre Wellenlänge einem halbzahligen Vielfachen der Länge der schwingenden Substanz entspricht. Die zu den Wellenlängen gehörigen Frequenzen werden Eigenfrequenzen genannt. Die Beschreibung stehender Wellen benötigt zusätzlich Kenntnis über den Zustand der Randbedingungen der schwingenden Substanz.

Wird der eindimensionale Fall einer Welle betrachtet, wird für stehende Wellen der Fall eines festen Endes und der Fall zwei fester Enden betrachtet, welche zu verschiedenen Beschreibungen führen. Dieser Zusammenhang lässt sich auf Wellen in zwei oder drei Dimensionen übertragen. Für diesen Versuch sind Schallwellen in abgeschlossenen Hohlraumresonatoren von Relevanz, sodass sich die entsprechenden Randbedingungen ergeben.

Wird ein abgeschlossener Zylinder betrachtet, in welchen ein akustisches Signal eingeleitet wird, dann ist es notwendig, dass sich am Boden und Deckel des Zylinders Knotenpunkte bilden um eine stehende Welle zu realisieren. Die Randbedingungen ergeben sich über die Druckänderungen an beiden Enden.

Ist der Körper, in welchen das akustische Signal geleitet wird jedoch kugelförmig, so werden zur Beschreibung der Eigenfrequenz andere mathematische Hilfsmittel benötigt. Eigenmoden des Gases innerhalb einer Kugel sind weiterhin über stationäre Knotenpunkte definiert. Die möglichen Eigenfrequenzen lassen sich zu den entsprechenden Eigenfunktionen, den Kugelflächenfunktionen bestimmen.

2.2 quantenmechanische Modelle

Den zentralen Aspekt der Quantenmechanik bildet die Schrödingergleichung eines Teilchens, durch die es möglich ist, für bestimmte Wellenfunktionen Energieeigenwerte zu den entsprechenden Frequenzen zu finden. Die zentrale Erkenntnis in diesem Bereich beruht auf der Tatsache, dass Wellenfunktionen und die dadurch beschriebenen Teilchen nur für quantisierte Eigenenergien die Schrödingergleichung erfüllen.

Für den Fall, dass ein Teilchen in einem Potentialtopf gefangen ist, ergeben sich Randbedingungen an die Wellenfunktion des Teilchens. An den Rändern des Topfes muss die Wellenfunktion verschwinden. Dadurch sind notwendigerweise nur stehende Wellen erlaubt, deren Wellenlängen halbzahlige Vielfache der Ausdehnung des Potentialtopfes entsprechen.

Wird das Wasserstoffatom betrachtet, muss sowohl das Elektron, als auch das Proton und die Kraft zwischen den beiden durch die Schrödingergleichung beschrieben werden. Zur Lösung dieses Zweikörperproblems, wird die Schwerpunktmass der Teilchen angesetzt, sodass sich eine spezielle Form der Schrödingergleichung ergibt. Sie wird durch Funktionen gelöst, die die Kugelflächenfunktionen enthalten und von drei Quantenzahlen abhängen.

Die für die Lösung des Wasserstoffatoms notwendigen Quantenzahlen sind die Hauptquantenzahl, die Drehimpulsquantenzahl und die magnetische Quantenzahl. Für alle möglichen Kombinationen dieser Indizes lässt sich das Wasserstoffatom lösen bzw. lassen sich Eigenfunktionen aufstellen.

Soll ein Wasserstoffmolekül beschrieben werden, handelt es sich um ein Dreikörperproblem, da zwei Protonen mit einem Elektron wechselwirken. Über einen Schwerpunktsatz wird eine Beschreibung durch elliptische Koordinaten möglich, während es beim Wasserstoffatom noch Kugelkoordinaten waren. Die Beschreibung der Eigenfunktionen dieses Systems sind dennoch durch die selben Quantenzahlen charakterisierbar.

2.3 Modell des eindimensionalen Festkörpers

Die Beschreibung eines Festkörpers erfolgt zunächst über die Modelldarstellung durch ein Gitter, durch das die periodisch angeordneten Atome des Festkörpers dargestellt werden können. Für einen eindimensionalen Festkörper benötigt man entsprechend ein eindimensionales Gitter, also eine Aufreihung von äquidistanten Punkten entlang einer Linie.

Entsprechend dieser Äquidistanzen, lassen sich periodische Potentiale beschreiben, welche auf Elektronen wirken. Die zugehörige Schrödingergleichung wird mit Blochfunktionen gelöst. Es zeigt sich, dass die Elektronen nicht beliebige Energien einnehmen können, denn es bildet sich eine sogenannte Energielücke heraus, in der keine Energieniveaus

besetzt werden können.

Diejenigen Energiebereiche, die von Elektronen besetzt werden können, werden Energiebänder genannt und hängen von den Parametern des periodischen Potentials ab. Durch die Tatsache, dass es sich in der Realität nicht um unendlich ausgedehnte Festkörper handelt, sorgen die entsprechenden Randbedingungen dafür, dass selbst innerhalb eines Bandes nur diskrete Energiewerte besetzt werden können.

2.4 Analogien zwischen den Modellen

Es ist zu erwarten, dass sich die gemessenen akustischen Eigenfrequenzen der Wellen, welche durch zylindrische Hohlraumresonatoren geleitet werden, mit der Darstellung eines Bändermodells aus der Festkörperphysik beschreiben lassen.

Das gleiche erwartet man für den Zusammenhang zwischen den Energiezuständen eines Wasserstoffatoms und den Eigenfrequenzen eines Kugelresonators, da beide sich über die Kugelflächenfunktionen ausdrücken lassen.

