

Ultraschallerzeugende Mikrostrukturen für batterie lose Fernbedienungen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christof Gerhardy

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

Tag der mündlichen Prüfung: 30. September 2009

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2005 bis 2009 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen (KEmikro) an der RWTH Aachen University.

Zunächst möchte ich dem Betreuer dieser Arbeit, Prof. Dr. rer. nat. Karl Werner Schomburg, herzlich für seine Unterstützung und sein Interesse danken. In den zahlreichen Besprechungen mit Prof. Schomburg in den zurückliegenden Jahren habe ich viel hilfreiches, auch weit über das Thema hinausgehendes Wissen sammeln können.

Ebenfalls danke ich Frau Inge Schleiden und Herrn Thomas Janhsens für die hilfreiche und fröhliche Zusammenarbeit. Bedanken möchte ich mich auch für die gute Zusammenarbeit bei den Diplomanden und Studienarbeitern, mit denen ich in den letzten Jahren zusammengearbeitet habe. Besonders erwähnen möchte ich dabei Frau Katharina Burlage, die neben ihrer hervorragenden Diplomarbeit auch durch intensives Korrekturlesen einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet hat.

Mein besonderer Dank geht an meine Familie und meine Freunde für die Unterstützung während meiner Studien- und Promotionszeit.

Diese Arbeit widme ich meiner viel zu früh verstorbenen Mutter.

Aachen im Oktober 2009

Christof Gerhardy

Kurzfassung

Zur Signalübertragung mit kabellosen Fernbedienungen werden gegenwärtig größtenteils Infrarottechnik sowie Funktechnik eingesetzt. Bei beiden Verfahren werden für die Signalerzeugung elektrische Energie und elektronische Bauteile benötigt, wodurch Sondermüll in Form von Altbatterien und Platinen entsteht.

Die Erzeugung von Infrarotsignalen oder Funksignalen ist ohne aufwändige Energieumwandlung und elektronische Komponenten nicht möglich, Ultraschall kann dagegen mechanisch erzeugt werden. Es erscheint daher sinnvoll, auf die in den ersten Fernbedienungen verwendete Ultraschalltechnik zurückzugreifen und diese weiterzuentwickeln. Dazu wurden die Schallerzeugungsmechanismen von Musikinstrumenten untersucht, wobei sich schwingende Mikrobalken sowie Mikropfeifen als für die Ultraschallerzeugung am besten geeignet herausstellten.

Hauptsächlich wurde die Schallerzeugung mit durch Silikonbälge angesteuerte Ultraschallpfeifen untersucht. Dabei ist es gelungen, die Voraussetzungen für die Herstellung einer kodierten Ultraschalltastatur zu schaffen und einen Prototyp in Form eines kabellosen Ziffernblocks mit 15 Signalen herzustellen. Dazu wurden Ultraschallpfeifen mit 6 unterschiedlichen Frequenzen verwendet und jeweils zwei Pfeifen zur Erzeugung eines Signals kombiniert. Ein Signal besteht daher aus zwei Tönen unterschiedlicher Frequenzen, die über Druck auf die Taste einer PC-Tastatur erzeugt werden.

Die Anzahl der Signale kann durch zeitliche Kodierung mit Hilfe einfacher konstruktiver Änderungen deutlich erhöht werden, sodass z.B. die Herstellung einer kabel- und batterielosen Computertastatur mit Ultraschallpfeifen möglich ist.

Die Frequenz der mit den Ultraschallpfeifen erzeugten Signale ist vom Ansteuerungsdruck und der Temperatur abhängig und weicht um bis zu $\pm 10\%$ vom jeweiligen Mittelwert ab. Fehler bei der Signalerkennung durch Temperatur- und Druckabhängigkeit können durch Abfrage der Verhältnisse der beiden Signalfrequenzen zueinander ausgeschlossen werden.

Des Weiteren wurden in ihrer Eigenfrequenz schwingende Balken genutzt um Ultraschallsignale zu erzeugen. Diese Methode der Signalerzeugung hat die prinzipiellen Vorteile, dass keine Abhängigkeit der Frequenz vom Anschlagmechanismus und nur eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit (Frequenzabweichungen von ca. 0,5%) bestehen. Dagegen sind der Anregungsmechanismus und die Aufhängung der Balken mit größerem Aufwand herzustellen, sodass von der weiteren Verfolgung dieser Variante im Rahmen dieser Arbeit abgesehen wurde.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Schall und Schallerzeugung.....	3
2.1	Grundlagen des Schalls	3
2.2	Erzeugung von Ultraschall mit den Methoden der Musikinstrumente.....	8
2.3	Kodierung von Schallsignalen	13
3	Ultraschallerzeugung mit Balken	16
3.1	Theoretische Betrachtung schwingender Balken	16
3.2	Versuche mit einseitig aufgehängten Balken	21
3.3	Versuche mit frei gelagerten Balken.....	22
4	Ultraschallerzeugung mit Labialpfeifen.....	27
4.1	Aufbau und theoretische Zusammenhänge.....	27
4.2	Druckabhängigkeit der Labialpfeifen	28
4.3	Ultraschallerzeugung mit Pfeifen.....	33
5	Fertigung von Ultraschallpfeifen	34
5.1	Gesenkerodierte Messingpfeifen.....	34
5.2	Gefräste Ultraschallpfeifen aus PMMA.....	35
5.3	Gefräste Platten mit 10 integrierten Pfeifen aus PMMA	36
5.4	Ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen aus PP-Folien.....	38
5.5	Ansteuerung der Ultraschallpfeifen	41
5.5.1	Luftversorgung durch elastische Bälge	41
5.5.2	Herstellung der Bälge.....	42
5.5.3	Betätigung der Bälge.....	42
5.6	Technische Umsetzung der Kodierung durch unterschiedliche Kombinationen von Ultraschallpfeifen und Silikonbälgen.....	43
6	Experimentelle Untersuchungen an Ultraschallpfeifen	46
6.1	Grundlegende Untersuchungen an Ultraschallpfeifen	46
6.1.1	Frequenzspektrum einer gedackten Ultraschallpfeife	46
6.1.2	Zusammenhang zwischen Resonanzraumlänge und Frequenz.....	46
6.1.3	Temperaturabhängigkeit	47
6.1.4	Druckabhängigkeit	48
6.1.5	Schwingungsgüte.....	50
6.2	Vergleich der hergestellten Kombinationen von Ultraschallpfeifen und Bälgen.....	52
6.2.1	Zwei mit Ultraschall geschweißte Ultraschallpfeifen mit einem Silikonbalg	52
6.2.2	Zwei ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen mit zwei identischen Silikonbälgen	53
6.2.3	Gefräste Ultraschallpfeife mit Zweizonen-Silikonbalg	55
6.2.4	Zwei gefräste Ultraschallpfeifen übereinander mit einzelnen Silikonbälgen	56
6.2.5	Zwei ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen mit unterschiedlichen Silikonbälgen	58
6.3	Auswahl einer Variante	59
6.4	Analyse der 15 vom Prototyp erzeugten Signale.....	60
6.4.1	Signale bei Betätigung mit annähernd konstanter Kraft und Geschwindigkeit	60
6.4.2	Betätigungsabhängige Abweichungen der Signale	60

6.4.3	Fertigungsbedingte Abweichungen der Frequenzen von Ultraschallpfeifen mit gleichen Abmessungen	62
6.4.4	Intensität und Reichweite der Signale	63
7	Empfänger	65
7.1	Empfängersystem DSP	65
7.1.1	Elektropneumatischer Prüfstand mit Ultraschallpfeifen	65
7.1.2	Ultraschallsignale und Störgeräusche	67
7.1.3	Aufbau Empfängersystem DSP.....	69
7.1.4	DSP Auswertungsprogramme.....	70
7.3	Empfängersystem LabView.....	74
7.3.1	Aufbau Empfängersystem LabView	74
7.3.2	Signalerkennung von zwei zeitgleichen Frequenzen	75
7.3.3	Signalerkennung mit Frequenzverschiebung in LabView.....	77
8	Zusammenfassung und Ausblick	80
9	Literaturverzeichnis.....	81

1 Einleitung

Fernbedienungen werden für verschiedenste Anwendungen eingesetzt und sind aus dem heutigen Alltag kaum wegzudenken. Den größten Anteil stellen gegenwärtig Infrarotfernbedienungen, wie sie beispielsweise für Fernsehgeräte und HiFi-Anlagen verwendet werden. In kabellosen PC-Tastaturen kommt neben der Signalübertragung mit Infrarot auch Funktechnik zum Einsatz. Bei beiden Verfahren wird für die Signalerzeugung elektrische Energie benötigt, die mit Batterien zur Verfügung gestellt wird. Dadurch entstehen allein in Deutschland jährlich 40.000 Tonnen Sondermüll [1.1]. Außerdem sind der Austausch von Batterien und das Aufladen von Akkus lästig für den Anwender. Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Fernbedienung, die eine Signalübertragung durch rein mechanische Betätigung ermöglicht.

Die Idee einer rein mechanischen Fernbedienung ist nicht neu; bereits Ende der 50er Jahre brachte die Firma Zenith die Ultraschallfernbedienung „Space Command“ auf den Markt. Bei dieser Fernbedienung wurden vier ca. 6 cm lange Metallbalken angeschlagen und zu Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt. In einem Ultraschallempfänger wurde dann in Abhängigkeit von der Frequenz des Ultraschallsignals der gewünschte Schaltvorgang ausgelöst. Abb. 1 zeigt eine „Space Command“ und eine Zeichnung aus der Patentschrift [1.2], die ihr Erfinder Robert Adler 1956 einreichte. Gravierende Nachteile dieser ersten Ultraschallfernbedienung waren ihr aufwändiger Anregungsmechanismus, der durch die vorgegebene Länge der Metallbalken große Bauraum und die Anfälligkeit der Signalerkennung für Störgeräusche. Diese Technik wurde daher nicht weiterverfolgt, sondern zunächst von batteriebetriebenen Ultraschallfernbedienungen [1.3] abgelöst, bevor sich in den 1980er Jahren die Infrarottechnik [1.4] durchsetzte.

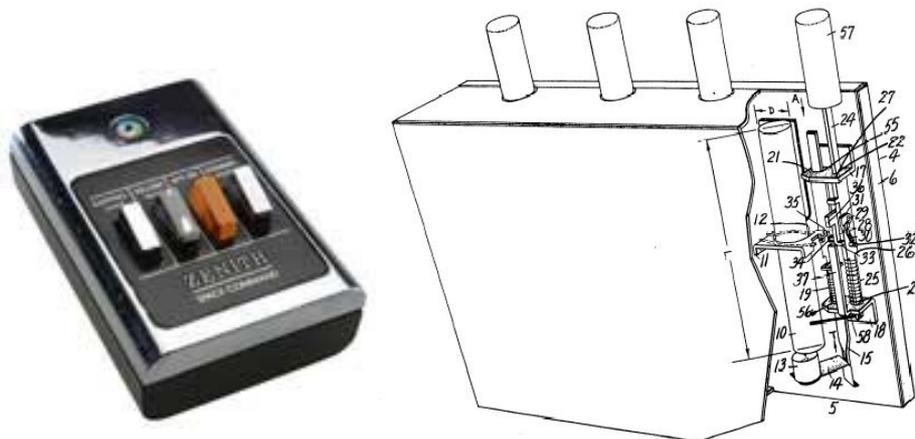


Abb. 1.1: Ultraschallfernbedienung „Space Command“ mit vier Funktionen von Zenith [1.5] und Zeichnung aus der Patentschrift [1.2]

Wenn auf eine Batterie verzichtet werden soll, stellt sich die Frage, welche Art von Signalen rein mechanisch erzeugt werden kann. Die Erzeugung von Infrarotsignalen oder Funksignalen ist ohne aufwändige Energieumwandlung und elektronische Komponenten nicht möglich, Ultraschall kann dagegen mit mechanisch angesteuerten Ultraschallpfeifen oder Mikrobalken erzeugt werden. Es erscheint daher sinnvoll, auf die Ultraschalltechnik zurückzugreifen und diese

weiterzuentwickeln. Gesichtspunkte dabei sind die Verkleinerung des Bauraums, die Erhöhung der Anzahl der Signale sowie vor allem die sichere Signalerkennung und Unempfindlichkeit gegenüber Störgeräuschen.

Zu Beginn der Entwicklung wurden die Anforderungen an den Prototyp einer Ultraschallfernbedienung gesammelt und in Form der folgenden Anforderungsliste festgehalten. Als Orientierung wurde dabei angesetzt, sowohl von der Anzahl der Signale, als auch von den Abmessungen eine Alternative für eine kabellose Funktastatur für einen PC zu entwickeln.

Anforderungsliste	
Fernbedienung für eine PC Tastatur	
Forderung/ Wunsch	Anforderung
F	Frequenzen im Ultraschallbereich
F	Anzahl unterscheidbarer Signale $N \geq 100$
F	Unempfindlichkeit gegen Störgeräusche
F	Ausreichende Reichweite $RW = 2 - 5 \text{ m}$
W	Ausschließlich aus Kunststoffen herstellbar, damit preiswert
W	Einfache und kostengünstige Herstellung
W	Möglichst wenige Komponenten
F	Keine Batterie notwendig
F	Erzeugung eines Signals durch Tastendruck mit einem Finger
F	Kurze Signallänge $T = 40 \text{ ms} \Rightarrow \text{ca. } 300 \text{ Anschläge/min.}$
F	Max. Bauraum pro Taste $H \times B \times T = 20 \times 20 \times 30 \text{ mm}$
F	Keine den Menschen störende Geräusentwicklung

Tab. 1.1: Anforderungsliste für eine batterie- und kabellose PC-Tastatur

2 Schall und Schallerzeugung

Für eine kabellose Signalübertragung ohne Verbrauch elektrischer Energie kommt nur ein Signal in Frage, welches

- durch mechanische Energie erzeugt werden kann,
- sich in Luft ausbreitet,
- Reichweiten von mehreren Metern erreicht und
- von den Sinnesorganen des Menschen nicht wahrgenommen werden kann.

Ultraschall besitzt diese Eigenschaften und wurde (siehe Kap. 1) bereits erfolgreich in Fernbedienungen eingesetzt.

2.1 Grundlagen des Schalls

Ausgehend von der Frequenz werden vier Schallbereiche definiert (Abb. 1). Der Infraschall liegt unterhalb der Hörschwelle des Menschen von etwa 16 Hz und wird vom Menschen nur als Erschütterung wahrgenommen. Schallwellen werden in diesem Bereich durch Luftdämpfung nur sehr gering abgeschwächt und einige Tiere wie Elefanten und Giraffen nutzen diesen Schallbereich, um über Distanzen bis zu 10 km zu kommunizieren.



Abb. 2.1: Einteilung der Schallbereiche nach der Frequenz

Der von einem Menschen wahrnehmbare Hörschall liegt zwischen 16 Hz und 18 kHz, wobei die obere Hörgrenze mit zunehmendem Alter bei vielen Menschen sinkt. Oberhalb dieses Frequenzbereichs liegt der Ultraschall, der vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bietet. In der Medizin wird Ultraschall in der Diagnostik sowie therapeutisch eingesetzt. Weitere technische Einsatzmöglichkeiten des Ultraschalls sind z.B. Schweißen, Reinigen und zerstörungsfreie Werkstoffprüfung [2.1].

Viele Tierarten orientieren sich mittels Ultraschall oder nutzen diesen Frequenzbereich zur Verständigung untereinander oder zur Ortung von Beute (Abb. 2.2). Beim Einsatz von Ultraschallsignalen im Bereich bis ca. 60 kHz ist zu berücksichtigen, dass Haustiere wie Katzen und Hunde diese Frequenzen hören können und durch sie gestört werden könnten.

Ab Frequenzen von 1 GHz beginnt der Hyperschall, der in der Natur nicht nachgewiesen wurde, aber Anwendung bei der Untersuchung von Molekülstrukturen findet [2.1].

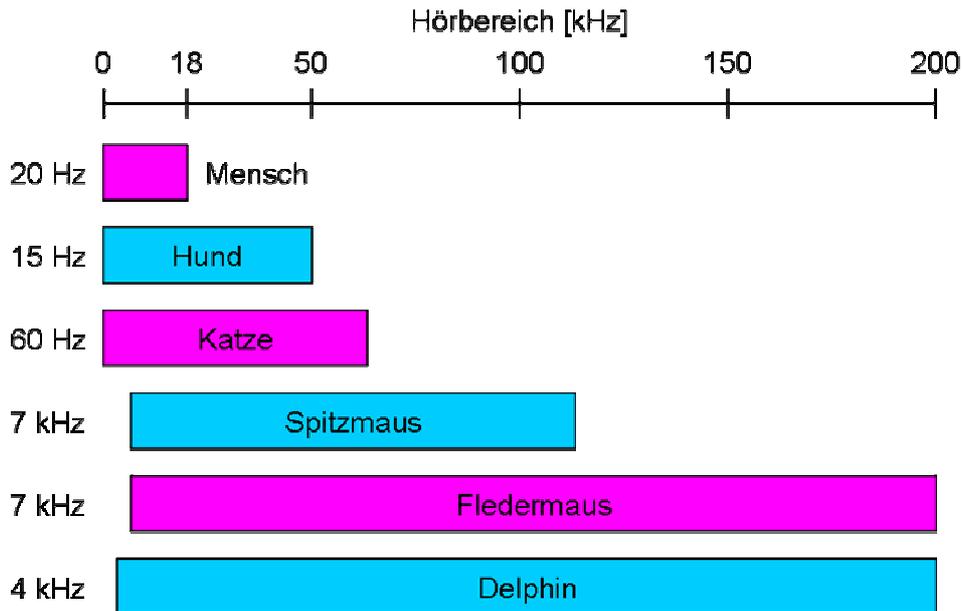


Abb. 2.2: Hörbereiche von Menschen und Tieren [2.2]

Die Schallausbreitung kann in Gasen, Feststoffen oder Flüssigkeiten erfolgen, wogegen im Vakuum keine Schallübertragung möglich ist, was bereits 1660 in Experimenten von Robert Boyle [2.3] gezeigt wurde. In ruhenden Flüssigkeiten und Gasen breitet sich der Schall in Form von Longitudinalwellen aus, die in Ausbreitungsrichtung schwingen und sich mit der für das Medium spezifischen Schallgeschwindigkeit fortbewegen.

Die Schallgeschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge λ und der Frequenz f einer Welle.

Schallgeschwindigkeit:
$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

Diese ist je nach Aggregatzustand von verschiedenen Einflussgrößen abhängig [2.4], wobei für Gase mit dem Adiabatengesetz und dem allgemeinen Gasgesetz gilt:

Schallgeschwindigkeit in Gas:
$$c_{\text{Gas}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} \quad (2.2)$$

κ = Adiabatenexponent, R = allgemeine Gaskonstante [J/K·mol], T = Temperatur [K], M = Molmasse [kg/mol].

Für Luft wird häufig folgende Näherungsgleichung für die Schallgeschwindigkeit verwendet, die auch sämtlichen Berechnungen dieser Arbeit zugrunde liegt [2.5]:

Schallgeschwindigkeit in Luft:
$$c = 332 \cdot (1 + 0,00166 \cdot T) \cdot [\text{m/s}] \quad \text{mit: } T \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.3)$$

In Feststoffen breitet sich der Schall als Longitudinalwelle und zusätzlich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung als Transversalwelle aus, wobei die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern wesentlich höher ist als die in Gasen oder Flüssigkeiten (Tab. 2.1). Die Schallgeschwindigkeit in Feststoffen berechnet sich wie folgt [2.4]:

Schallgeschwindigkeit
Longitudinal:
$$c_{\text{Longitudinal}} = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho_0}} \quad (2.4)$$

Schallgeschwindigkeit
Transversal:
$$c_{\text{Transversal}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}} \quad (2.5)$$

mit μ, λ = Lamé'sche Elastizitätskonstanten, ρ_0 = Ruhedichte.

Medium	Schallgeschwindigkeit [m/s] Longitudinal	Schallgeschwindigkeit [m/s] Transversal
Luft	344	
Messing	3500	2110
Stahl	5100	3255
Aluminium	5110	

Tab. 2.1: Schallgeschwindigkeit ausgesuchter Medien bei 20 °C [2.4, 2.6]

Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist neben der Temperatur auch von der Luftfeuchtigkeit abhängig, wobei dieser Zusammenhang nur empirisch ermittelt wurde [2.7]. Die relativ starke Temperaturabhängigkeit bewirkt eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit um 7 % bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 40$ °C. Die Luftfeuchtigkeit hat dagegen einen kleineren Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit, da ein Anstieg von 0 % auf 100 % relativer Feuchte nur eine Änderung von 0,1 % bei 0 °C und 1,1 % bei 40 °C bedeutet (Abb. 2.3).

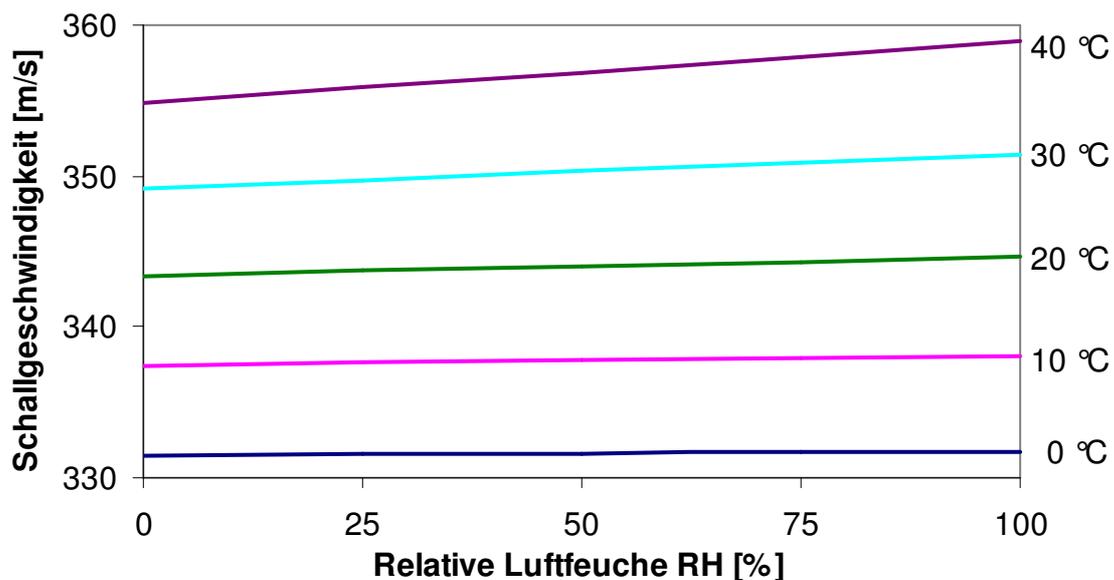


Abb. 2.3: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte RH

Die Energie der Schallwellen wird während der Übertragung durch Dissipation in der Luft verringert. Unter Berücksichtigung der Dissipation berechnet sich die Intensität einer ebenen Schallwelle wie folgt [2.8]:

$$\text{Intensität:} \quad I = I_0 \cdot e^{-m \cdot r} \quad (2.6)$$

m = Dissipationskonstante, λ = Wellenlänge, r = Abstand, $k = 1,16 \cdot 10^{-4}$.

$$\text{Dissipationskonstante:} \quad m_{\text{Luft}} = \frac{k}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

Neben der Intensitätsabnahme durch Dissipation nimmt diese mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle durch die Verteilung der Schallenergie auf eine immer größer werdende Fläche ab. Bei kugelförmiger Ausbreitung gilt daher für die Intensität [2.8], die wiederum proportional zum quadratischen Schalldruck ist:

$$\text{Intensität:} \quad I \sim \frac{1}{r^2} \sim p^2 \quad (2.8)$$

Mit Gl. 2.1 und den Gleichungen 2.5 bis 2.7 ergibt sich der Zusammenhang für den Schalldruck:

$$\text{Schalldruck:} \quad p_1 = \frac{r_0}{r_1} \cdot p_0 \cdot e^{\frac{-k \cdot r \cdot f^2}{c^2}} \quad (2.9)$$

An Gl. 2.9 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Frequenz die Dissipationskonstante und damit auch die Dämpfung der Schallwelle in Luft zunehmen (siehe Abb. 2.4).

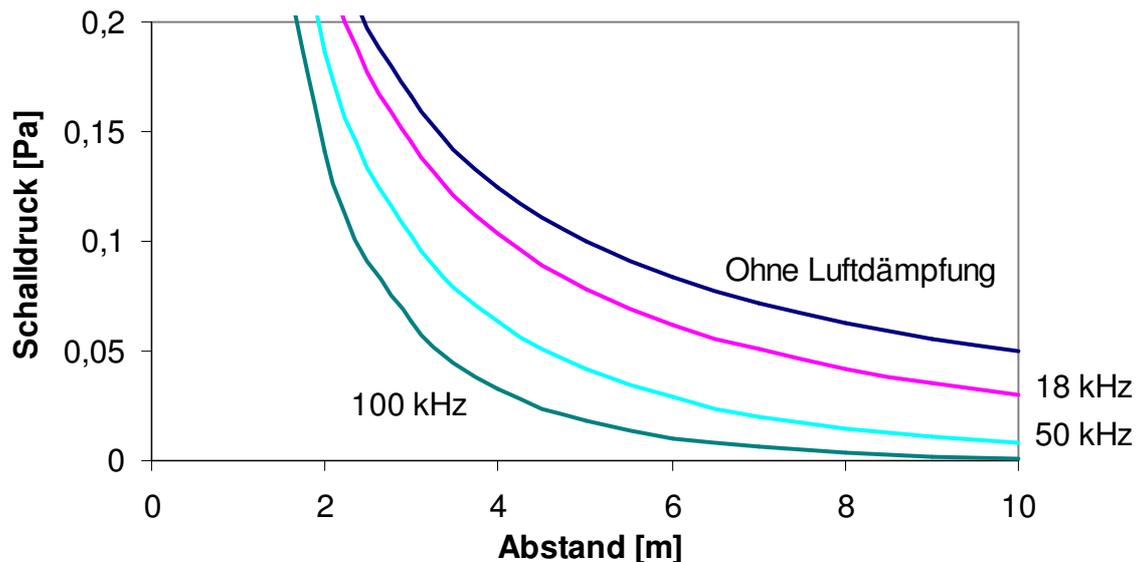


Abb. 2.4: Abnahme des Schalldrucks mit dem Abstand von der Schallquelle bei verschiedenen Frequenzen bei $p_0 = 1 \text{ Pa}$; $r_0 = 0,5 \text{ m}$; $T = 20 \text{ °C}$ und $RH = 50 \%$

Definition von Schallereignissen

Anhand von Schwingungsverläufen und Frequenzspektren werden verschiedene Schallereignisse gemäß Abb. 2.5 definiert. Der Ton ist eine reine Sinusschwingung und besitzt somit nur eine Frequenz f_0 . Mehrere gleichzeitig erzeugte Töne bilden einen Klang, dessen Schwingungsverlauf periodisch, aber nicht rein sinusförmig ist. Wenn keine Gesetzmäßigkeit der Frequenzen erkennbar ist und die Schwingung keine Periodizität mehr aufweist, wie zum Beispiel das Klingeln eines Schlüsselbundes, ist der Schallverlauf als Geräusch definiert.

Bei einem Knall werden dagegen für kurze Zeit alle Frequenzen ange-regt. Die Amplitude der Schwingung ist zu Beginn sehr groß, wird aber in sehr kurzer Zeit stark gedämpft. Bei einem Klang ist die Frequenz des Grundtons für die empfundene Tonhöhe von Bedeutung und die Oberschwingungen tragen in Abhängigkeit von ihrer Anzahl und Intensität zur Klangfarbe bei [2.10]. Die Klangfarbe eines Musikinstruments ermöglicht eine Unterscheidung von Musikinstrumenten, die denselben Grundton erzeugen. Unharmonische Oberschwingungen bewirken im Gegensatz zu den harmonischen, dass keine bestimmte Tonhöhe wahrgenommen werden kann. Ein real erzeugter Ton besitzt im Gegensatz

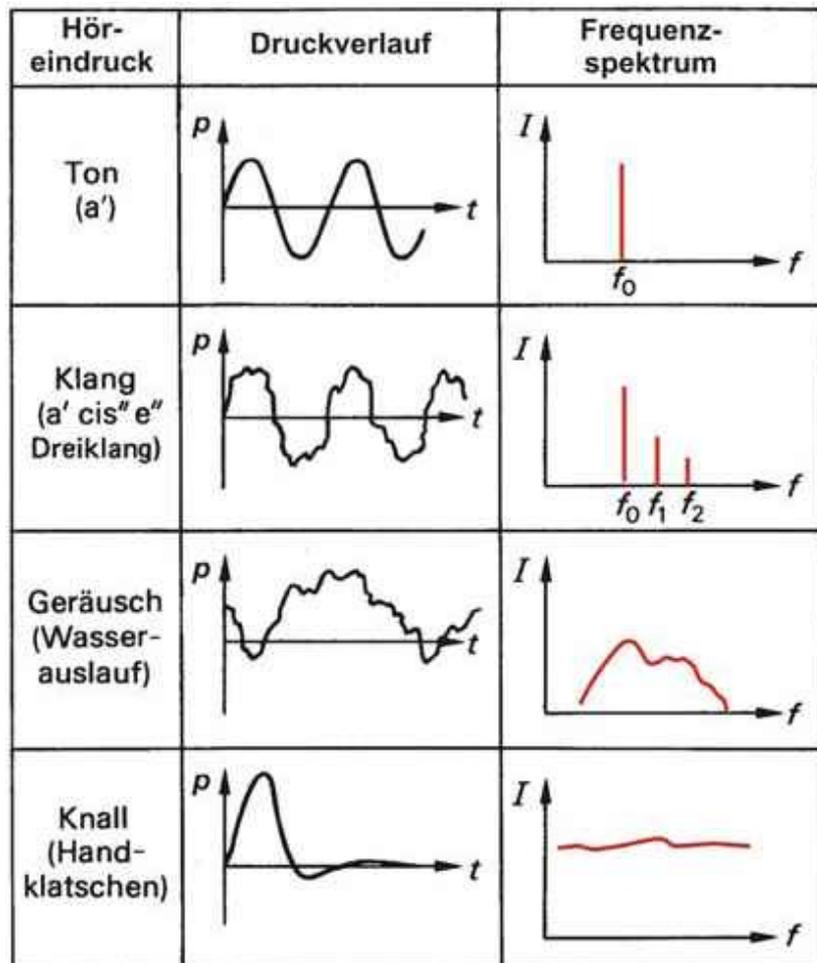


Abb. 2.5: Schwingungsverlauf und Frequenzspektrum von verschiedenen Schallereignissen [2.9]

zu dem im Frequenzspektrum in Abb. 2.5 dargestellten idealen Peak ein Frequenzspektrum mit einer gewissen Halbwertsbreite wie in Abb. 2.6 dargestellt. Für die Signalerzeugung im Sinne dieser Arbeit kommen ausschließlich Töne und Klänge in Betracht.

Die Analyse von Schallwellen kann durch Aufnahme des Schwingungsverlaufs mit einem Mikrofon und Darstellung und Auswertung mit einem Oszilloskop erfolgen. Durch eine Fast Fourier Transformation (FFT) wird eine Schwingung in ihre Frequenzanteile zerlegt und es kann ermittelt werden, mit welcher Amplitude eine bestimmte Frequenz an der Schwingung beteiligt ist. Abb. 2.6 zeigt die FFT eines real erzeugten Schallsignals. In dieser Arbeit wurde ausschließlich die FFT nach Blackman-Harris genutzt, da diese Variante von den zur Verfügung stehenden

Fensterfunktionen die geringsten Frequenzbreiten erzeugt [2.11] und somit für die Unterscheidung von zwei benachbarten Frequenzen am besten geeignet ist.

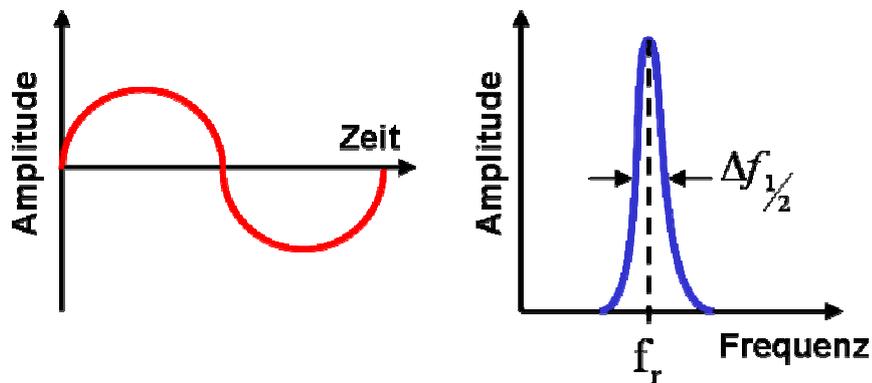


Abb. 2.6: Aus dem Frequenzspektrum eines real erzeugten Tons kann über die Resonanzfrequenz f_r und die Halbwertsbreite $\Delta f_{1/2}$ die Güte bestimmt werden [2.12].

Für die Signalübertragung ist die Güte einer Schwingung relevant, die entsprechend Abb. 2.6 aus der Halbwertsbreite $\Delta f_{1/2}$ ermittelt werden kann, welche die Breite des Frequenzspektrums auf halber Höhe der maximalen Amplitude der Resonanzfrequenz f_r darstellt. Die Güte ergibt sich nach [2.12]:

Güte:
$$Q = \frac{f_r}{2 \cdot \Delta f_{1/2}} \quad (2.10)$$

Je höher die Güte einer einzelnen erzeugten Schwingung ist, desto mehr verschiedene Frequenzen können für die Signalübertragung innerhalb eines vorgegeben Frequenzbandes verwendet werden.

Zur Erzeugung von Schall, insbesondere von Tönen und Klängen, eignen sich z.B. Musikinstrumente. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Möglichkeit, die Methoden herkömmlicher Musikinstrumente zur Erzeugung von Ultraschall zu nutzen.

2.2 Erzeugung von Ultraschall mit den Methoden der Musikinstrumente

Um mit Musikinstrumenten Schallwellen zu erzeugen, werden z. B. Saiten, Membranen, Platten oder Luftsäulen mechanisch in Schwingung versetzt. Oftmals tritt auch eine Kombination dieser Anregungsformen auf, so schwingen bei der Gitarre Saiten und Platten (Korpus).

Ebenso vielfältig wie die Musikinstrumente sind auch die Kriterien diese Instrumente in Gruppen einzuteilen. Grundsätzlich werden mechanische, elektromechanische und elektrische Musikinstrumente unterschieden, wobei für eine Ultraschallfernbedienung ohne Batterien nur die mechanischen Musikinstrumente betrachtet werden.

Für diese Arbeit sinnvoll ist die von Curt Sachs und Erich von Hornbostel [2.13] vorgenommene Einteilung nach Art der Klangerzeugung bei der zwischen Idiophonen, Membranophonen, Chordophonen und Aerophonen unterschieden wird.

Für jeweils einen Vertreter dieser vier Instrumentengruppen wurden zunächst theoretisch die für die Erzeugung von Ultraschall notwendigen Abmessungen bestimmt. Da komplex aufgebaute Musikinstrumente wie z.B. Trompeten nur mit großem Fertigungsaufwand umgesetzt werden können und für die Anwendung als Signalerzeuger einfache Lösungen zu bevorzugen sind, wurden folgende Instrumente ausgewählt: Stimmgabel, Pfeife, Pauke und Gitarre. Mit den Gleichungen in Abb. 2.7 lassen sich die theoretischen Dimensionierungen dieser Musikinstrumente zur Erzeugung einer Frequenz von $f = 20$ kHz berechnen.

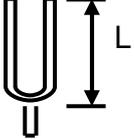
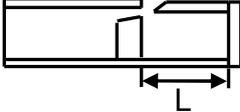
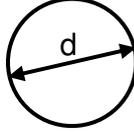
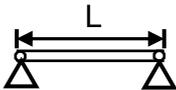
Idiophone	Aerophone	Membranophone	Chordophone
Stimmgabel	Pfeife	Pauke	Gitarre
 $f = \frac{\lambda_1^2 \cdot d}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ <p>mit Messing: $\rho = 8500 \text{ kg/m}^3$ $E = 90000 \text{ MPa}$ $\lambda_1 = 1,8751$ $d = 1 \text{ mm}$</p>	 $f = \frac{1}{4 \cdot l} \cdot c_{\text{Luft}}$ <p>mit: $c_{\text{Luft}} = 343 \text{ m/s}$</p>	 $f = \frac{2,45}{\pi \cdot d} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$ <p>mit Titan: $\rho = 4150 \text{ kg/m}^3$ $\sigma_{\text{max}} = 200 \text{ MPa}$</p>	 $f = \frac{1}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$ <p>mit Saite: $\rho = 5671 \text{ kg/m}^3$ $\sigma = 2381 \text{ MPa}$ $d = 0,229 \text{ mm}$</p>
→ $L_{\text{max}} = 5,1 \text{ mm}$	→ $L_{\text{max}} = 4,3 \text{ mm}$	→ $d_{\text{max}} = 8,5 \text{ mm}$	→ $L_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$

Abb. 2.7: Dimensionierung von Stimmgabel, Pfeife, Pauke und Gitarre zur Ultraschallerzeugung ($f \geq 20$ kHz)

Um diese Berechnungen zu überprüfen und die Varianten auf ihre Tauglichkeit für technische Anwendungen zu testen, wurden zu den verschiedenen Gruppen theoretische und außer zu den Membranophonen zusätzlich experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

- **Chordophone**

Unter dem Begriff Chordophone sind Musikinstrumente zusammengefasst, die Saiten zur Klangerzeugung nutzen. Sämtliche Saiteninstrumente besitzen eine beidseitige Einspannung der Saiten, um eine Vorspannung der Saite zu ermöglichen. Diese berechnet sich mit der Einspannungskraft F und der Querschnittsfläche A der Saite.