Die Erweiterung auf ein Wasserstoffmolekül, ließe sich dann entsprechend durch zwei Hohlraumresonatoren modellieren, da deren Eigenfunktionen einen elliptisch geformten Raum durchlaufen und die Beschreibung eines Wasserstoffmoleküls ebenfalls durch elliptische Koordinaten erfolgt und sich über die Kugelflächenfunktionen lösen lässt, aus denen sich auch die Eigenfunktionen der gekoppelten Kugelresonatoren bilden lassen.

[1] demtröder exp phy 1

demtröder exp phy 3

kathi breagelmann protokoll

3 Durchführung

4 Auswertung

4.1 Vorbereitende Versuche

Als Vorbereitende Versuche wird die Schallgeschwindigkeit über die Resonanzfrequenzen bestimmt und es wird ein Vergleich gezogen zwischen der Datennahme mittels Oszilloskop und mittels dem Programm SpectrumSLC.

4.1.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Aus (λ) [abhängig von d] kann die Schallgeschwindigkeit über die Differenz der Resonanzfrequenzen bestimmt werden. Hierfür werden diese gegen die Länge der Röhren aufgetragen. Die Länge der Röhren ist bekannt, da immer Röhren der gleichen Länge hinzugefügt werden.

Tabelle 1: Messwerte für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Länge /mm	erste Resonanz /kHz	zweite Resonanz /kHz	Differenz /kHz
50	6,87	10,28	3,41
100	6,89	8,6	1,71
150	6,895	8,05	1,16
200	6,897	7,759	0,86
250	6,9	7,59	0,69
300	6,9	7,477	0,58

Durch die Messwerte aus 1 wird die Funktion

$$f(x) = a \frac{1}{x} + b$$

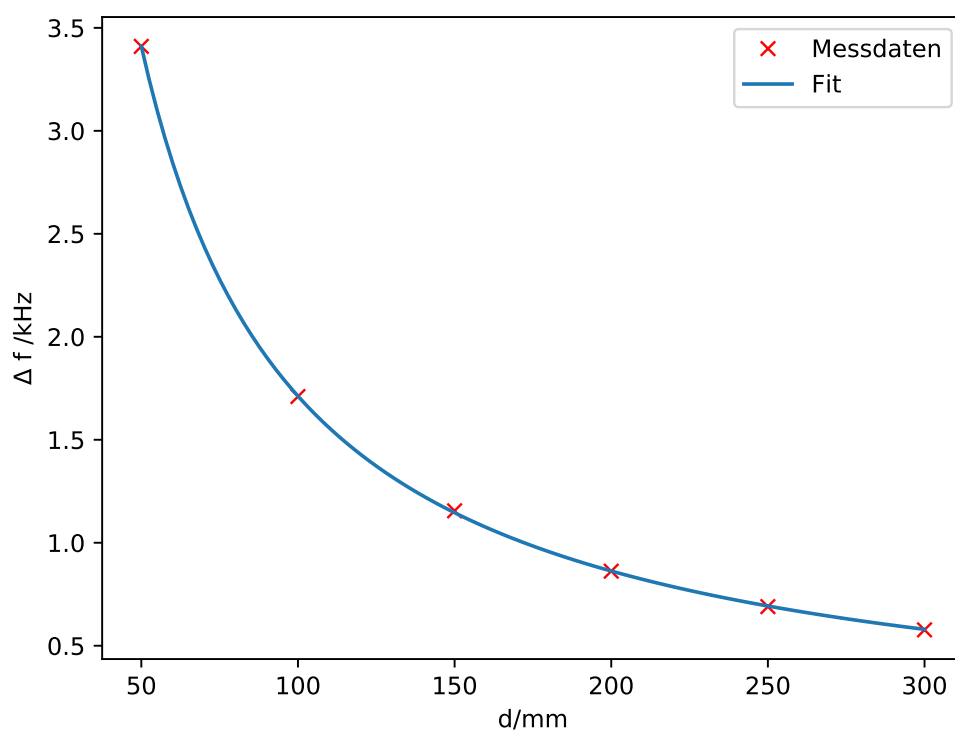
gefittet.

Mit der Gleichung

$$nc = 2df + b = 2a + b$$

kann die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Abbildung 1: Messwerte und Fitfunktion für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit



Die Parameter der Funktion sind:

$$a = 169,9 \pm 0,3$$

$$b = 0,013 \pm 0,003$$

Daraus kann der Wert $c = (339,8 \pm 0,7) \text{ m/s}$ bestimmt werden.

4.1.2 Vergleich der Datennahme

Um die beiden Methoden der Datennahme zu testen wird das Spektrum des Zylinders vermessen. Hierbei wird die Anzahl der Zylinder schrittweise von eins auf sechs erhöht.