Vorspannung:
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

Die Eigenfrequenzen f_n einer Saite mit der Länge L , der Dichte ρ und der Vorspannung σ berechnen sich zu [2.8]:

Eigenfrequenzen
Saiteninstrumente:

$$f_n = \frac{1+n}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}} = n \cdot f_0 \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.12)$$

Durch die beidseitige Einspannung besitzen die schwingenden Saiten Schwingungsknoten an den Enden der frei schwingenden Länge (Mensur). Da die Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen, handelt es sich um harmonische Oberschwingungen. Je nachdem, welcher Teilton der Saite angeregt wird, gibt es unterschiedlich viele Schwingungsknoten und daraus resultierende Wellenlängen (Abb. 2.8).

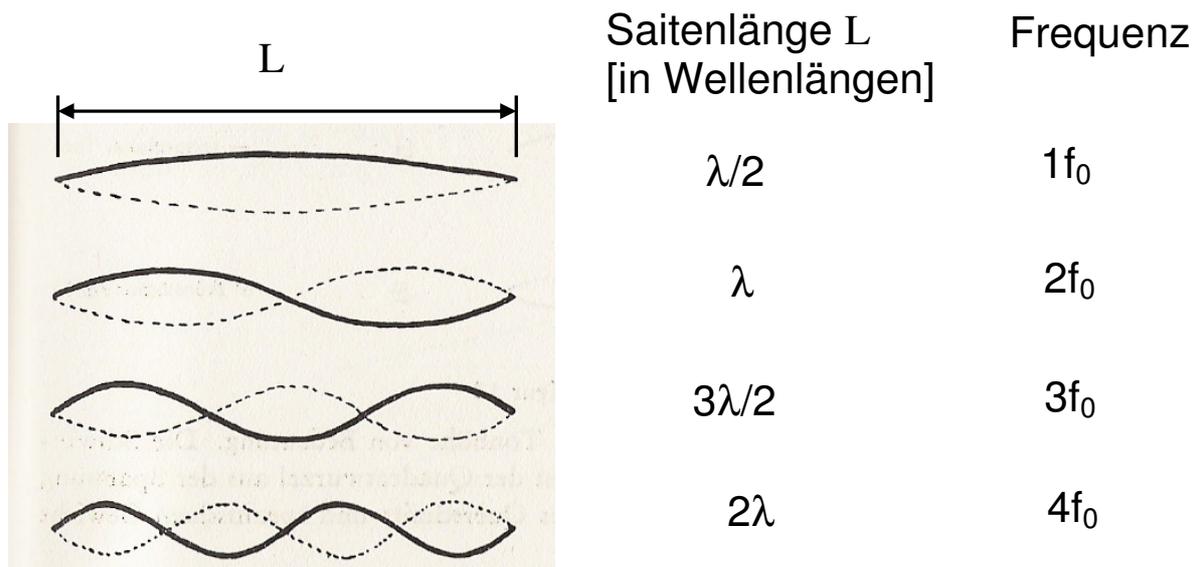


Abb. 2.8: Zusammenhang zwischen der Länge der Saite und der resultierenden Wellenlänge der Schwingung für verschiedene Teiltöne [2.14]

Einen weiteren Einfluss auf die Schwingungsform hat der Ort der Saitenanregung, da an diesem Ort immer ein Schwingungsbauch liegt. Schlägt man also eine Saite in der Mitte an, so regt man eher die Grundschiwingung und die ungeraden harmonischen Schwingungen an. Schlägt man die Saite dagegen auf ein Drittel der Länge an, so überwiegen die geraden harmonischen Oberschwingungen. Die Saite schwingt also immer mit den harmonischen Oberschwingungen, deren Überlagerung am ehesten der anfänglichen Auslenkung entspricht [2.10]. Während einer Saitenschwingung wandeln sich kinematische und potentielle Energie periodisch ineinander um. Durch Reibung im umgebenden Medium (Luft) und auch durch elastische Reibung in der Saite werden Teile dieser Energie durch Dissipation abgegeben. Außerdem wird Energie über die Befestigungspunkte der Saiten an den Korpus abgeführt.

Bei den Experimenten mit einer Gitarrensaiten ist die Schwingungsanregung sehr problematisch, da die Saite bei jeder Betätigung gleich stark an einer genau vorbestimmten Stelle angeregt werden muss, um reproduzierbare Schwingungen zu erzeugen und es zudem kaum zu vermeiden ist die erste Oberschwingung anzuregen (Abb. 2.9). Diese hatte bei den Experimenten häufig die höchste Amplitude in der FFT, sodass bei der Nutzung von Saiten zur Signalerzeugung weniger als eine Oktave als Frequenzspektrum zur Verfügung stand. Dies schränkt den für die Signalübertragung nutzbaren Frequenzbereich auf 18 bis 35 kHz ein.

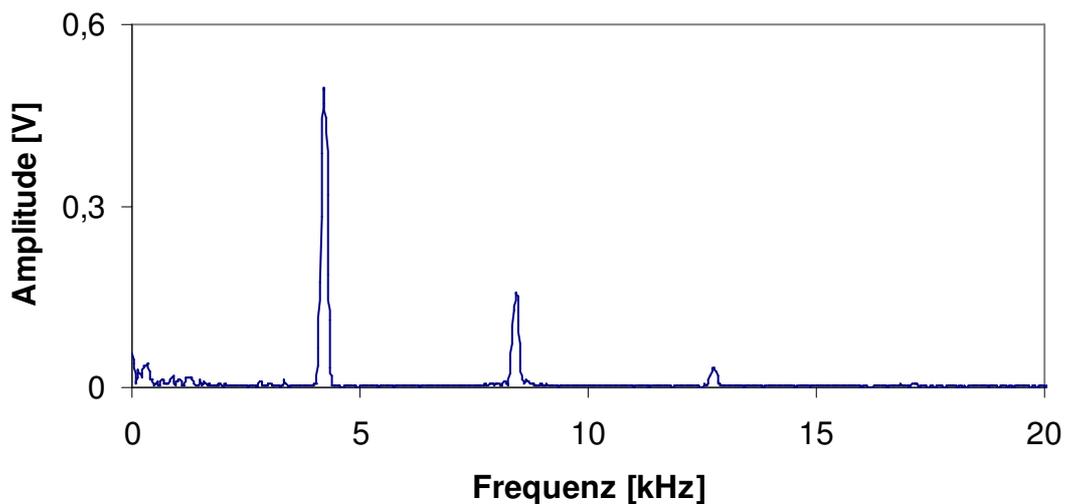


Abb. 2.9: FFT einer schwingenden Gitarrensaite mit zwei erkennbaren Obertönen

Außerdem konnte maximal eine Frequenz von 19 kHz erzeugt werden (Abb. 2.10), deren direkt an der Saite gemessene Amplitude A unter 10 mV lag. Der erzeugte Klang ist in einer Entfernung von $r = 1$ m bereits nicht mehr detektierbar.

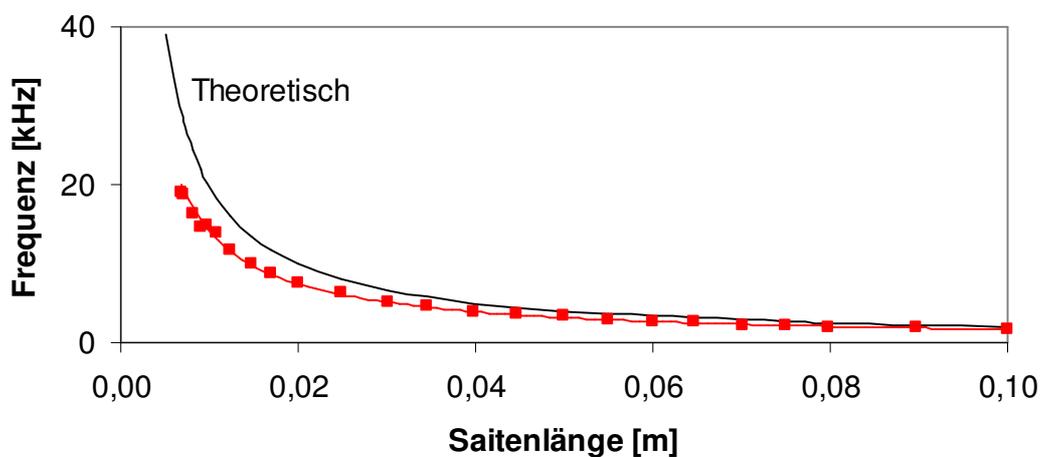


Abb. 2.10: Theoretische nach Gl. 2.12 und experimentell ermittelte Frequenzen einer Gitarrensaite in Abhängigkeit der Saitenlänge

Experimente zur Verstärkung der Schallsignale einer Gitarrensaite mit einem Helmholtz-Resonator waren nicht erfolgreich, da im Rahmen der Messgenauigkeit kein Unterschied zwischen einer schwingenden Saite mit und ohne Resonator nachgewiesen werden konnte.

Bei einer festen Einspannung der Saite kommt es durch den vom Material abhängigen Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturänderungen zu unterschiedlichen Längenänderungen von Einspannung und Saite. Damit verändert sich dann auch die Vorspannung, was laut Gl. 2.12 eine Verschiebung der Frequenz zur Folge hat. Wenn allerdings die Aufhängung aus dem gleichen Material wie die Saite

hergestellt wird, kommt es zu keiner Änderung der Vorspannung, sondern nur einer relativ geringen Verschiebung der Frequenz von 0,5 % durch den geänderten Elastizitätsmodul (siehe S. 20).

- **Membranophone**

Bei Membranophonen wird der Schall durch Anregung einer gespannten Membran durch Anschlagen oder Reiben erzeugt. Die Membranen schwingen abhängig von Anregungsart und -ort in verschiedenen Moden. Das bedeutet, dass ähnlich wie bei der Schwingung einer Saite, Knoten und Bäuche entstehen. Da Membranen im Gegensatz zur Saite eine zweidimensionale Ausdehnung haben, treten Knotenlinien auf. Diese können kreisförmig oder strahlenförmig verlaufen (Abb. 2.11), wobei die Anzahl und Form der jeweiligen Knotenlinien die Mode der Membranschwingung festlegt.

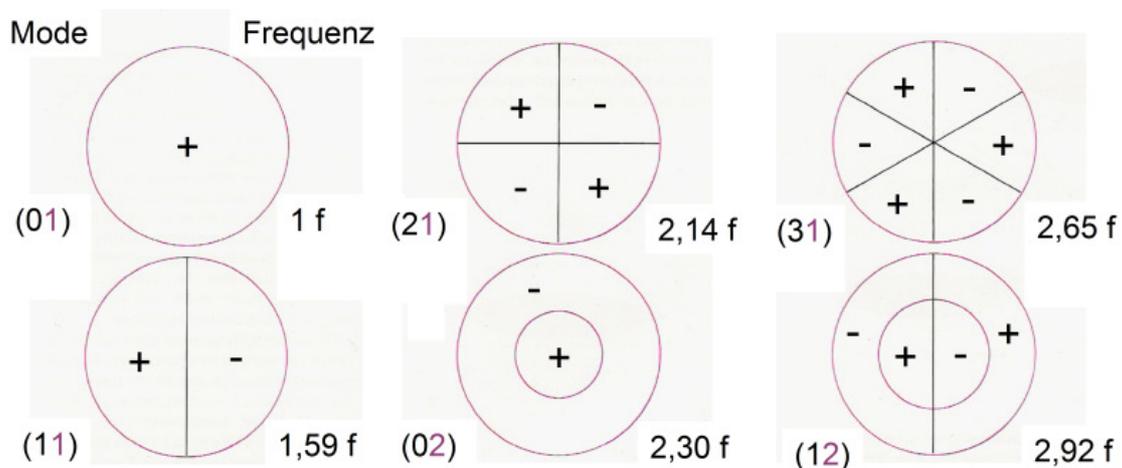


Abb. 2.11: Schematische Darstellung von idealen Membranschwingungen für verschiedene Moden mit Angabe der Frequenz als Vielfaches der Grundfrequenz f . Die gegenseitig schwingenden Flächen sind durch + und - gekennzeichnet [2.5].

Für reale Membranen ergeben sich andere Frequenzverhältnisse, da die Luftdämpfung sowie Biege- und Schersteifigkeiten der Membran zusätzlich berücksichtigt werden müssen. Lord Rayleigh fand 1894 heraus [2.5], dass nicht die Mode (01) sondern die Mode (11) den Grundton erzeugt und so für die empfundene Tonhöhe von Bedeutung ist. Jedoch kann nur die Pauke eine wahrnehmbare Tonhöhe erzeugen, alle anderen Membranophone erzeugen Geräusche, da die durch die Membranschwingung hervorgerufenen Oberschwingungen in keinem harmonischen Verhältnis zur Grundschwingung stehen. Der halbkugelförmige Paukenkessel erhöht die Frequenzen der Obertöne soweit, dass sich die Frequenzen der Moden (11), (21), (31) und (41) vergleichbar verhalten wie 1 : 1,5 : 2 : 2,5 [2.15]. Diese harmonischen Oberschwingungen ermöglichen es mit einer Pauke eine wahrnehmbare Tonhöhe zu erzeugen.

Auf eine genauere Untersuchung der Pauke, also einer vorgespannten Membran, wurde verzichtet. Ein Mechanismus für eine konstante und bestimmbare Vorspannung des Paukenfells ist kompliziert herzustellen und wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht experimentell untersucht.

- **Idiophone**

Zu der Gruppe der Idiophone zählen die Musikinstrumente, bei denen zur Tonerzeugung das gesamte Instrument zum Schwingen gebracht wird. Dies können Stäbe oder Platten sein, die sich prinzipiell vergleichbar zu Saiten und Membranen verhalten. Je nach Stärke der Schwingungsanregung und dem Anregungsort bilden sich auch hier Schwingungsknoten und -bäuche aus. Allerdings sind bei Stäben und Platten im Gegensatz zu den beidseitig fest eingespannten Saiten verschiedene Randbedingungen möglich. Da erste Versuche mit unterschiedlichen schwingenden Balken erfolgreich waren, sind die theoretischen Betrachtungen, die Fertigung und die Ergebnisse in Kap. 3 ausgeführt.

- **Aerophone**

Aerophone sind Musikinstrumente, deren Klang durch Luftschwingungen entsteht. Bei den meisten Aerophonen schwingt eine Luftsäule in einem Rohr, wobei die Länge dieser Luftsäule einen unmittelbaren Einfluss auf die Wellenlänge des erzeugten Schalls hat. In Kap. 4 wird die Theorie von Labialpfeifen ausführlich dargestellt. Als Vertreter dieser Untergruppe wurden miniaturisierte Orgelpfeifen mit unterschiedlichen Fertigungsmethoden hergestellt (Kap. 5) und Messungen der verschiedenen Varianten sind in Kap. 6 dargestellt.

2.3 Kodierung von Schallsignalen

Jedem Ultraschallsignal muss ein eindeutiger Informationsgehalt zugeordnet sein, der vom Empfänger in die gewünschte Funktion umgewandelt werden kann, zum Beispiel Umschalten des Fernsehprogramms oder Eingabe einer Ziffer oder eines Befehls beim PC. Die Übersetzung von Ultraschallsignalen in elektronische Signale oder Befehle erfolgt mit Hilfe eines Codes. Ein Code ist eine Übersetzungsvorschrift, die Signalen oder Informationen eine eindeutige Bedeutung zuordnet. Meist wird aus einem Baukasten weniger einfacher Signale oder Informationen durch Kombination eine komplexere Information übertragen. Beispiele dafür sind der Morse-Code oder der Binärkode bei denen aus jeweils nur zwei Komponenten („Lang“ und „Kurz“ bzw. „0“ und „1“) Informationen übertragen werden können.

Aus zwei Gründen ist eine Kodierung der Schallsignale für den Betrieb einer Ultraschallfernbedienung notwendig:

- **Beschränkung des Frequenzbereichs und der Anzahl nutzbarer Frequenzen**

Der für die Ultraschallfernbedienung nutzbare Frequenzbereich ist nach unten durch den Hörbereich des Menschen begrenzt, da dieser Töne bis etwa 18 kHz wahrnehmen kann. Nach oben begrenzt ist der Frequenzbereich durch die mit zunehmender Frequenz steigende Luftdämpfung (Abb. 2.4), die die Reichweite der Signale einschränkt, so dass 50 kHz als Obergrenze angesetzt wurde. Da die verschiedenen Funktionen zugeordneten Frequenzen wegen der endlichen Halbwertsbreite der Spektren (vgl. Abb. 2.6) nicht beliebig dicht angeordnet werden können, steht nur eine relativ geringe Zahl von unterscheidbaren Frequenzen zur Verfügung. Durch eine geeignete Kodierung kann mit dieser geringen Anzahl an Frequenzen eine große Anzahl an Signalen realisiert werden.

- **Eindeutige Identifikation**

In Umgebungsgeräuschen wie z.B. Schlüsselklingeln, treten ebenfalls Ultraschallfrequenzen auf. Es bedarf daher einer Kodierung, die durch zusätzliche Informationen das Signal eindeutig von Umgebungsgeräuschen unterscheidbar macht.

Als mögliche Kodierung wurden folgende Ansätze untersucht (Abb. 2.12):

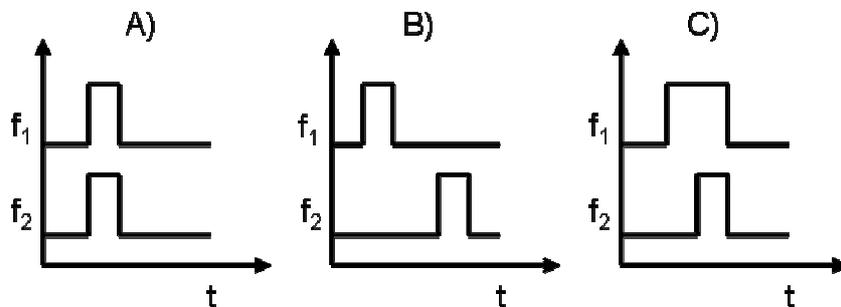


Abb. 2.12: Verschiedene Kodierungsmöglichkeiten eines Schallsignals bei Kombination von zwei Frequenzen

A) Kombination von zwei Frequenzen

Eine Möglichkeit für die Kodierung von Ultraschallsignalen ist die Zusammensetzung der Signale aus mehreren Frequenzen. Neben einer erhöhten Sicherheit bei der Signalerkennung bietet diese Methode zudem eine größere Anzahl an möglichen Signalen, die mit einer bestimmten Anzahl Frequenzen übermittelt werden kann. Für die Anzahl \$N\$ unterschiedlicher Signale bei Verwendung von Kombinationen von 2 Frequenzen aus einer Gesamtheit von \$m\$ Frequenzen gilt folgender Zusammenhang:

$$N = \sum_1^m (m - 1) = \frac{1}{2} m (m - 1) \quad (2.13)$$

B) Kombination von zwei Frequenzen mit einer bestimmten Pausenlänge

Neben der Kombination unterschiedlicher Frequenzen kann eine Kodierung über eine Zeitkomponente des Signals erfolgen, indem beispielsweise eine definierte Unterbrechung des Signals oder eine zeitliche Verschiebung einzelner Signalkomponenten vorgesehen werden. Ein Signal kann aus mehreren Tönen der gleichen Frequenz oder unterschiedlicher Frequenzen bestehen, zwischen denen eine zeitlich definierte Pause liegt. Bei Verwendung von \$m\$ unterschiedlichen Frequenzen und \$n\$ unterschiedlichen Pausenlängen bzw. zeitlichen Verschiebungen gilt für die Anzahl \$N\$ unterscheidbarer Signale der folgende Zusammenhang:

$$N = m^2 \times n \quad (2.14)$$

Durch die Kombinierbarkeit von zwei gleichen Frequenzen und der Unterscheidung der zeitlichen Reihenfolge von zwei Schallsignalen kann schon bei der Verwendung von nur einer Pausenlänge \$n\$ eine mindestens doppelt so hohe Anzahl erreicht werden. Nachteilig für Anwendungen mit einer schnellen Signalfolge (z. B. PC-Tastatur)

ist die längere Signaldauer, da zweimal eine minimale Schallsignallänge und eine Pausendauer erzeugt werden müssen.

C) Kombination von zwei Frequenzen mit zeitlichem Versatz

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Signals bestehend aus zwei Frequenzen mit zeitlich versetztem Beginn. Im Vergleich zur Variante A ergeben sich doppelt so viele Kodierungsmöglichkeiten, da unterschieden werden kann, ob Frequenz 1 oder Frequenz 2 einen früheren Beginn aufweist. Dabei ergibt sich folgende Anzahl an Kodierungen:

$$N = 2 \cdot \sum_1^m (m-1) = m(m-1) \quad (2.15)$$

Diese Variante bietet annähernd so viele Codes wie Variante B und lediglich eine etwa doppelte Signallänge im Vergleich zu Variante A.

D) Kombination von Kodierung A und C

Des Weiteren ist die Kombination von Variante A und C möglich, sodass zwei Frequenzen abgefragt werden, die entweder gleichzeitig oder mit einem zeitlichen Versatz der einen oder anderen Frequenz auftreten. Dadurch ergeben sich für eine Frequenzkombination drei verschiedene Kodierungen N:

$$N = 3 \cdot \sum_1^m (m-1) = \frac{3}{2} \cdot m(m-1) \quad (2.16)$$

Um zu verdeutlichen wie viele Kombinationen mit $m = 10$ verschiedenen Frequenzen und $n = 1$ Pausenlänge realisierbar sind, zeigt Tab. 2.2 für die verschiedenen Ansätze die Möglichkeiten N:

Variante	A	B	C	D
Kodes N	45	100	90	135

Tab. 2.2: Anzahl der Kodierungsmöglichkeiten der Kodierungsvarianten A bis D für $m = 10$ verschiedene Frequenzen und $n = 1$ Pausenlänge bei Variante B

Daraus ist ersichtlich, dass für die angestrebte Anwendung einer Computertastatur Variante D mit $m = 10$ Frequenzen eine ausreichende Anzahl an Codes liefern würde.

3 Ultraschallerzeugung mit Balken

Mit der ersten Ultraschallfernbedienung „Space Command“ (vgl. Kap. 1) konnten allein durch Fingerkraft Schallwellen mit vier verschiedenen Frequenzen im Ultraschallbereich erzeugt werden. Bei der Betätigung einer Taste wurde einer von vier Aluminiumstäben durch Anschlagen mit einem kleinen Hammer zu Längenschwingungen angeregt. Jedes Schaltsignal bestand aus einer einzigen Frequenz, was diese Fernbedienungen anfällig für Störgeräusche aus der Umgebung machte, in denen häufig Schwingungen im Ultraschallbereich vorkommen. Außerdem war eine aufwändige Mechanik notwendig um den Fingerdruck auf eine Taste in das Anschlagen eines der Aluminiumstäbe mit einer bestimmten Kraft F umzusetzen (Abb. 3.1 links).

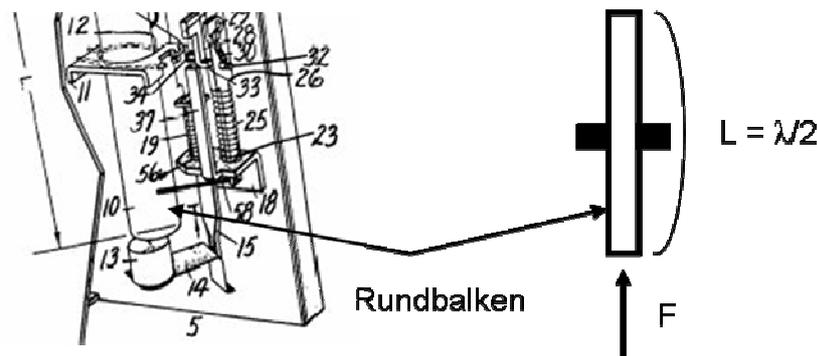


Abb. 3.1: Anregungsmechanismus der Ultraschallfernbedienung "Space Command" [Kap. 1], bei der ein Balken der Länge L von unten angeschlagen wird und somit Längenschwingung mit der Wellenlänge λ ausführt.

3.1 Theoretische Betrachtung schwingender Balken

Der Zusammenhang zwischen Stablänge und Eigenfrequenz bei längs schwingenden Balken berechnet sich nach Gl. 3.1. Daraus ergibt sich ein weiterer Nachteil dieser Art der Ultraschallerzeugung, da durch die prinzipbedingt notwendige Stablänge die Anzahl der Stäbe bei gegebenem Bauraum und damit auch die Zahl der Funktionen beschränkt wird. Die Randbedingung $\lambda = 2 L$ in Gl. 2.5 eingesetzt ergibt:

Eigenfrequenz:
$$f = \frac{c}{2 \cdot L} = 40,2 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

Randbedingungen:

Länge des Aluminiumstabes: $L = 63,5 \text{ mm}$

Schallgeschwindigkeit in Aluminium (Tab. 2.1): $c_{AL} = 5110 \text{ m/s}$

Diese Lösung ist daher aufgrund des benötigten Bauraums und der aufwändigen Mechanik für den Einsatz in kabellosen PC-Tastaturen oder Fernsehfernbedienungen nach den heutigen Standards nicht geeignet.

Kleinere Abmessungen der Metallbalken könnten erreicht werden, wenn die Balken nicht zu Längsschwingungen, sondern zu Biegeschwingungen angeregt werden. Daraus ergeben sich andere Zusammenhänge zwischen den Abmessungen, den Rand-

bedingungen (Lagerungen der Balken), den Materialkonstanten und den erzeugbaren Frequenzen. Zur Bestimmung der Eigenfrequenz sind die Abmessungen (Länge L und Dicke d) und der Frequenzparameter λ_i (abhängig von der Art der Lagerung) relevant, wie in den Gleichungen (3.2-3.4) ersichtlich:

Eigenfrequenz [3.1]:
$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \quad (3.2)$$

λ_i = Frequenzparameter der i -ten Schwingungsmode

I = Flächenträgheitsmoment

E = Elastizitätsmodul

m = Masse pro Länge

L = Länge

In Tab. 3.1 sind für die beiden betrachteten Lagerungsfälle für die ersten drei Schwingungsmode i die Frequenzparameter λ_i aufgelistet.

Schwingungsmode i	Frequenzparameter λ_i für den einseitig gelagerten Balken	Frequenzparameter λ_i für den frei schwingenden Balken
1	1,875	4,730
2	4,694	7,853
3	7,855	10,996

Tab. 3.1: Frequenzparameter der i -ten Schwingungsmode von einseitig eingespannten und frei gelagerten Balken [3.1]

Aus der Vielzahl an Lagerungsvarianten und Lagerungspunkten wurden für die theoretischen Betrachtungen und die experimentellen Ausführungen die beiden in

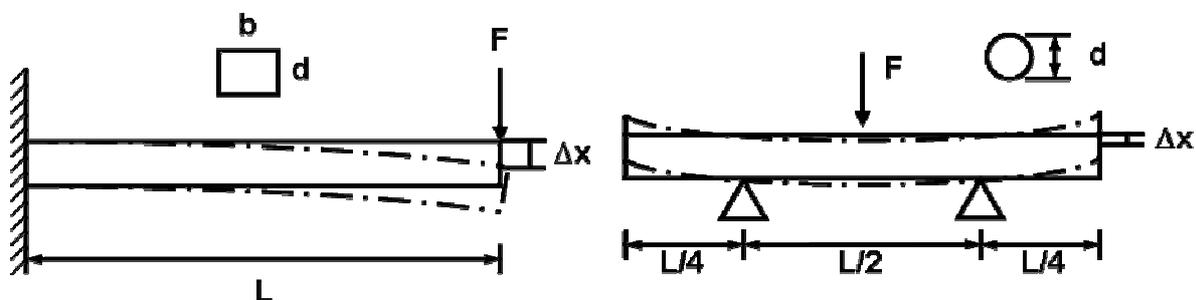


Abb. 3.2: Einseitig eingespannter Balken und frei gelagerter Balken mit den jeweiligen Abmessungen und Angriffspunkten der Auslenkungskraft F

Abb. 3.2 dargestellten Fälle ausgewählt. Einseitig eingespannte Balken kommen z.B. in Spieluhren vor, an Schwingungsknoten aufliegende Balken sind mit Xylophonen

vergleichbar. Für einen einseitig eingespannten Balken mit rechteckigem Querschnitt (Abb. 3.2 links) berechnet sich die Resonanzfrequenz für die Grundschiwingung mit dem Frequenzparameter $\lambda_1 = 1,851$ [3.1] folgendermaßen:

$$\text{Mit [3.1]} \quad I_{\text{Rechteck}} = \frac{b \cdot d^3}{12} \quad (3.3)$$

$$\text{in 3.2 eingesetzt ergibt:} \quad f_{\text{Rechteck}} = \frac{\lambda^2 \cdot d}{4\sqrt{3} \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.4)$$

Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuche zeigten, dass Balken in der gesuchten Größenordnung am besten zu Schwingungen angeregt werden können, wenn sie eine Dicke $d = 0,4$ mm aufweisen. Bei einer angestrebten Resonanzfrequenz $f = 20$ kHz ergibt sich daraus für einen Balken aus Stahl ($\rho = 7900$ kg/m³) mit Hilfe von Gl. 3.4 eine Länge $L = 4$ mm. Der Einfluss der Breite b des Balkens auf die Eigenfrequenz kann vernachlässigt werden, solange die Breite größer als die Dicke ist und damit die Schwingungsrichtung eindeutig bestimmt ist.

Zum Vergleich werden für die gleiche Frequenz und das gleiche Material die notwendigen Abmessungen für einen frei gelagerten Balken mit kreisförmigem Querschnitt (Abb. 3.2 rechts) mit dem Flächenträgheitsmoment I_{Kreis} und einem aufgrund der veränderten Lagerung höheren Frequenzparameter berechnet.

$$\text{Mit [3.1]} \quad I_{\text{Kreis}} = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad (3.5)$$

$$\text{in 3.2 eingesetzt ergibt:} \quad f_{\text{Kreis}} = \frac{\lambda^2 \cdot D}{16 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.6)$$

Die Abmessungen des Stabes müssen wegen des 2,5-fach höheren Frequenzparameters (Tab. 3.1) wesentlich größer gewählt werden.

Berechnung der experimentell untersuchten Balken:

Stahlbalken 1 und 2 aus Abb. 3.6

$\lambda_1 = 4,73$; $L_1 = 25$ mm; $L_2 = 27$ mm; $D = 3$ mm; $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ N/m²; $\rho = 7900$ kg/m³

$$f_1 = \frac{\lambda_1^2 r}{4 \pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 22,0 \text{ kHz} \quad f_2 = \frac{\lambda_1^2 r}{4 \pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 18,9 \text{ kHz}$$

Aluminiumbalken 3 aus Abb.3.6 (Seite 23)

$\lambda_1 = 4,73$; $L = 4,3$ mm; $E = 7 \cdot 10^{10}$ N/m²; $D = 6$ mm; $\rho = 2700$ kg/m³

$$f_3 = \frac{\lambda_1^2 r}{4 \pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 14,7 \text{ kHz}$$

Zur Abschätzung der maximalen Sendeleistung wird die maximale Arbeit bestimmt, die in einen Balken eingebracht werden kann, bis plastische Verformung auftritt. Dabei wird für beide Varianten jeweils ein Balken betrachtet, der eine theoretische Eigenfrequenz $f = 20$ kHz besitzt.

Für den einseitig eingespannten Balken mit rechteckigem Querschnitt gelten folgende Zusammenhänge:

$$\text{Max. Biegespannung [3.2]: } \sigma_{b,Max} = \frac{|M_y|}{W_y} = \frac{F \cdot L \cdot d}{2 \cdot I} \quad (3.7)$$

$$\text{Maximale Kraft } F_{Max}: \quad F_{Max} = \frac{b \cdot d^2 \cdot \sigma_{b,Max}}{6 \cdot L} \quad (3.8)$$

Randbedingungen: $f = 20 \text{ kHz}$; $\lambda_1 = 1,875$; $L = 4 \text{ mm}$; $d = 0,4 \text{ mm}$; $b = 0,5 \text{ mm}$;
 $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$; $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_{b,Max} = 8,75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

$$\Rightarrow F_{Max} = \frac{b \cdot d^2 \cdot \sigma_{b,Max}}{6 \cdot L} = 2,92 \text{ N} \quad (3.9)$$

$$\text{Auslenkung [3.2]: } w(x) = \frac{F}{6 E I} x^2 (3 L - x) \quad (3.10)$$

Die maximale Auslenkung berechnet sich aus Gl. 3.10 durch einsetzen von $x = L$, $F = F_{Max}$ und dem Flächenträgheitsmoment aus Gl. 3.3:

$$\text{Max. Auslenkung: } w(x=L) = \frac{4 F_{Max} L^3}{E \cdot b \cdot d^3} = w_{0,Max} = 112 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.11)$$

Darüber hinaus ergibt sich aus Gl. 3.10 für die am Ende des Balkens zur Auslenkung um w_0 benötigte Kraft F :

$$F = \frac{4 w_0 L^3}{E b d^3} \quad (3.12)$$

Die zum Auslenken des Balkens benötigte Arbeit wird über das Integral der Kraft über den Weg (also die Auslenkung w_0) berechnet:

$$\text{Arbeit [3.2]: } W = \int_0^{w_0} F dw_0 = \int_0^{w_0} \frac{4 L^3 w_0}{E b d^3} dw_0 = \frac{1}{2} \cdot F_{Max} \cdot w_{0,Max} = 164 \text{ } \mu\text{J} \quad (3.13)$$

Für den an seinen Schwingungsknoten bei $\frac{1}{4} L$ und $\frac{3}{4} L$ gelagerten Balken mit kreisförmigem Querschnitt ergibt sich mit folgenden Randbedingungen:

Randbedingungen: $f = 20 \text{ kHz}$; $\lambda_1 = 4,73$; $L = 26,2 \text{ mm}$; $D = 3 \text{ mm}$;
 $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$; $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_{b,Max} = 8,75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

$$\text{Maximale Kraft [3.2]: } F_{Max} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \sigma_{b,Max}}{4 \cdot L} = 708 \text{ N} \quad (3.14)$$

Auslenkung [3.3]:
$$w(x) = \frac{3 \cdot F \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} \left(\frac{3 \cdot x}{L} - \frac{16 \cdot x^3}{L^3} \right) \quad (3.15)$$

Max. Auslenkung:
$$w(L/4) = \frac{F \cdot L^3}{2 \cdot E \cdot \pi \cdot D^4} = 118 \mu\text{m} \quad (3.16)$$

Max. Arbeit:
$$W_{\text{Max}} = \frac{1}{2} \cdot F_{\text{Max}} \cdot x_{\text{Max}} = 42 \text{ mJ} \quad (3.17)$$

Da die Kraft, mit der der Balken maximal angeschlagen werden kann, bevor er beschädigt wird, mit 708 N (siehe Gl. 3.14) deutlich größer ist als die Fingerkraft eines Benutzers, ist hier nicht die maximal mögliche Kraft ausschlaggebend sondern die Kraft $F = 4 \text{ N}$ die laut Lastenheft (vgl. Seite 2) zugelassen ist:

Auslenkung bei $F = 4 \text{ N}$:
$$w(L/4) = \frac{F \cdot L^3}{2 \cdot E \cdot \pi \cdot D^4} = 670 \text{ nm} \quad (3.18)$$

Arbeit bei $F = 4 \text{ N}$:
$$W = \frac{1}{2} \cdot F \cdot x = 1,3 \mu\text{J} \quad (3.19)$$

Daher liegt bei dem größeren Balken kein prinzipieller Vorteil darin, dass er mehr Arbeit aufnehmen kann, da die verfügbare Betätigungskraft begrenzt ist.