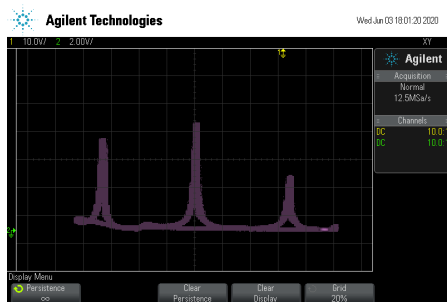


Abbildung 2: Spektrum von einem Zylinder mittels Oszilloskop

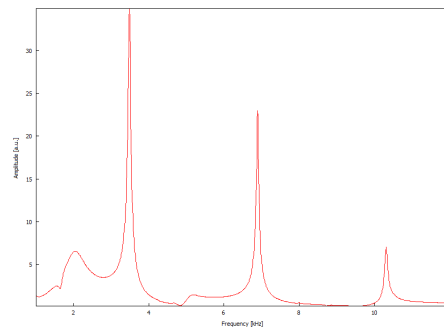


Abbildung 3: Spektrum von einem Zylinder mittels SpectrumSLC

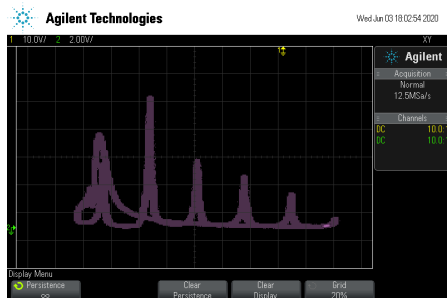


Abbildung 4: Spektrum von zwei Zylindern mittels Oszilloskop

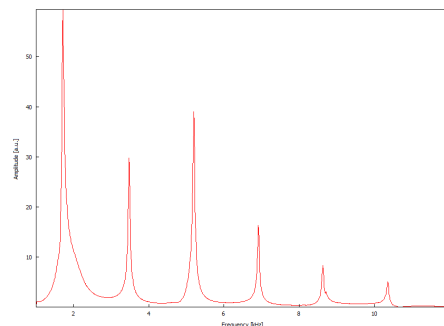


Abbildung 5: Spektrum von zwei Zylindern mittels SpectrumSLC

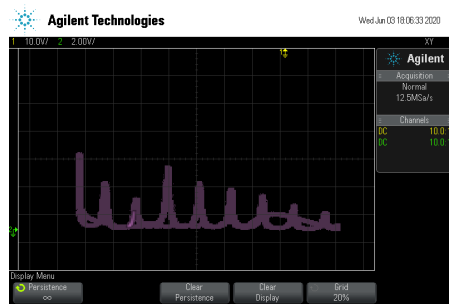


Abbildung 6: Spektrum von drei Zylindern mittels Oszilloskop

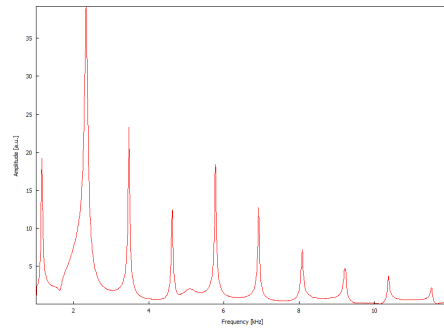


Abbildung 7: Spektrum von drei Zylindern mittels SpectrumSLC

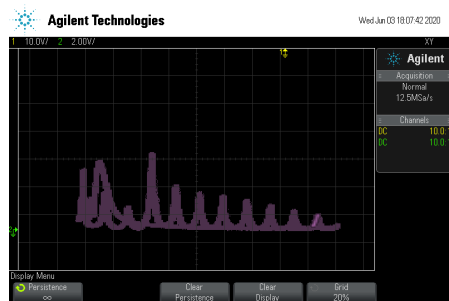


Abbildung 8: Spektrum von vier Zylindern mittels Oszilloskop

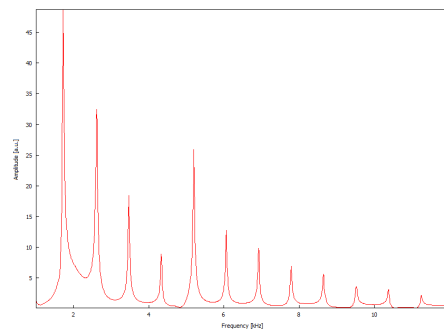


Abbildung 9: Spektrum von vier Zylindern mittels SpectrumSLC

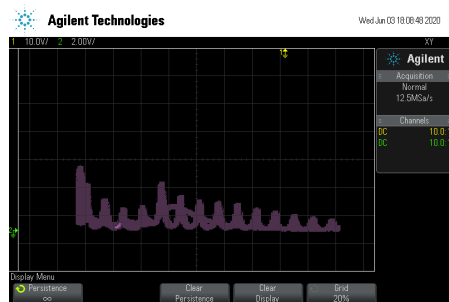


Abbildung 10: Spektrum von fünf Zylindern mittels Oszilloskop

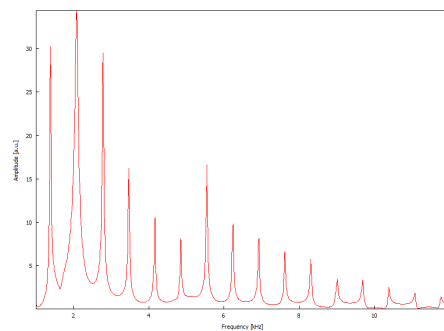


Abbildung 11: Spektrum von fünf Zylindern mittels SpectrumSLC

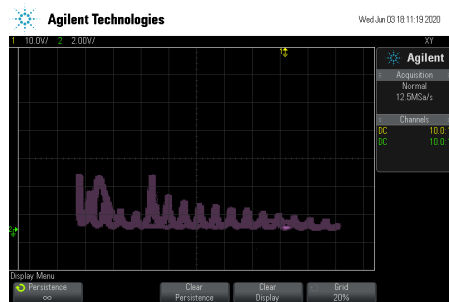


Abbildung 12: Spektrum von sechs Zylindern
mittels Oszilloskop

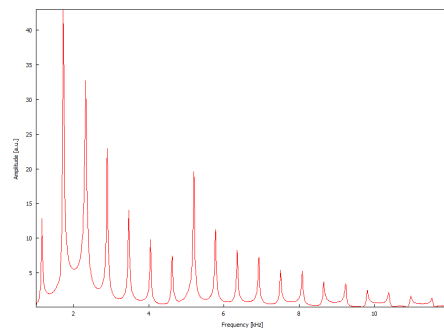


Abbildung 13: Spektrum von sechs Zylindern
mittels SpectrumSLC

Wie an den Bildern erkannt werden kann, ist das Programm **SpectrumSLC** präziser. Dazu kommt noch, dass das Programm die Daten abspeichert. Das kann die Auswertung der folgenden Messreihen vereinfachen.

4.2 Das Wasserstoffmodell

Für den ersten Versuch dieser Messreihe, sollen die Frequenzen von 100 Hz bis 10 kHz vermessen werden. Die Resonanzfrequenzen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Messwerte für die Bestimmung der Ordnung der Resonanzfrequenz

Ordnung	Resonanzfrequenz /kHz	Amplitude /mV	Phasenverschiebung /°
1	0,4376	160	0 – 30
2	2,3164	150	–20 – 4
3	3,7095	150	–20 – 0
4	5,0074	160	–20 – 0
5	6,2361	160	–20 – 0
6	6,5908	160	–20 – 4
7	7,4648	160	–15 – 7
8	8,0705	165	–20 – 0
9	8,6602	170	–30 – (–5)
10	9,5068	170	–30 – (–5)
11	9,8462	175	–15 – 3

Die Resonanzen können auch mittels des Frequenzspektrometers dargestellt werden.

4.2.1 Vermessung der Kugelflächenfunktion

In dieser Messreihe werden für drei verschiedene Resonanzen die Druckamplitude in Abhängigkeit des Drehwinkels α vermessen. Es werden die Resonanzen der Ordnung 2, 4 und 6 aus Tabelle 2 verwendet.

Abbildung 14: Frequenzspektrum des Kugelresonators

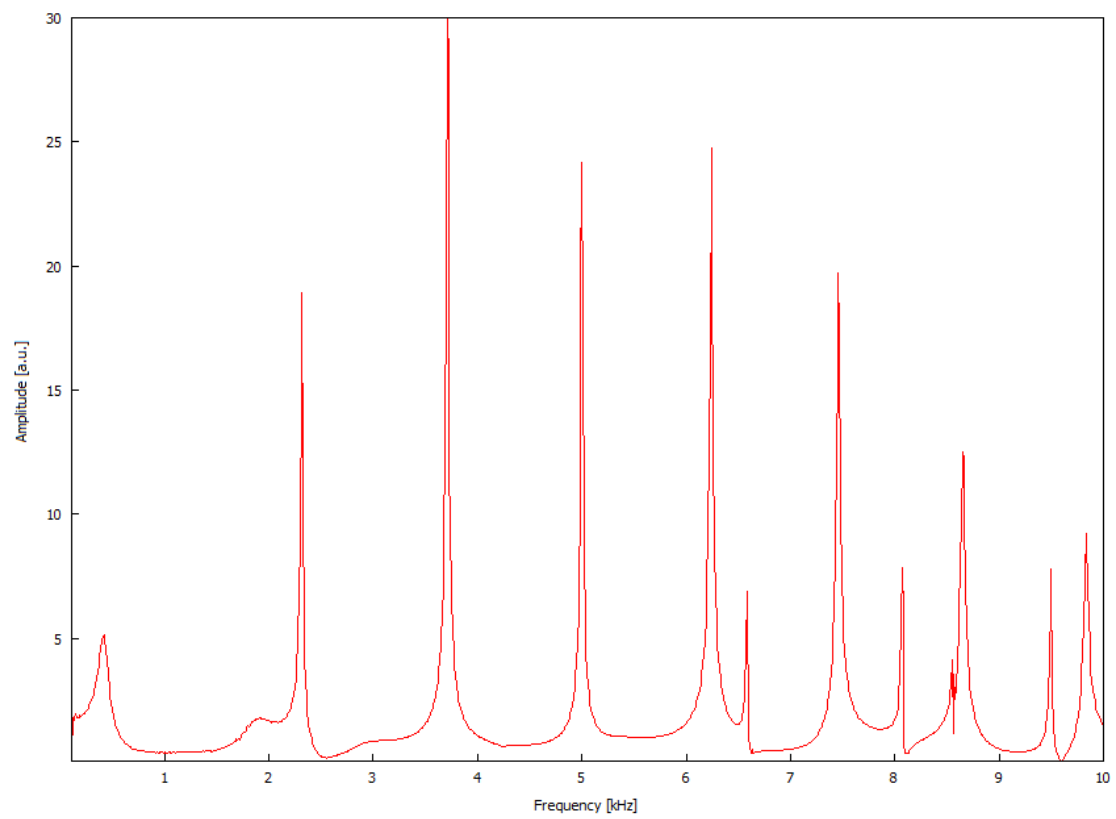


Tabelle 3: Messwerte für die Bestimmung der Ordnung der Kugelflächenfunktion

Winkel α /°	Winkel θ /°	Amplitude 2 /mV	Amplitude 4 /mV	Amplitude 6 /mV
0	90,0	160	0,12	1,37
10	90,4	160	0,68	1,45
20	91,7	160	1,1	1,29
30	93,8	160	1,4	1,05
40	96,7	160	1,6	1,37
50	100,3	160	2,0	1,21
60	104,5	160	2,37	0,88
70	109,2	160	2,61	0,8
80	114,4	160	2,77	0,72
90	120,0	160	2,7	0,84
100	125,9	160	2,21	1,13
110	132,1	160	1,45	1,37
120	138,6	160	0,4	1,69
130	145,2	160	1,29	2,01
140	152,0	160	2,69	2,29
150	158,9	160	4,34	2,61
160	165,9	160	5,3	2,85
170	172,9	160	6,03	3,34
180	180,0	160	6,43	3,26

In der Tabelle 3 wird der Winkel θ mit der Funktion (1) aus α bestimmt.

$$\theta(\alpha) = \arccos\left(\frac{1}{2} \cos(\alpha) - \frac{1}{2}\right) \quad (1)$$

Wie aus Tabelle 3 abzulesen ist, ist die Druckamplitude der zweiten Resonanz unabhängig von dem Winkel, daher müssen die Quantenzahlen $n = m = 0$ sein.