Ein wichtiger Aspekt ist auch die Temperaturabhängigkeit des Signals des schwingenden Balkens, da sich durch die Änderung der Umgebungstemperatur die Frequenz verändern kann. Exemplarisch wurde der Einfluss einer Temperaturerhöhung um $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ für einen einseitig eingespannten Balken aus Stahl mit einem Temperaturexpansionskoeffizienten $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} /\text{K}$ berechnet:

Dehnung [3.4]:
$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.20)$$

Dichte [3.4]:
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.22)$$

Randbedingung [3.4]:
$$\frac{\Delta V}{V} \approx 3\varepsilon \quad (3.23)$$

Mit: ε = Dehnung, ρ = Dichte, m = Masse, V = Volumen, ΔV = Volumenänderung.

Für Stahlbalken ergibt sich durch die Längenänderungen eine Verringerung der Frequenz gemäß Gl. 3.20 von weniger als 0,1 %. Allerdings hat die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls einen vierfach höheren Einfluss auf die Frequenz. Da dieser mit steigender Temperatur abnimmt [3.5] und die Dichte von Aluminium eine zwanzigfach geringere Temperaturabhängigkeit aufweist [3.5], ergibt sich nach Gl. 3.6. nochmals eine Verringerung der Frequenz von 0,4 %. Damit ist die Verschiebung der Ausgangsfrequenz durch Temperaturänderung mit 0,5% um den Faktor 10 geringer als bei den Ultraschallpfeifen (siehe Kap. 5).

3.2 Versuche mit einseitig aufgehängten Balken

Einseitig aufgehängte Balken wurden mit unterschiedlichen Fertigungsmethoden hergestellt. Nach ersten Versuchen mit gekürzten Balken von Spieluhren aus gehärtetem Stahl wurde vom Gießereinstitut der RWTH eine Gussform gefräst, mit der Wachsrüchlinge (Abb. 3.3 links) hergestellt werden konnten. Mit diesen wurden durch Mikroguss Balkenplatten mit unterschiedlich langen Balken aus Titan und Kupfer gefertigt (Abb. 3.3 rechts).

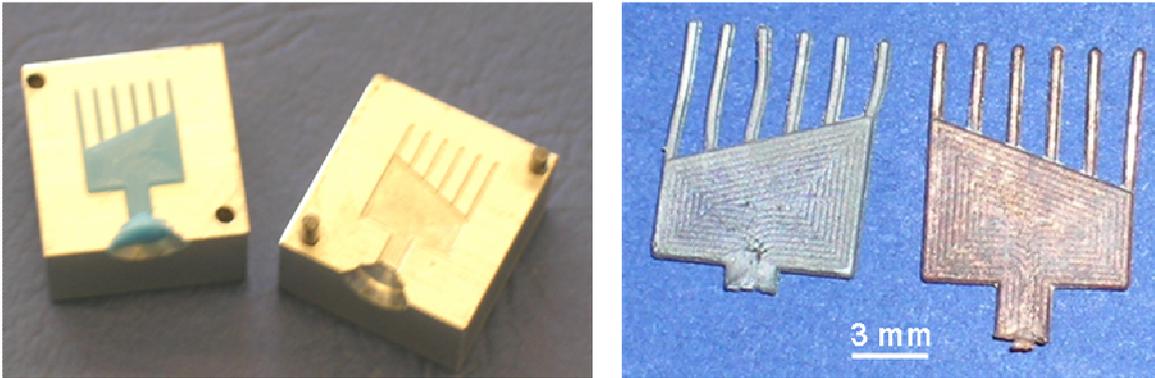


Abb. 3.3: Links: Gussformen für die Herstellung der Mikrobalken. Rechts: Aus Titan und Kupfer gegossene Mikrobalken mit einer Länge von $L = 3 - 5 \text{ mm}$ und eine Querschnitt von $H \times B = 0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$

Diese Balken hatten eine so geringe Festigkeit, dass sie kaum in Schwingung versetzt werden konnten, sondern bereits je nach Länge bei $F = 0,2$ bis $0,5 \text{ N}$ plastisch verformt wurden. Dies war ab ca. $F = 0,5$ bis $0,7 \text{ N}$ auch bei mit einem Laser geschnittenen Mikrobalken aus gehärtetem Stahl (1.4310) der Fall (Abb. 3.4 links).



Abb. 3.4: Lasergeschnittene Balkenplatte mit theoretischen Eigenfrequenzen zwischen 10 und 28 kHz (links) und (rechts) vier gefräste Stimmgabeln unterschiedlicher Größe mit Zinkenlängen von $L = 4, 6, 12$ und 21 mm

Bei diesen Balken konnten zwar bei sehr vorsichtigem Anreißen mit dem Fingernagel Schwingungen im Ultraschallbereich erzeugt werden (Abb. 3.5), allerdings scherten sie nach wenigen Betätigungen entweder ab oder verformten sich zumindest plastisch. Die Schwingung aus Abb. 3.5 wurde ca. 1 cm vom Mikrofon entfernt aufgenommen und konnte in ca. 1 m Entfernung nicht mehr detektiert werden. Positiv war bei dieser Balkenvariante, dass die Amplitude der Schwingung durch die starre Balkenplatte stark gedämpft wurde und somit eine Schwingungsdauer von ca. 20 ms erreicht wurde.

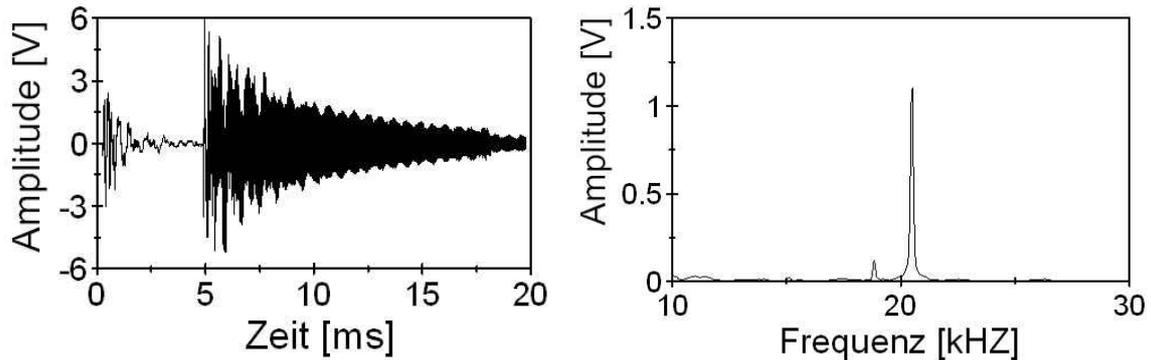


Abb. 3.5: Schwingungsverlauf und FFT einer Schwingung des kürzesten Stahlbalkens aus Abb. 3.4 links

Mit einer Mikrofräse wurden bei KEmikro kleine Stimmgabeln aus Messing gefräst (Abb. 3.4 rechts). Bei der Anregung dieser Stimmgabeln traten keine plastischen Verformungen auf, ein kontrolliertes Anschlagen war jedoch nur bei den beiden längsten Stimmgabeln möglich. Die gemessenen Frequenzen der kleineren Stimmgabeln, die laut Gl. 3.4 im geforderten Ultraschallbereich liegen sollten, konnten nicht durch Anschlagen oder Anreißen bestimmt werden, sondern nur durch Fallenlassen vor einem Mikrofon. In Tab. 3.2 sind die Ergebnisse der mit den Stimmgabeln durchgeführten Messungen den nach Gl. 3.4 berechneten Frequenzen gegenübergestellt. Dabei liegt die gemessene Frequenz immer 5 - 18 % unterhalb der theoretisch berechneten. Bei einer Stimmgabel liegen nicht die gleichen Bedingungen vor wie bei einem einseitig eingespannten Balken, sodass Gl. 3.4 hier nur eine Näherung darstellt. Insbesondere kann der exakte Knotenpunkt nicht bestimmt werden.

Zinkenlänge L [mm]	Berechnete Frequenz f_{ber} [kHz]	Gemessene Frequenz f_{gem} [kHz]	Rel. Abweichung [%]
21	3,5	3,0	14
12	8,5	7,6	12
6	17,1	16,2	5
4	38,4	31,3	18

Tab. 3.2: Berechnete und gemessene Frequenzen der Stimmgabeln aus Abb. 3.4

3.3 Versuche mit frei gelagerten Balken

Eine weitere untersuchte Möglichkeit zur Erzeugung von Ultraschall mit schwingenden Balken ist in Abb. 3.6 dargestellt. An ihren Knotenpunkten mit dünnem Federdraht aufgehängte, nahezu frei schwingende Balken mit rundem Querschnitt wurden in drei Varianten gefertigt. Die Fertigung der verwendeten Balken ist durch Ablängen auf ein gewisses Maß sehr einfach, die Aufhängung ist hingegen aufwändiger zu fertigen.

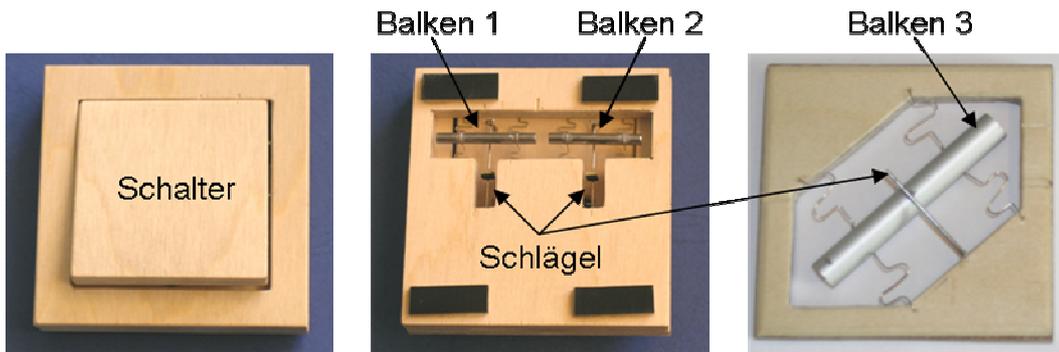


Abb. 3.6: Vor- und Rückansicht eines Lichtschalters mit zwei mittig angeregten Stahlbalken (1 und 2) und ein einzelner Aluminiumbalken (3)

Für die Verwendung in einem Lichtschalter, der eine mögliche Anwendung für Ultraschallfernbedienungen darstellt, wurden zwei Stahlbalken mit unterschiedlicher Länge eingebaut, die bei Betätigung des Schalters gleichzeitig durch zwei Schlägel angeregt werden. Der Schwingungsverlauf und die FFT des Signals sind in Abb. 3.7 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass diese Schwingung relativ schwach gedämpft wird und somit eine Schwingungslänge von ca. 200 ms aufweist. Diese ist damit fünffach höher als die geforderte Schwingungslänge für eine Ultraschalltastatur und somit nur für Anwendungen wie Lichtschalter oder Fernbedienungen mit geringer Schaltfrequenz geeignet. Allerdings entsteht durch die Abtastung von einer größeren Anzahl von Schwingungen ein schmaler Peak (Abb. 3.8) mit einer Halbwertsbreite von ca. 10 Hz. Dieser Zusammenhang wird in Kap. 6 Abb. 6.8 weiter diskutiert.

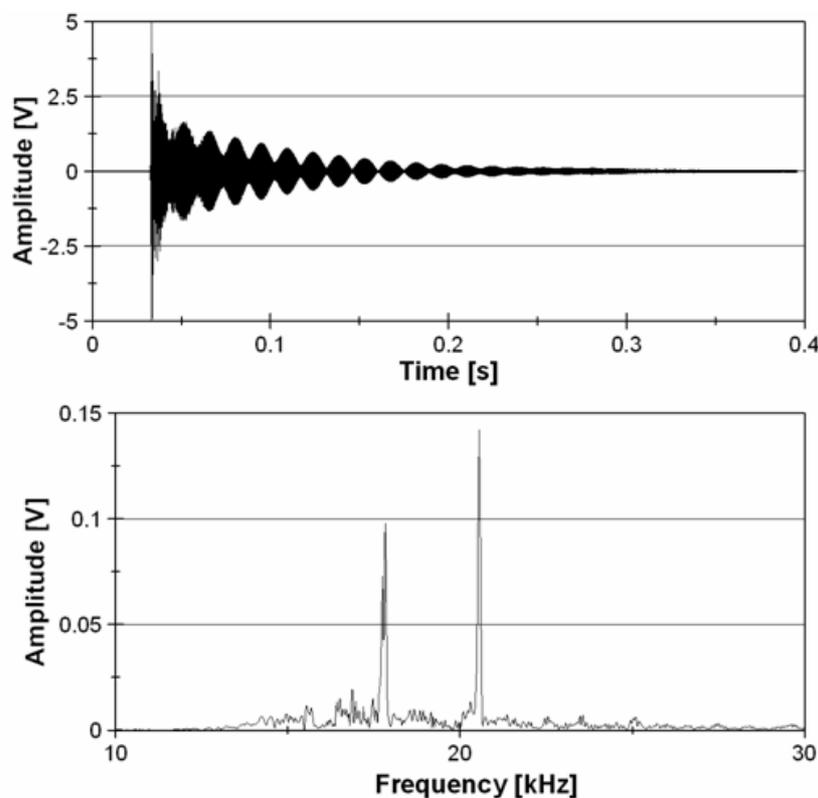


Abb. 3.7: Schwingungsverlauf (oben) und FFT der Schwingung der beiden Stahlbalken des Lichtschalters (Abb.3.6)

Um kurze Signale gleicher Dauer zu erzeugen, wie sie für eine PC-Tastatur notwendig sind, muss ein relativ aufwändiger Mechanismus realisiert werden, der zusätzlich noch eine Dämpfung der Balken gewährleistet.

Die Schwebung, die in dem Schwingungsverlauf zu erkennen ist, kann durch eine weitere FFT (Abb. 3.8) eines kleineren Bereiches erklärt werden. Der angeschlagene Balken schwingt mit zwei Frequenzen, die um ca. 60 Hz differieren. Der Grund könnten verschiedene Resonanzfrequenzen in den beiden Schwingungsrichtungen sein, da der Balkenquerschnitt nicht exakt rund ist und durch die Aufhängung leicht unterschiedliche Randbedingungen für die unterschiedlichen Schwingungsrichtungen gegeben sind.

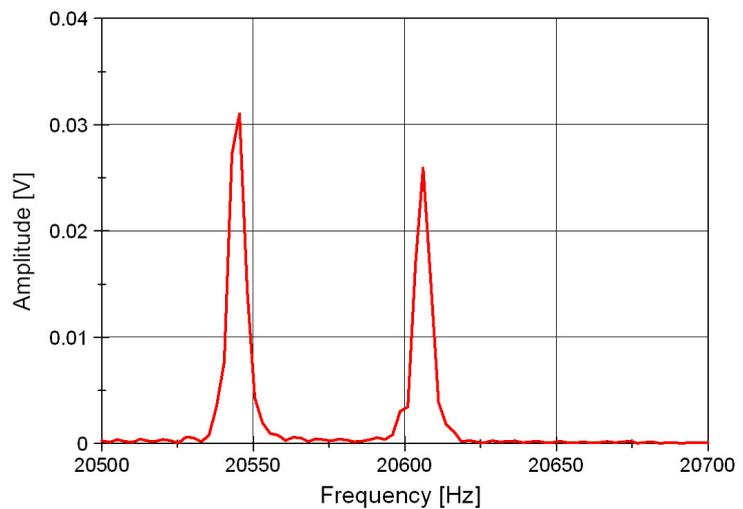


Abb. 3.8: Ausschnitt einer FFT einer Schwingung des Stahlbalken 1 des Lichtschalters (Abb.3.6)

In Abb. 3.9 ist sehr gut zu erkennen, dass eine unterschiedlich starke Anregung eines Balkens (Balken 3) zwar Einfluss auf die Amplitude des abgestrahlten Signals, aber nicht auf die Frequenz hat. Die Frequenz verschiebt sich um maximal 7 Hz, was bei einem Signal von 13,65 kHz eine Abweichung von 0,05 % bedeutet.

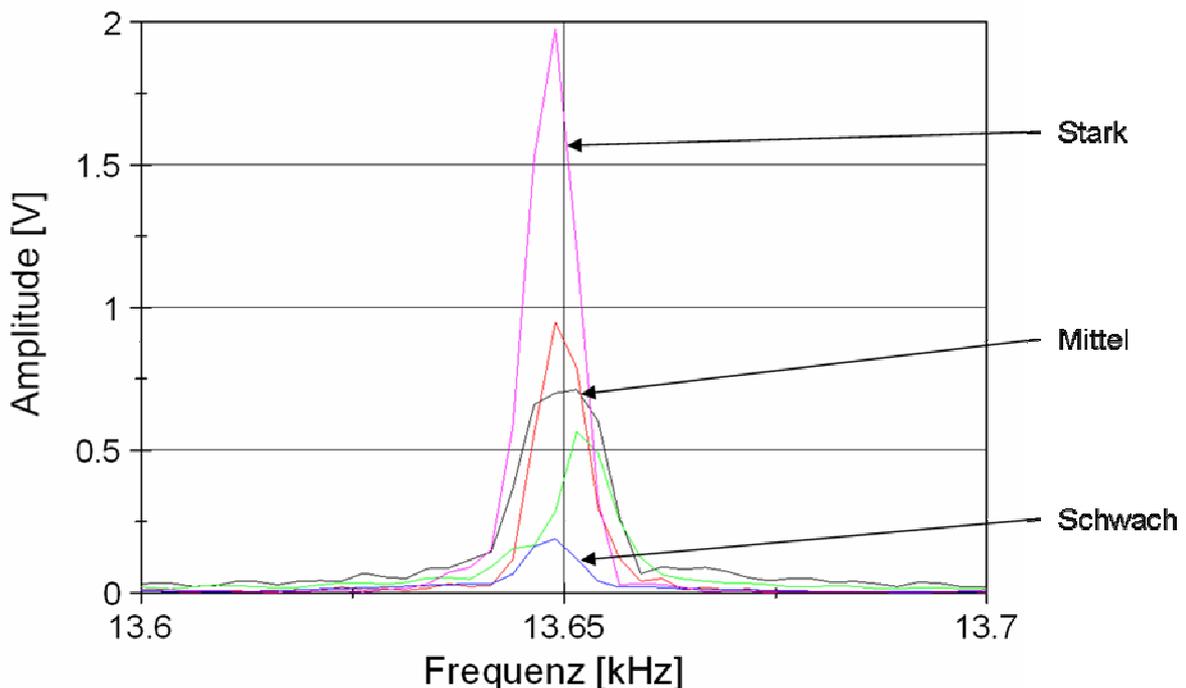


Abb. 3.9: FFT der Schwingung des Aluminiumbalkens aus Abb. 3.6 bei unterschiedlich starker Anregung mit einem Schlägel

Die unterschiedlich starke Anregung wurde erreicht, indem der Schlägel von Balken 3 mehr oder weniger stark gespannt wurde, wodurch die Anschlagkraft variiert wurde. Diese sehr geringe Abhängigkeit der Frequenz von der Betätigung ist neben der geringen Temperaturabhängigkeit ein weiterer prinzipieller Unterschied zu Ultraschallpfeifen.