Die Druckamplitude wird gegen θ in einem Polarplot aufgetragen. Dazu werden verschiedene Kugelflächenfunktionen geplottet, um diese miteinander vergleichen zu können. Da ohne Zwischenring keine Aufspaltung in m zu sehen ist, wird $m = 0$ gesetzt, um die Kugelflächenfunktion nur in Abhängigkeit von θ zu plotten.

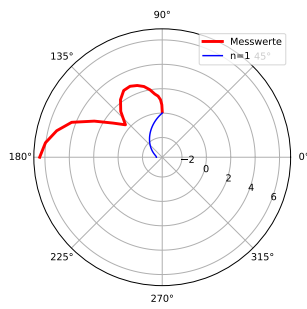


Abbildung 15: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 5,0074 kHz und Kugelflächenfunktion der ersten Ordnung.

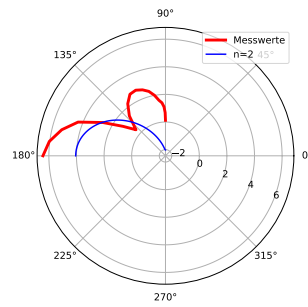


Abbildung 16: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 5,0074 kHz und Kugelflächenfunktion der zweiten Ordnung.

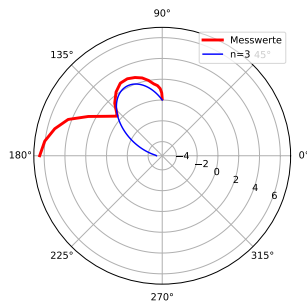


Abbildung 17: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 5,0074 kHz und Kugelflächenfunktion der dritten Ordnung.

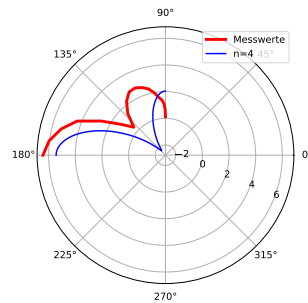


Abbildung 18: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 5,0074 kHz und Kugelflächenfunktion der vierten Ordnung.

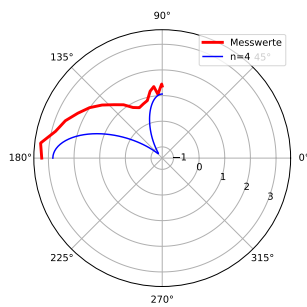


Abbildung 19: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 6,5908 kHz und Kugelflächenfunktion der vierten Ordnung.

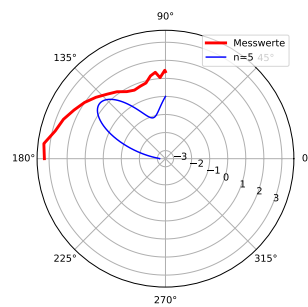


Abbildung 20: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 6,5908 kHz und Kugelflächenfunktion der fünften Ordnung.

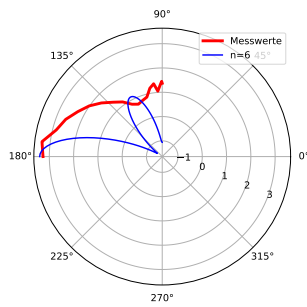


Abbildung 21: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 6,5908 kHz und Kugelflächenfunktion der sechsten Ordnung.

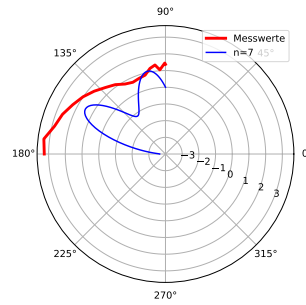


Abbildung 22: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 6,5908 kHz und Kugelflächenfunktion der siebten Ordnung.

Bei Betrachtung von Abbildung 15 bis (??)[muss manuell eingeführt werden] kann gesagt werden, dass die gemessene Verteilung der Kugelflächenfunktion mit $n = 4$ ähnelt. Da die Verteilung bei Abbildung (??)[auch hier manuell] bis 22 keiner der Kugelflächenfunktion ähnelt, aber $n > 4$ sein muss, kann die Kugelflächenfunktion nicht bestimmt werden.

4.2.2 Peakaufspaltung

Bei dieser Messreihe wird die Peakaufspaltung der Resonanzfrequenz von 2,3 kHz vermessen, indem verschieden dicke Zwischenringe zwischen den Halbkugeln des Kugelresonators eingefügt werden. Die dafür benötigten Messdaten sind in Tabelle aufgelistet.

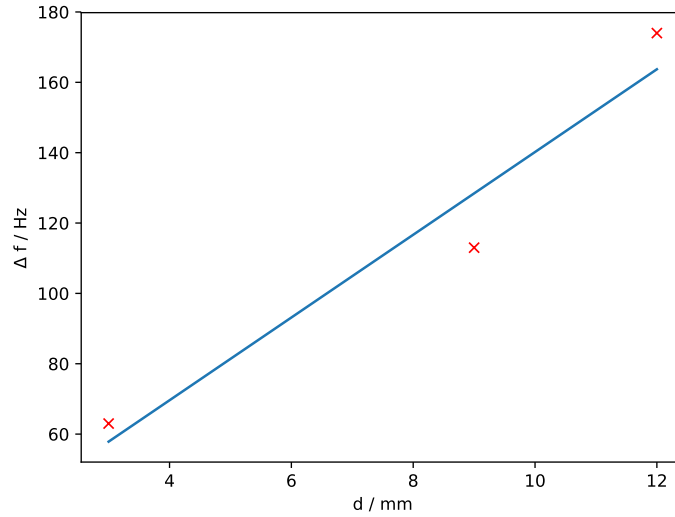
Tabelle 4: Messwerte für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Dicke des Zwischenrings und der Aufspaltung der Resonanzfrequenz

Dicke / mm	erster Resonanz / kHz	zweite Resonanz / kHz	Differenz / kHz
3	2239	2302	63
9	2173	2286	113
12	2103	2277	174

Aufgrund der wenigen Kombinationsmöglichkeiten der beiden Zwischenring, können für diesen Versuch nur drei Messwerte aufgenommen werden. Da aus drei Punkten nicht auf komplexe Funktionen geschlossen werden kann wird der Zusammenhang linear angenommen. Dafür wird die Funktion (2) durch die Daten gefittet.

$$f(x) = ax + b \quad (2)$$

Abbildung 23: Messdaten und Fit für den Zusammenhang zwischen Zwischenringdicke und Peakaufspaltung



In der Abbildung 23 sind die Parameter auf

$$a = 12 \pm 3$$

$$b = 23 \pm 26$$

bestimmt worden

4.2.3 Bestimmung des Quantenzustandes

Um die Quantenzahlen des Zustandes zu bestimmen, wird ein Zwischenring der Dicke von $d = 9$ mm eingefügt. Da der Zwischenring die Symmetrie der Kugel bricht gibt es jetzt eine Vorzugsrichtung. Dadurch ist der α -Winkel der Φ Winkel der Kugelflächenfunktion und die Ausrichtung des Mikrofons ist der θ -Winkel. Bei einer Frequenzen von 2,3 kHz wird die winkelabhängige Druckamplitude vermessen. Die Messdaten sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Messwerte für die Bestimmung des Quantenzustandes bei einer Resonanzfrequenz von 2,3 kHz und einem Zwischenring der Dick $d = 9$ mm.

Winkel ϕ /°	Amplitude /mV
0	640
10	640
20	600
30	560
40	480
50	400
60	320
70	220
80	125
90	120
100	233
110	350
120	440
130	520
140	590
150	675
160	700
170	760
180	780

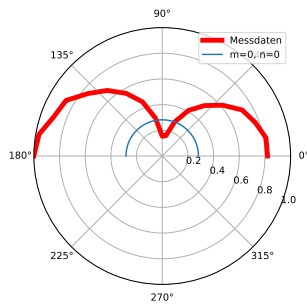


Abbildung 24: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 2,3 kHz und Kugelflächenfunktionen der nullten Ordnung.

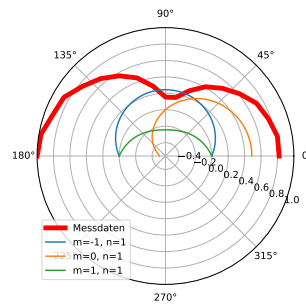


Abbildung 25: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 2,3 kHz und Kugelflächenfunktionen der ersten Ordnung.

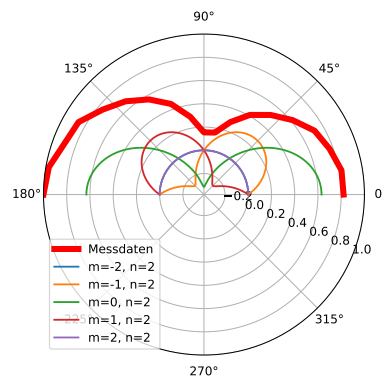


Abbildung 26: Winkelabhängigkeit der Druckamplitude bei einer Resonanzfrequenz von 2,3 kHz und Kugelflächenfunktionen der zweiten Ordnung.

Wie an der Abbildung 26 zu sehen ist, ähnelt der Zustand am meisten der $n = 2, m = 0$ Kugelflächenfunktion.

4.3 Das Wasserstoffmolekül

Für die folgenden Versuchsteilen werden zwei Kugelresonatoren übereinander gesteckt und mit einem Loch in der Mitte in Verbindung gebracht.

4.3.1 Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Blendendurchmessers

Da nur zwei Blenden zu Verfügung standen, kann auch hier nur ein linearer Zusammenhang in erwägung gezogen werden. Die beiden Spektren werden mit einer Blende mit einem Durchmesser von $d = 10 \text{ mm}$ und $d = 16 \text{ mm}$ aufgenommen. Die Spektren sind in Abbildung 27 zu sehen.

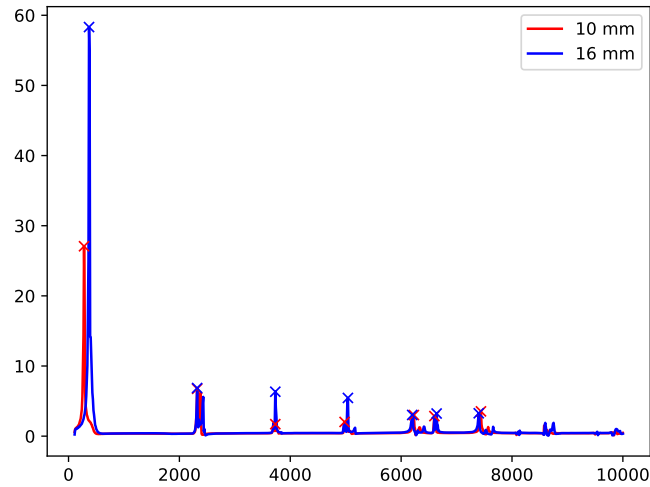


Abbildung 27: Spektren für den Zusammenhang zwischen den Resonanzfrequenzen und dem Blendendurchmesser.

Die Resonanzen sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Resonanzen für den Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und Blendendurchmesser.

Durchmesser $d = 10$ mm	Durchmesser $d = 16$ mm	
Frequenz f /Hz	Frequenz f /Hz	Differenz Δf /Hz
280	370	90
2320	2320	0
3730	3730	0
4980	5040	60
6230	6200	-30
6600	6640	40
7440	7400	-40

Wie an den den Differenzen aus Tabelle 6 zu erkennen ist, kann an diesen Daten kein Zusammenhang zwischen Blendendurchmesser und Resonanz gezogen werden.