Die Versuche mit den frei gelagerten Balken 1-3 ergaben im Vergleich zur Theorie (Gl. 3.6) die in Tab. 3.3 zusammengefassten Ergebnisse. Die gemessenen Frequenzen liegen ebenfalls um ca. 7 % unterhalb den theoretisch berechneten, was durch Dämpfung durch die Drahtaufhängung erklärt werden kann.

Balkenlänge L [mm]	Theoretische Frequenz f_{th} [kHz]	Gem. Frequenz f_{gem} [kHz]	Rel. Abweichung [%]
43	14,7	13,65	7,1
27	18,9	17,7	6,5
25	22,0	20,5	6,8

Tab. 3.3: Berechnete und gemessene Frequenzen der in der Mitte angeregten und annähernd frei aufgehängten Balken

Eine weitere Methode Ultraschallsignale mit zwei Frequenzen durch Balken zu erzeugen, entstand aus der Beobachtung der Messergebnisse der Balken aus Abb. 3.8.

Daher kam die Überlegung, Balken mit rechteckigem Querschnitt herzustellen und diese unter einem bestimmten Winkel anzuschlagen, sodass diese Biegeschwingungen in zwei Richtungen mit deutlich unterscheidbaren Frequenzen ausführen. Somit ist durch nur einen Balken ein kodiertes Signal mit zwei gleichzeitigen Frequenzen erzeugt worden. Eine zeitliche Kodierung ist bei dieser Variante allerdings nicht ohne weiteres möglich.

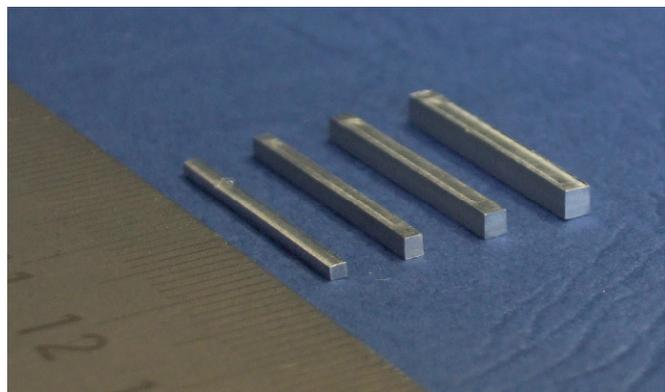


Abb. 3.10: Balken mit rechteckigem Querschnitt und jeweils 2 Eigenfrequenzen mit ca. 2 kHz Differenz

Diese Balken wurden mit der Mikrofräse aus Aluminium gefräst und besitzen eine Länge von $L = 20$ mm (Abb. 3.10). In Abb. 3.11 sind die Signale dieser 4 Balken dargestellt. Durch einfache Variation der Breite und Dicke konnten deutlich unterschiedliche Signale mit jeweils zwei Frequenzen erzeugt werden.

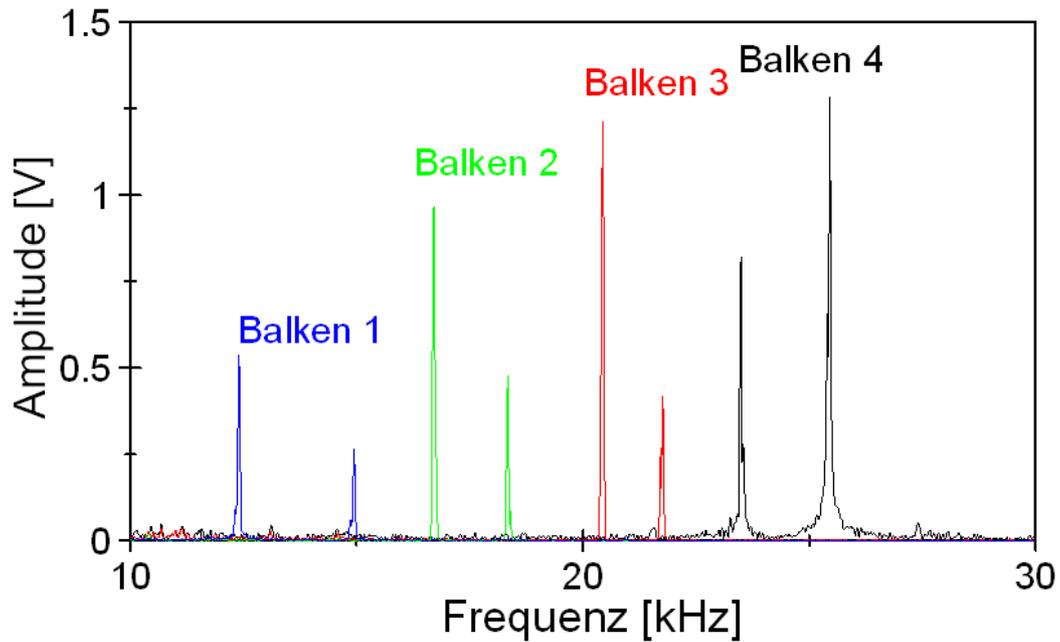


Abb. 3.11: Ultraschallsignale der 4 Balken aus Abb. 3.10, die in zwei Richtungen Biegeschwingungen ausführen

Die theoretische Berechnung nach Gl. 3.4 liefert gute Vorhersagen über die tatsächlich gemessene Frequenz (Abb. 3.12).

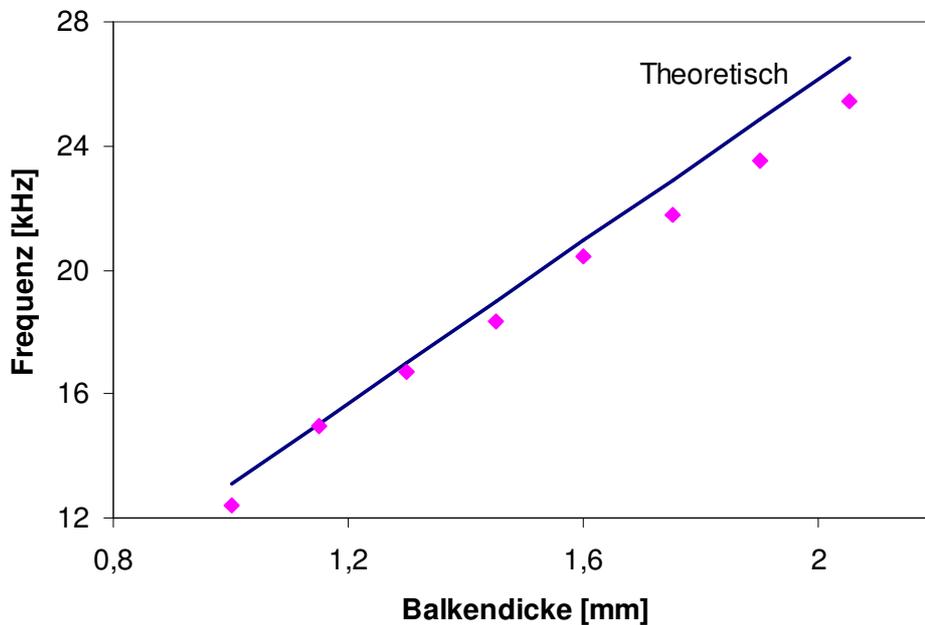


Abb. 3.12: Vergleich der Balkendicke in Schwingungsrichtung mit den Ergebnissen von Gl. 3.4

4 Ultraschallerzeugung mit Labialpfeifen

4.1 Aufbau und theoretische Zusammenhänge

Der Aufbau einer Labialpfeife ist schematisch in Abb. 4.1 dargestellt. Bei Betätigung der Pfeife strömt Luft durch den Kernspalt und trifft auf das Labium. Die entstehenden Verwirbelungen erzeugen einen Klang, dessen Frequenz hauptsächlich von der Länge des Resonanzraums abhängig ist. Die Öffnung, durch welche die Schallabstrahlung erfolgt, wird Aufschnitt oder Maul genannt [4.1].

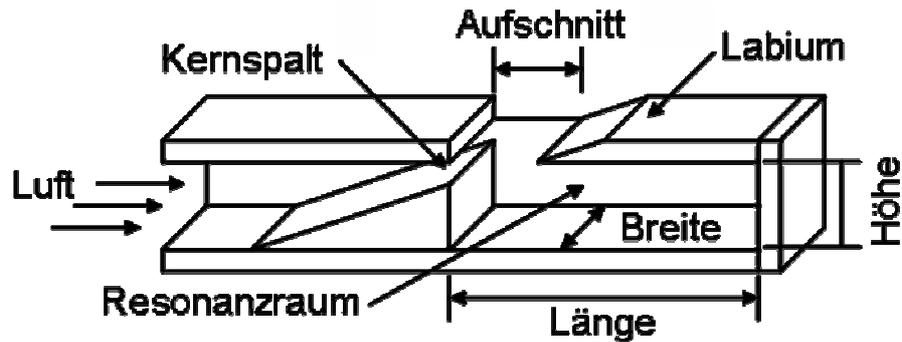


Abb. 4.1: Querschnitt durch eine Labialpfeife mit geschlossenem Resonanzraum [4.1]

Diese Labialpfeifen werden prinzipiell danach unterschieden, ob der Resonanzraum am Ende verschlossen (gedackt) oder offen ist. Danach ergeben sich für die Druckverläufe innerhalb des Resonanzraumes andere Randbedingungen (Abb. 4.2) und somit unterschiedliche Zusammenhänge zwischen der Resonanzraumlänge und der Wellenlänge der Pfeifen (Gl. 4.1 und Gl. 4.2).

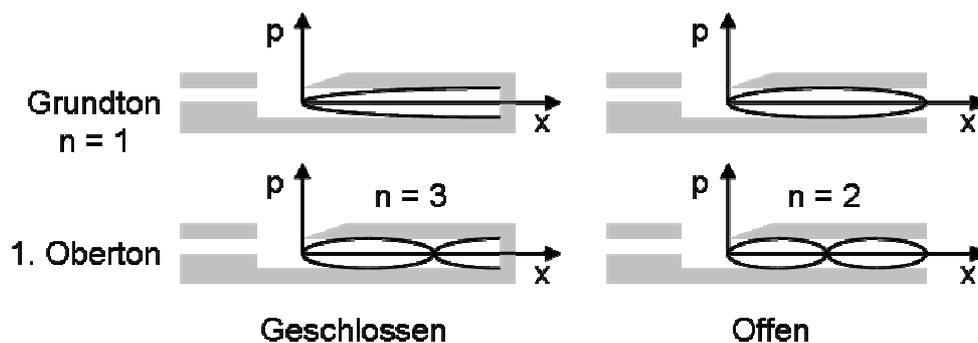


Abb. 4.2: Randbedingungen für geschlossene und offene Labialpfeifen [4.1]

Für eine gedackte Pfeife gilt grundsätzlich der folgende Zusammenhang zwischen Resonanzraumlänge L , der Wellenlänge λ und der Schwingungsmode $n = 1, 3, 5 \dots$ i:

$$\text{Wellenlänge (gedackt):} \quad \lambda = 4 \cdot L \cdot n \quad (4.1)$$

Für eine offene Pfeife gilt dagegen für die Schwingungsmoden $n = 1, 2, 3 \dots$ i:

$$\text{Wellenlänge (offen):} \quad \lambda = 2 \cdot L \cdot n \quad (4.2)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur gedackte Pfeifen untersucht, daher werden im Weiteren nur die theoretischen Zusammenhänge für diese Pfeifen betrachtet. Ein prinzipieller Vorteil von gedackten Pfeifen liegt darin, dass der Resonanzraum bei gleicher Frequenz nur die Hälfte des Bauraums beansprucht wie bei offenen Pfeifen, was bei der Anwendung für eine Fernbedienung ein wichtiger Punkt ist. Zudem ist es vorteilhaft, dass der erste Oberton erst bei der dreifachen Frequenz des Grundtons auftritt, dadurch steht ein größerer Frequenzbereich für die Unterscheidung verschiedener Tasten zur Verfügung (siehe Kap. 2.3). Außerdem war es in ersten Versuchen nicht möglich, mit offenen Pfeifen Frequenzen im Ultraschallbereich zu erzeugen.

Mit der Randbedingung Gl. 4.1 für den Grundton und der Gl. 2.1 für die Schallgeschwindigkeit kann ein Zusammenhang zwischen Resonanzraumlänge L und Resonanzfrequenz f der Pfeife hergestellt werden.

$$\text{Frequenz:} \quad f = \frac{c}{4 \cdot L} \quad (4.3)$$

Da die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Luftfeuchtigkeit (vgl. Kap. 2.1) vernachlässigbar gegenüber der Temperaturabhängigkeit ist, wird im Weiteren folgende Näherungsgleichung für c mit der Umgebungstemperatur ΔT in $^{\circ}\text{C}$ [4.1] herangezogen.

$$\text{Schallgeschwindigkeit:} \quad c = 332 \cdot (1 + 0,00166 \cdot \Delta T) \cdot [\text{m/s}] \quad (4.4)$$

Die Frequenz einer Pfeife ist jedoch auch von weiteren Abmessungen wie der Querschnittsfläche des Resonanzraumes und der Aufschnittfläche abhängig, so dass die Frequenz einer Pfeife mit der Gl. 4.3 nicht exakt berechnet werden kann. Die theoretische Frequenz liegt ca. 10 bis 30 % über der in dieser Arbeit maximal gemessenen Frequenz der Pfeifen. Eine gute quantitative Näherung geben die folgenden Formeln nach Ising [4.2], der zusätzlich eine Mündungskorrekturlänge ΔL_M zur Länge des Resonanzraumes addiert:

$$\text{Frequenz:} \quad f_0 = \frac{c}{4 \cdot (L + \Delta L_M)} \quad (4.5)$$

Diese Mündungskorrekturlänge ΔL_M hängt von der Querschnittsfläche des Resonanzraumes S und der Aufschnittfläche S_M folgendermaßen ab:

$$\text{Mündungskorrekturlänge:} \quad \Delta L_M = 0,73 \cdot \frac{S}{\sqrt{S_M}} \quad (4.6)$$

4.2 Druckabhängigkeit der Labialpfeifen

Die Frequenz der Pfeifen hängt neben der Geometrie auch wesentlich vom Ansteuerungsdruck ab. Darüber wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen und theoretische Betrachtungen angestellt, die auf Helmholtz [4.3] und Lord Rayleigh [4.4] zurückgehen. Aber auch aktuelle Forschungsvorhaben befassen sich mit den Zusammenhängen zwischen Ansteuerungsdruck und erzeugter Pfeifenfrequenz.

Einen typischen Verlauf der Frequenzkurve über dem Versorgungsdruck p_F einer Labialpfeife zeigt Abb. 4.3. Diese Kurve weist eine kontinuierlich abnehmende Steigung

mit dem Verlauf einer Wurzelfunktion auf. Die ebenfalls eingezeichnete theoretische Frequenz f_0 liegt ungefähr mittig in dem erzeugbaren Frequenzbereich.

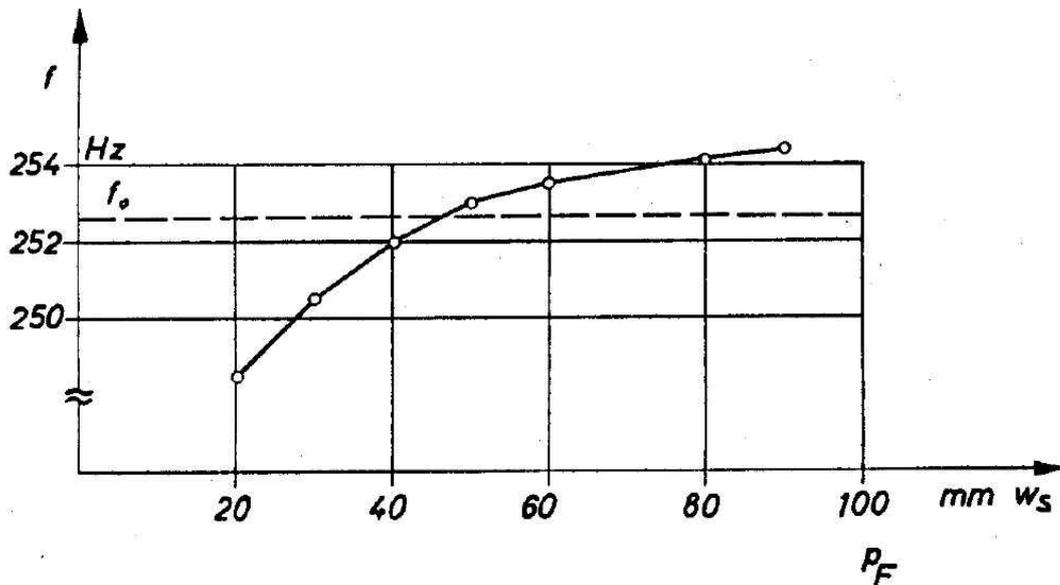


Abb. 4.3: Experimentell ermittelte Frequenz einer Orgelpfeife in Abhängigkeit vom Versorgungsdruck p_F und theoretisch berechnete Frequenz f_0 nach Gl. 4.5 [4.2]

Schallerzeugungsmechanismen

Für die optimale Auslegung von Pfeifen ist eine Untersuchung der Tonentstehungsmechanismen notwendig, die daher im Folgenden erläutert werden sollen [4.2]. Wird durch den Kernspalt Luft in die Pfeife eingeblasen, bildet sich hinter diesem ein Luftstrahl (vgl. Abb. 4.4). An dessen Grenze zur ruhenden Umgebungsluft bilden sich Grenzschichtwirbel, die sich regelmäßig periodisch nach oben und unten abwechselnd ablösen und sich von der Kernspaltöffnung fortbewegen. Der Luftstrahl beginnt zu schwingen und es bildet sich eine so genannte Wirbelstraße. Der dabei entstehende Klang ist jedoch so schwach, dass er selbst bei einer für den Menschen hörbaren Frequenz nicht wahrgenommen werden kann.

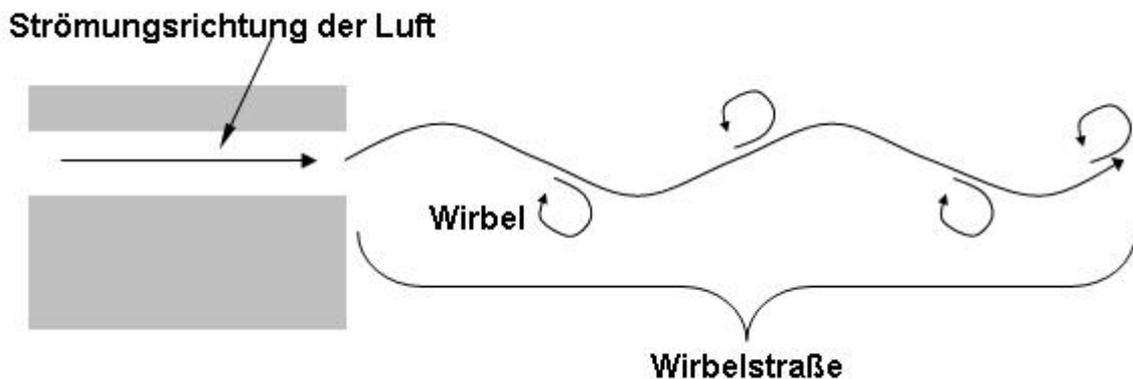


Abb. 4.4: Spaltströmung durch den Kernspalt erzeugt eine Wirbelstraße

Dieser Luftstrahl trifft auf das Labium, welches den vom Kernspalt erzeugten oszillierenden Luftstrom in Wirbelpakete teilt, die abwechselnd oberhalb und unterhalb des Labiums entlang ziehen (Abb. 4.5 und Abb. 4.7).

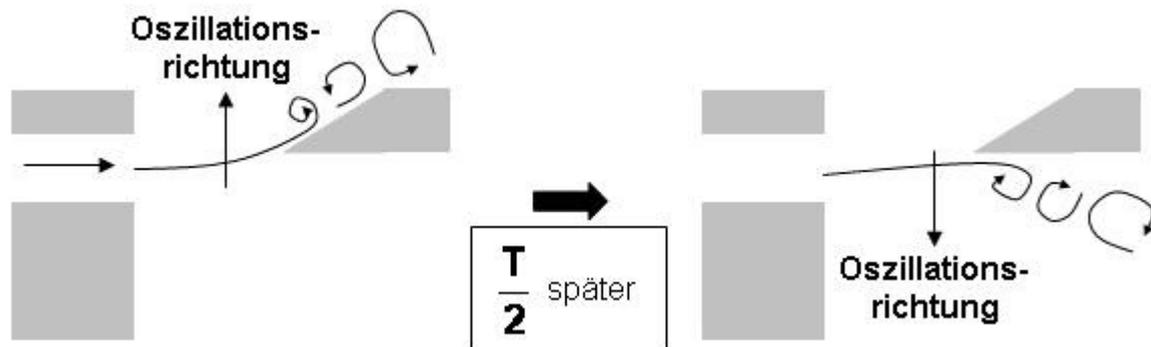


Abb. 4.5: Spaltströmung wird durch das Labium zur Oszillation angeregt

Die Frequenz dieser Oszillationsbewegung hängt von der Geschwindigkeit des Luftstrahls und der Aufschnittlänge w ab. Dieser Schneidenton ist schwach detektierbar.

Die Frequenz des Schneidentons ergibt sich nach [4.5] mit der maximalen Geschwindigkeit des aus dem Kernspalt austretenden Strahls U_0 und dem Abstand zwischen Kernspalt und Labium w nach experimentellen Untersuchungen zu:

Schneidentonfrequenz:
$$f_S = 0,3 \cdot \frac{U_0}{w} \quad (4.7)$$

Der durch Kernspalt und Labium in Schwingung versetzte Luftstrahl erzeugt durch die periodische Luftzufuhr in den Resonanzraum eine stehende Druckwelle. Dabei herrscht am Aufschnitt der Umgebungsdruck und ein Geschwindigkeitsmaximum und am Resonanzraumende ein Druckunterschiedsmaximum und ein Geschwindigkeitsminimum (vgl. Abb. 4.6).

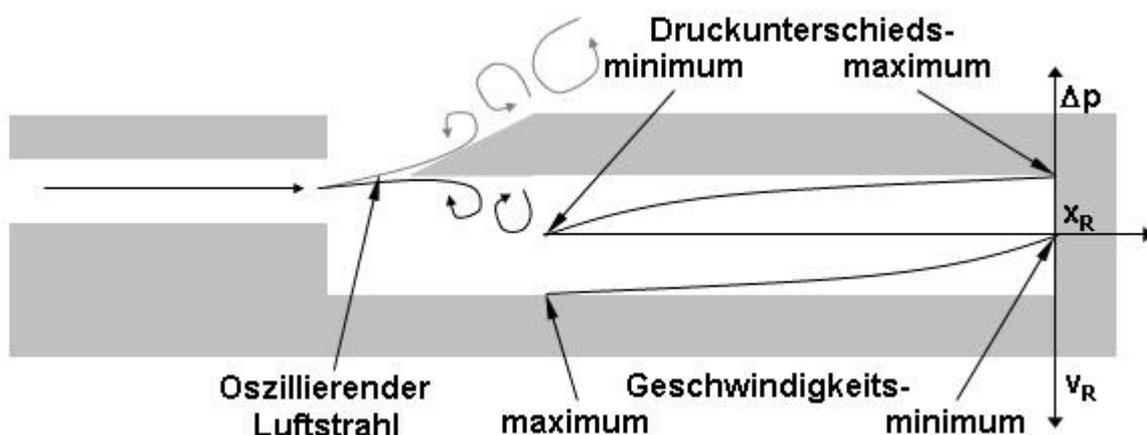


Abb. 4.6: Rückwirkung oszillierender Luftstrahl mit dem Resonanzraum

In Abb. 4.7 ist eine Schwingungsperiode eines pendelnden Strahls im Aufschnitt einer Orgelpfeife durch 10 Aufnahmen visualisiert.

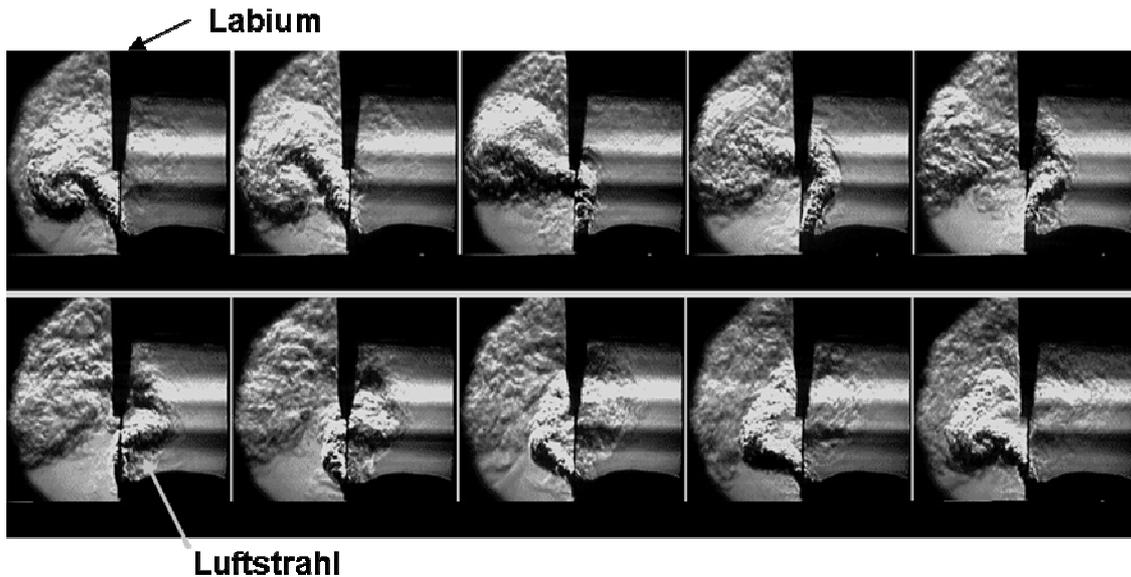


Abb. 4.7: Aufnahmen einer Schwingungsperiode eines Luftstrahls im Aufschnitt einer Orgelpfeife [4.6]

Der Pfeifenmechanismus besteht grundsätzlich aus zwei zeitlich versetzten Schwingungen, die im Aufschnitt aufeinander treffen. Die eine Schwingung wird durch den pendelnden Luftstrahl am Labium (Schneidenton) erzeugt, die andere Schwingung besteht aus der stehenden Welle im Resonanzraum der Pfeife. Zum besseren Verständnis der Wechselwirkung zwischen diesen Schwingungen dienen die in Abb. 4.8 dargestellten Grenzfälle.

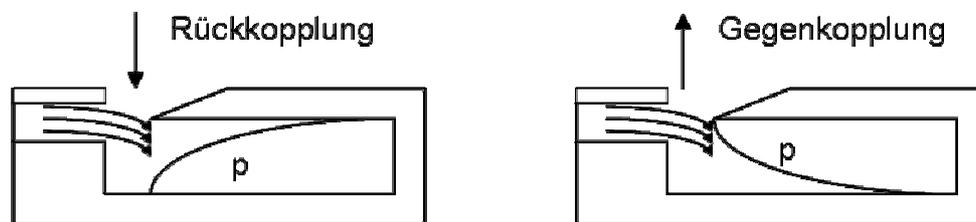


Abb. 4.8: Grenzfälle der Kopplung von Resonanzraum und Schneidenton

In dem ersten Fall ist der Luftstrahl des Schneidentons in die Pfeife gerichtet und der Druck der stehenden Welle ist in diesem Moment gerade minimal, wodurch eine Rückkopplung entsteht, die zu einer Verstärkung des Pfeifentons führt. In diesem Zustand sind die beiden Schwingungen gerade um ein Viertel der Periodendauer verschoben [4.2]. Bei einer größeren Verschiebung kann es zu einer Gegenkopplung kommen, sodass die Bewegung der Luftteilchen im Resonator dem pendelnden Strahl entgegenwirkt, woraus eine Abschwächung des Strahls resultiert und der Klang zum Erliegen kommt. Beim Bau von Orgelpfeifen ist der technisch optimale Betriebspunkt der Rückkopplung nicht anzustreben, da es bei Orgelpfeifen wie bei sämtlichen Musikinstrumenten auf den aus Grundton und Obertönen erzeugten Klang und nicht auf die energieeffiziente Erzeugung eines möglichst reinen Grundtons ankommt.

Für die Anwendung von Pfeifen in einer Fernbedienung sind hingegen die folgenden 3 Aspekte des optimalen Betriebspunktes interessant [4.2]:

- Maximale Amplitude des Grundtones (Abb. 4.9)
- Geringste Amplitude der Obertöne
- Schnellstes Ansprechverhalten der Pfeife

Um die Pfeifen optimal auslegen zu können, ist die Frequenz des Schneidentons f_s zu bestimmen. Bei der optimalen Ansteuerung einer Pfeife stimmen die Resonanzfrequenz f_0 und die Schneidentonfrequenz f_s überein. Da die Pfeifen bei der Betätigung einer Fernbedienung den gleichen mittleren Ansteuerungsdruck und bei gleichem Kernspaltquerschnitt auch die gleiche Ansteuerungsgeschwindigkeit v_0 haben, kann die Schneidentonfrequenz am einfachsten nach Gl. 4.7 über die Aufschnittlänge w der Resonanzfrequenz angepasst werden.

Eine andere Möglichkeit der optimalen Anpassung kann über die Intonationszahl I vorgenommen werden. Dies ist eine dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung des Schwingungszustandes einer Pfeife, die für den optimalen Betriebspunkt $I = 2$ beträgt. Anschließend müssen bei gegebenem v_0 die Parameter Kernspaltweite h_0 und Aufschnitthöhe e der Frequenz f angepasst werden.

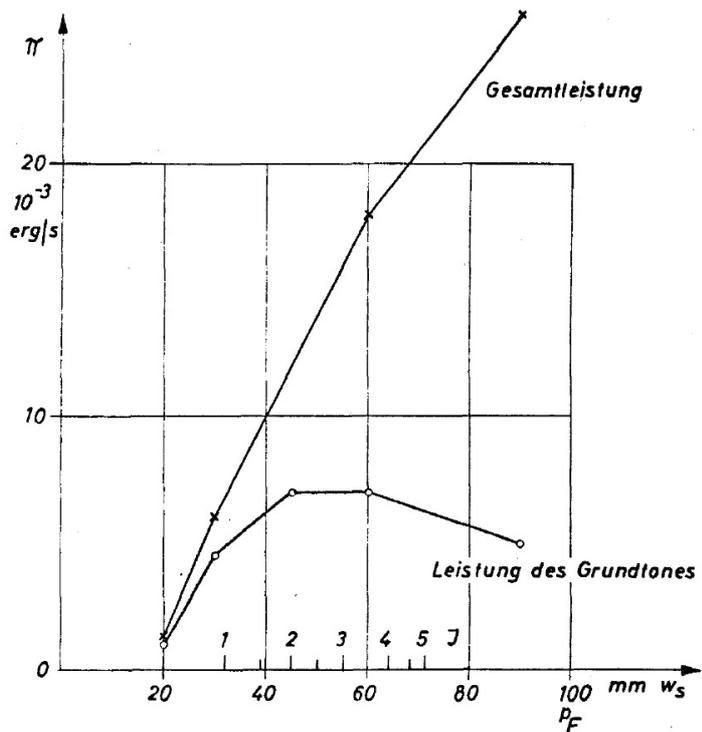


Abb. 4.9: Experimentell ermittelte Gesamtleistung und Leistung des Grundtones in Abhängigkeit vom Ansteuerungsdruck p_F

Anschließend müssen bei gegebenem v_0 die Parameter Kernspaltweite h_0 und Aufschnitthöhe e der Frequenz f angepasst werden.

Intonationszahl:
$$I = \frac{v_0 \cdot \sqrt{h_0}}{f \cdot e^{1.5}} \quad (4.8)$$

Um den Klang einer Orgelpfeife anzupassen, gibt es 42 verschiedene Parameter, die variiert werden können, sodass es eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt, Pfeifen nach ihrer Anwendung zu optimieren. Für Fernbedienungen ist es wichtig, Ultraschallpfeifen so auszulegen und herzustellen, dass diese unterschiedliche und reproduzierbare Frequenzen über einen gewissen Frequenzbereich liefern und auch bei manueller Betätigung einer Taste ein auswertbares Signal liefern. Die theoretischen Zusammenhänge zwischen Resonanzfrequenz und Schneidentonfrequenz und die Intonationszahl sollen hier prinzipielle Möglichkeiten zur Planung und Auslegung eines vollständigen Satzes Ultraschallpfeifen geben, der zur Realisierung einer Tastatur notwendig ist.

4.3 Ultraschallerzeugung mit Pfeifen

Die ältesten Instrumente zur Erzeugung von Ultraschall sind pneumatisch betätigte Galtonpfeifen (Abb. 4.10 links).

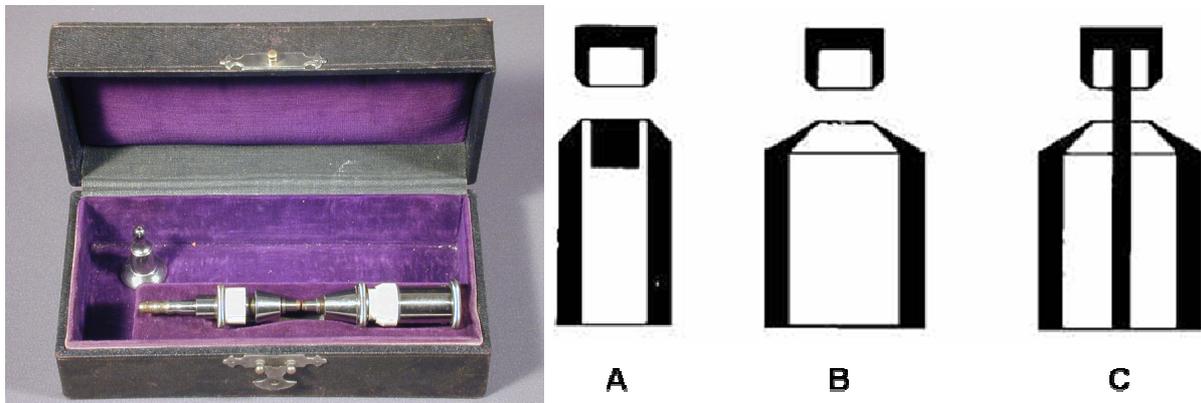


Abb. 4.10: Bild einer Galtonpfeife [4.7] und Schema der pneumatischen Ultraschallerzeugung nach Galton (A), Hartmann (B) und Yellot-Savory (C)

Dabei wird wie bei den Labialpfeifen eine Schneide von einem Luftstrom angesteuert und durch die Länge eines dahinter gelegenen Resonanzraums die Frequenz festgelegt. In Abb. 4.10 sind noch die vergleichbaren Prinzipien von Ultraschallgeneratoren nach Hartmann (B) und Yellot-Savory (C) dargestellt. Wegen des aufwändigen Aufbaus dieser Generatoren erschien die Fertigung von Ultraschallpfeifen nach dem prinzipiellen Aufbau von Orgelpfeifen einfacher, weshalb diese Variante umgesetzt wurde.

5 Fertigung von Ultraschallpfeifen

Für die Herstellung der Ultraschallpfeifen wurden das CNC-Fräsen, Gesenkerodieren, Kleben und das Ultraschallschweißen bzw. -heißprägen untersucht. Als Materialien wurden neben Messing die Kunststoffe Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyvinylchlorid (PVC) und beim Ultraschallheißprägen und -schweißen Polypropylenfolien (PP) verwendet. Die für die Luftansteuerung genutzten Bälge wurden mit Hilfe gefräster PMMA-Formen aus Silikon gegossen. Um Ultraschallpfeifen mit unterschiedlichen Frequenzen zu erzeugen, wurde hauptsächlich die Länge des Resonanzraums variiert.