4.3.2 Quantenzustand des Wasserstoffmolekül

Für die Bestimmung des Quantenzustandes des Wasserstoffmoleküls wird die Druckamplitude in Abhängigkeit des Drehwinkels vermessen. Hierbei ist die Frequenz auf 2,3 kHz eingestellt. Die gemessenen Daten sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Daten für die Bestimmung des Quantenzustandes des Wasserstoffmoleküls.

Drehwinkel $\alpha/^\circ$	Druckamplitude / V
0	1,05
10	1,05
20	0,96
30	0,96
40	0,96
50	0,88
60	0,88
70	0,88
80	0,84
90	0,84
100	0,8
110	0,8
120	0,8
130	0,72
140	0,72
150	0,72
160	0,72
170	0,72
180	0,72

Die Daten werden in Abbildung 28 dargestellt.

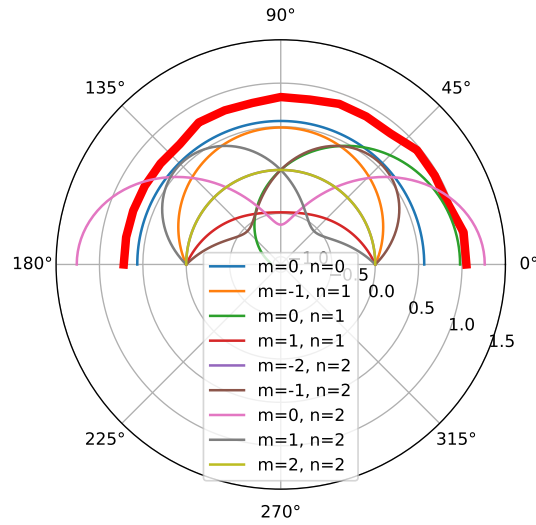


Abbildung 28: Messdaten und verschiedene Kugelflächenfunktionen, für die Bestimmung des Quantenzustandes.

Wie in der Abbildung 28 zu sehen ist, ähnelt der Vermessene Zustand der Kugelflächenfunktion mit $n = m = 0$, $n = 1, m = -1$ oder $n = 2, m = 2$. Da die zweite Resonanz verwendet wurde kann davon ausgegangen werden, dass der $n = 1, m = -1$ Zustand zutrifft. Das ist der 1π Zustand. Allerdings kann nicht gesagt werden ob dieser bindend oder antibindend ist.

4.4 1D-Festkörper

Für die Simulation eines 1D-Festkörpers werden Zylinder mit einer Länge von 50 mm verwendet. Diese werden durch verschiedene Blenden voneinander getrennt.

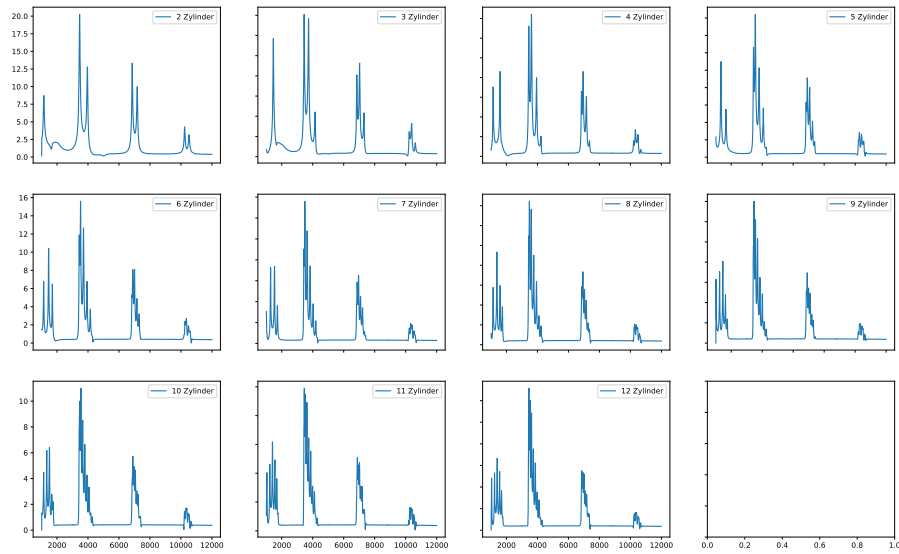


Abbildung 29: Resonanzen der Zylinderketten mit unterschiedlichen Längen und jeweils einer 10 mm Blende.

Wie Abbildung 29 vermuten lässt, werden die Resonanzen aufgespalten durch mehr Zylinder. Die Aufspaltung entspricht der Anzahl an Zylindern.

Diese Versuchsreihe wird wiederholt, wobei die Blenden einen Durchmesser von 13 mm haben.

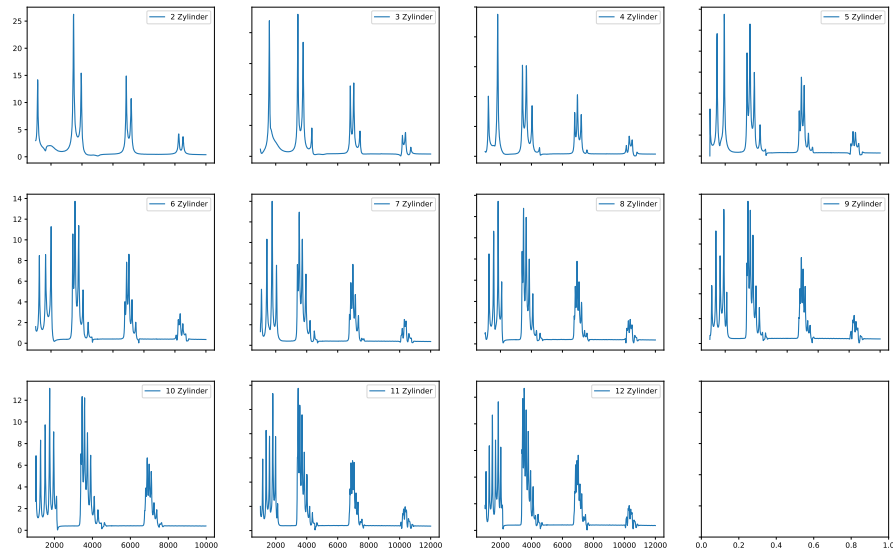


Abbildung 30: Resonanzen der Zylinderketten mit unterschiedlichen Längen und jeweils einer 13 mm Blende.

Wenn die Abbildungen 29 und 30 verglichen werden, ist zu sehen, dass die Aufspaltungen bei einem Blenden von 13 mm weiter auseinander sind.

4.4.1 Austausch der Zylinder

Im Folgenden werden einzelne Zylinder ausgetauscht, einmal wird ein Zylinder der Länge 75 mm eingesetzt und einmal werden zwei Zylinder der Länge 12,5 mm hintereinander gesetzt ohne Blende.

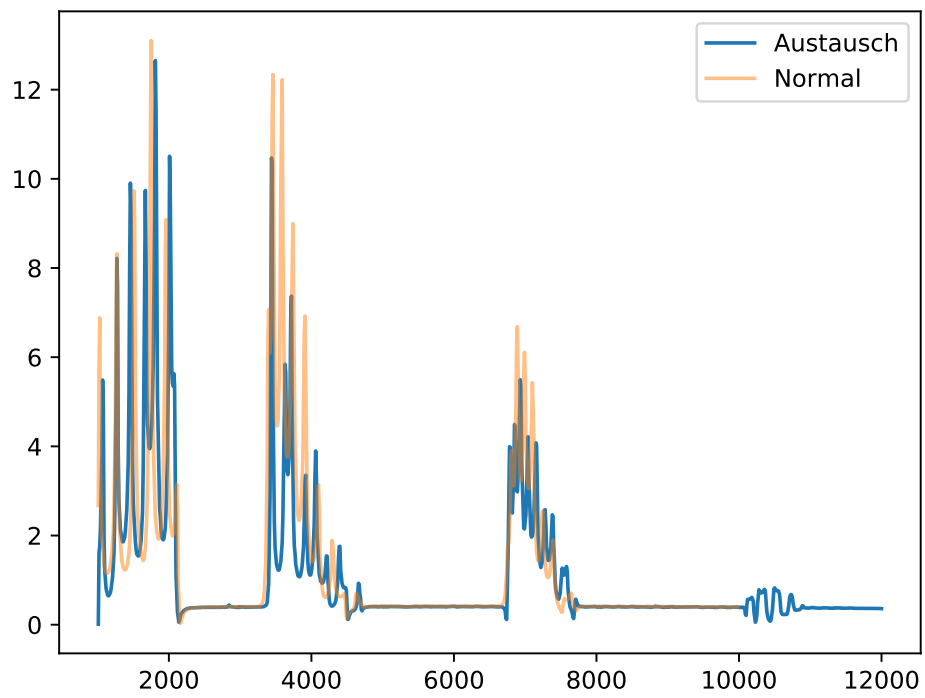


Abbildung 31: Resonanzen der Zylinderketten mit 10 Zylindern, wobei bei ein Zylinder ausgetauscht wird mit einem Zylinder der Länge 75 mm.

Wie an der Abbildung 32 zu sehen ist, sind die Resonanzen weniger ausgeprägt.

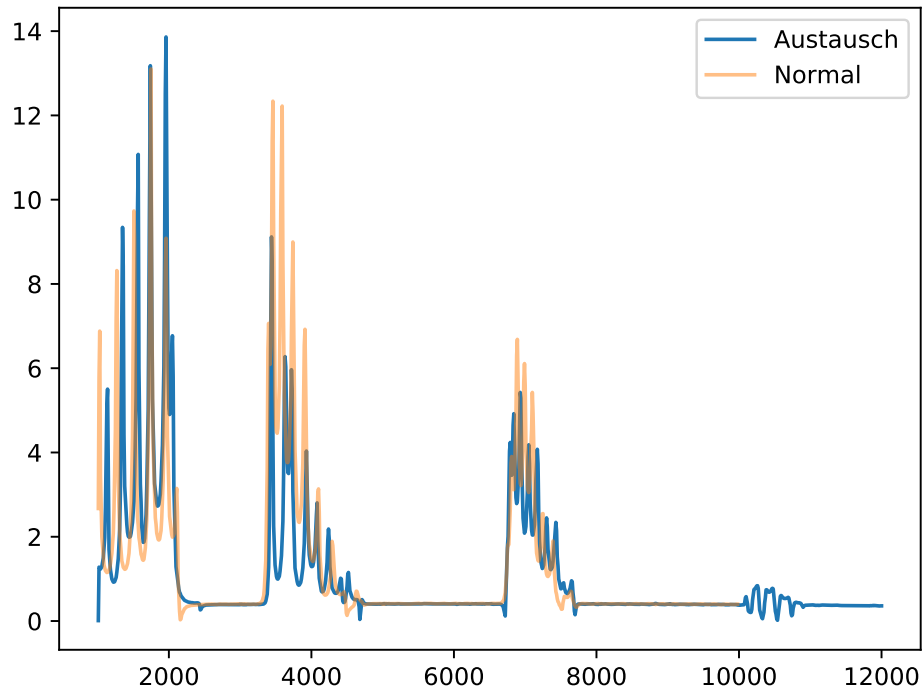


Abbildung 32: Resonanzen der Zylinderketten mit 10 Zylindern, wobei bei ein Zylinder ausgetauscht wird mit zwei Zylinder der Länge 12,5 mm.

5 Diskussion

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch zum Literaturverzeichnis*. 2014.