5.1 Gesenkerodierte Messingpfeifen

Nachdem die ersten Ultraschallpfeifen erfolgreich in Handarbeit durch Feilen, Sägen und Kleben aus Messing hergestellt wurden, kam als erste maschinelle Fertigungsverfahren das Gesenkerodieren zum Einsatz. Ultraschallpfeifen aus Messing wurden aus drei Einzelteilen (Abb. 5.1) gefertigt, die mit dem Cyanacrylat-Klebstoff Loctite gefügt wurden. Als Oberteil der Pfeife wurde durch Gesenkerodieren im Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen (IFAS) der RWTH Aachen in ein rechteckiges U-Profil der Kernspalt eingebracht, wodurch das für diese Pfeifen

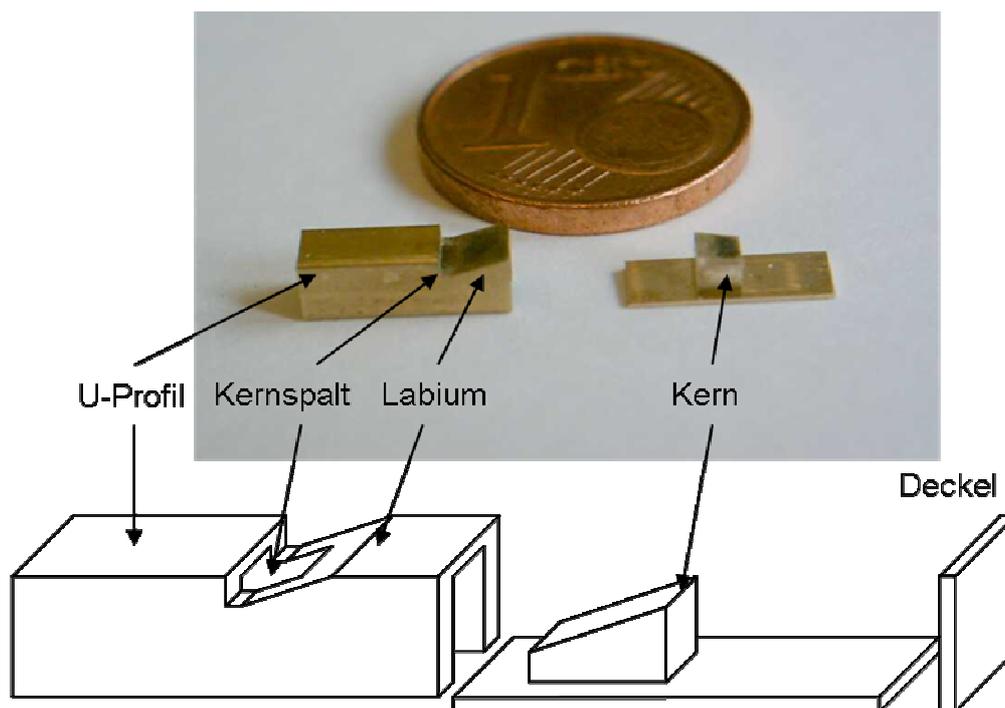


Abb. 5.1: Messingpfeifen mit Gesenkerodieren hergestellt

charakteristische Labium mit einer scharfen Kante zur Ausbildung des Schneidentons entstand. Der untere Teil besteht aus einer Platte zum Verschließen der Pfeife und einem Kern, der den eintretenden Luftstrom auf das Labium lenkt und durch die Querschnittsverengung für eine hohe Anströmungsgeschwindigkeit sorgt, die für einen stabilen Schneidenton notwendig ist. Der Kern wurde gefräst und dessen Abschrägung nachträglich mit dem vorher beim Kernspalt genutzten Erodierwerkzeug erzeugt. Durch Verwendung unterschiedlich langer U-Profile konnte die Länge der Pfeifen einfach verändert werden. Gesenkerodieren ist allerdings eine kostenintensive Herstellungsmethode, die nicht für die Massenproduktion geeignet ist.

5.2 Gefräste Ultraschallpfeifen aus PMMA

Mit einer wesentlich einfacheren Methode wurden im Anschluss bei KE μ Ultraschallpfeifen direkt mit einer CNC-Fräse aus PMMA gefertigt. Für jede Pfeife wurden zwei Komponenten (Abb. 5.2) anhand von 2D-Fertigungszeichnungen gefräst und anschließend miteinander verklebt.

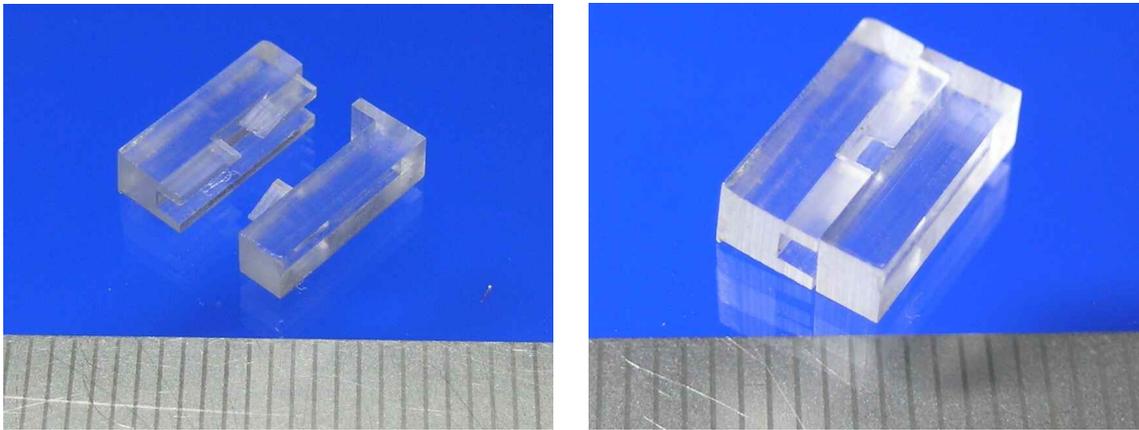


Abb. 5.2: Aus zwei PMMA-Teilen gefertigte Ultraschallpfeife mit einer Gesamtlänge von 10 mm.

Durch dieses Fertigungsverfahren ist eine einfache Variation sämtlicher Abmessungen möglich, wobei durch den minimalen nutzbaren Fräserdurchmesser ($d_{F,min} = 0,5 \text{ mm}$) auch die minimale Aufschnittbreite und Höhe der Pfeife bestimmt wird.

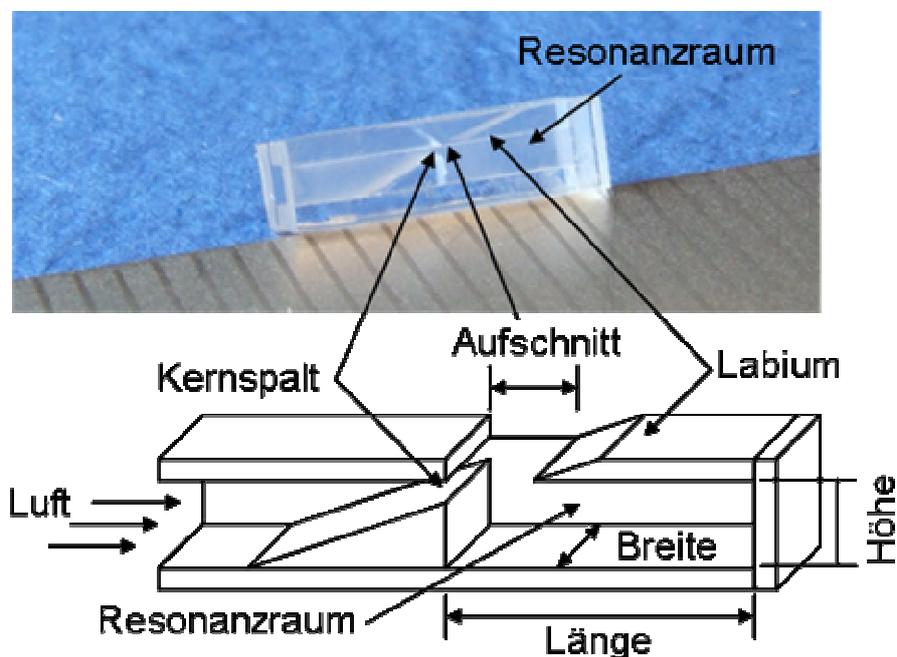


Abb. 5.3: Schema und Bild einer gefrästen Ultraschallpfeife aus PMMA

Bei dieser Herstellungsvariante entstand eine hohe Ausschussrate der Pfeifen von etwa einem Drittel. In Abb. 5.4 ist gut zu erkennen, dass die Labiumkante durch den Fräser eine starke Rauigkeit (links) oder sogar ausgebrochene Kanten (rechts) aufweist, was für die Klangentstehung von großem Nachteil ist. Ultraschallpfeifen,

deren Labien gerade, gut gefertigte Kanten aufwiesen, haben bei der Klangerzeugung über ein weites Frequenzband gute Ergebnisse geliefert.

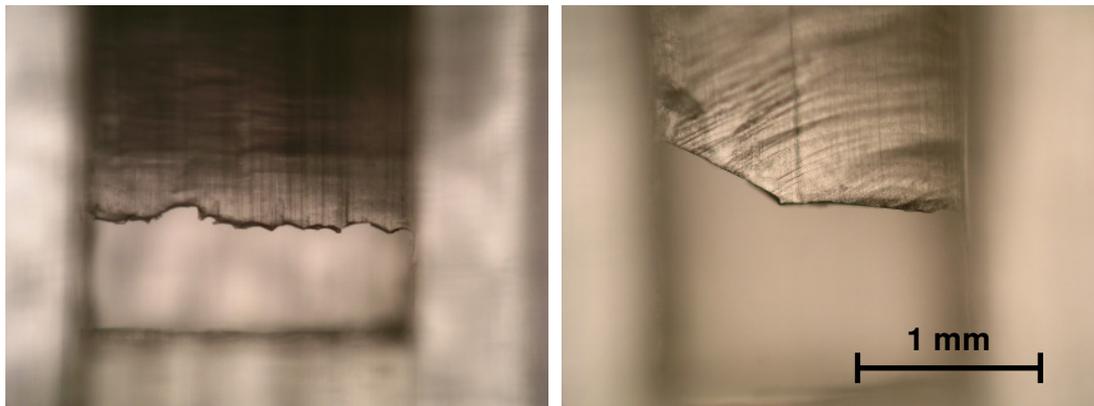


Abb. 5.4: Fräskante des Labiums von zwei Ultraschallpfeifen aus PMMA

Zudem ist das Fräsen für die Fertigung größerer Stückzahlen aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands von ca. $T_F = 10 \text{ min/Stk.}$ ungeeignet für eine Massenproduktion.

Als weitere Variante (Abb. 5.5) wurden 8 Ultraschallpfeifen in eine Platte gefräst, um zu zeigen, wie viele Pfeifen in eine einzelne PC-Taste integriert werden können.

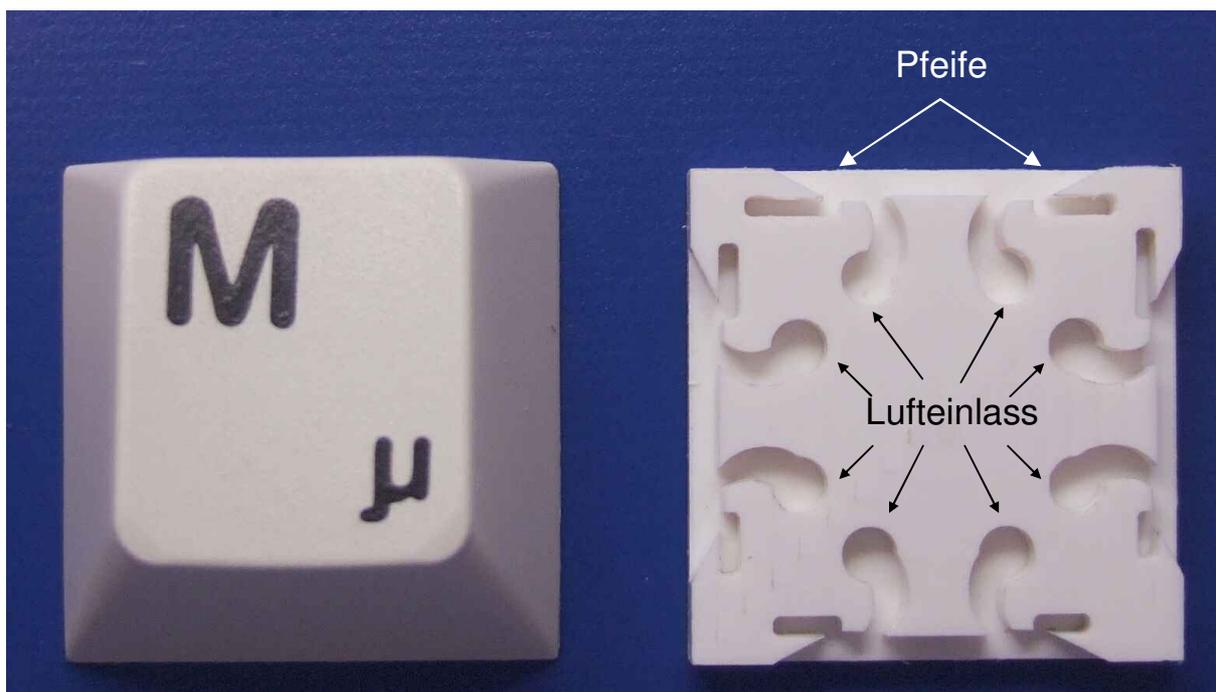


Abb. 5.5: 8 Mikropfeifen aus PVC, die unter einer Taste Platz finden. Über den Pfeifen wurde noch eine Platte mit Zuführungslöchern angebracht, die die Pfeifen nach oben hin verschließt.

5.3 Gefräste Platten mit 10 integrierten Pfeifen aus PMMA

Anhand von Messungen an Mikropfeifen (Kap. 6), die mit den oben genannten Verfahren hergestellt wurden und den Einfluss von Breite, Höhe und Aufschnitt auf die Frequenz zeigten, wurden diese Parameter auf die folgenden für günstig erachteten Werte festgelegt: Aufschnittlänge $A_L = 1,5 \text{ mm}$, Resonanzraumhöhe $H = 0,75 \text{ mm}$,

Resonanzraumbreite $B = 1,5 \text{ mm}$. Die gewünschte Frequenz der Mikropfeifen wurde anschließend durch eine einfache Längenvariation der Resonanzräume erreicht. Für 10 verschiedene Pfeifen wurden für weitere Untersuchungen Resonanzräume, Kernspalte und jeweils ein Reservoir für die Luftzufuhr in eine PMMA-Platte gefräst (Abb. 5.6). Für die Versuche wurden alle Pfeifen durch Auflegen desselben Deckels mit Aufschnitt und Luftzufuhr verschlossen. Dabei zeigte sich, dass der Aufschnitt am besten mittig über der Resonanzraumkante positioniert sein sollte, um einen möglichst lauten und reinen Klang zu erhalten.

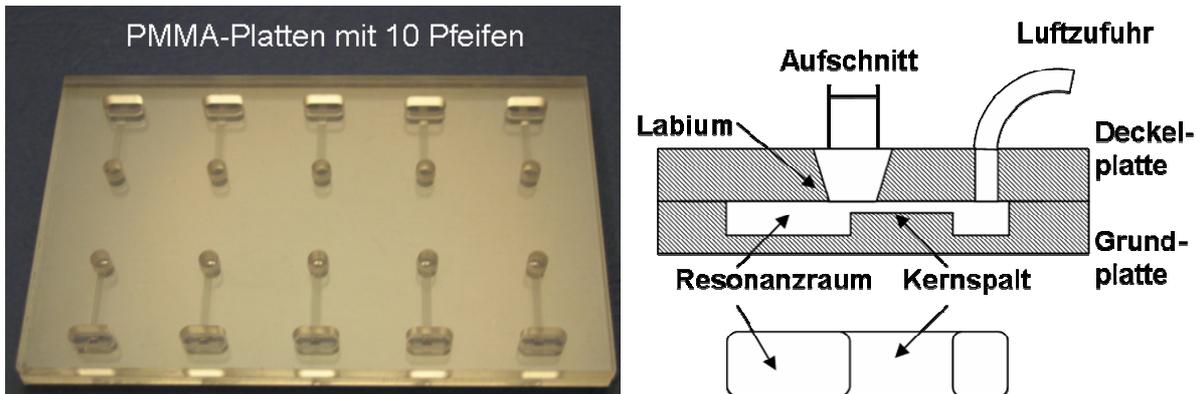


Abb. 5.6: PMMA-Platte mit 10 integrierten Mikropfeifen (links) und (rechts) schematische Zeichnung des Querschnittes einer dieser Pfeifen mit aufgelegter Deckelplatte und Aufsicht auf die in die PMMA-Platte eingefräste Mikrostruktur

In der schematischen Darstellung (Abb. 5.6 rechts) und der Mikroskopaufnahme (Abb. 5.7) sind Abrundungen der Resonanzraumecken zu erkennen, die bei der Fertigung durch den endlichen Durchmesser des Fräsers entstehen. Bei den Pfeifen aus Abb. 5.2 wurde besonders darauf geachtet, diese Abrundungen zu vermeiden, was zu anderen Nachteilen wie den schlecht gefertigten Labien (Abb. 5.4) führte. Dieses konnte dagegen bei den Pfeifen der PMMA-Platten sehr glatt und parallel gefertigt werden, da hier nur eine gerade Bahn gefräst werden musste (Abb. 5.7).

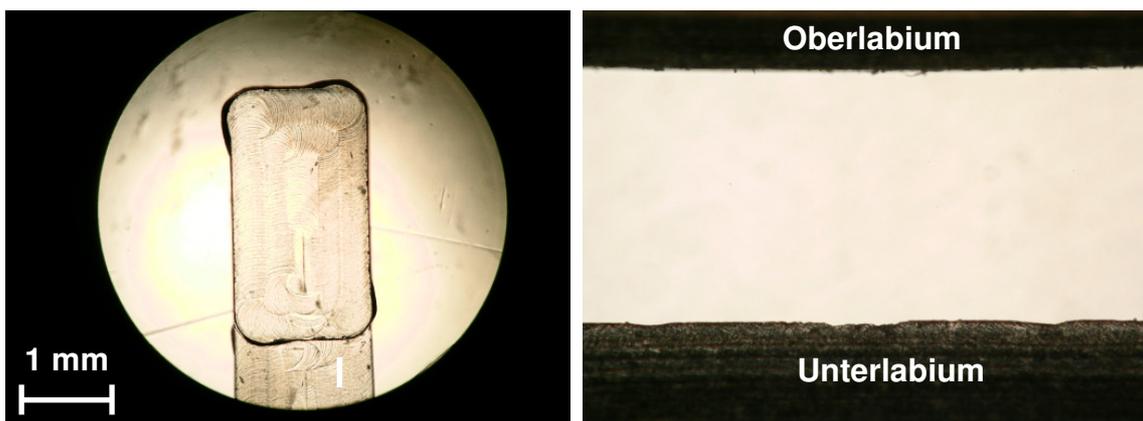


Abb. 5.7: Mikroskopaufnahme von Resonanzraum (links) und Labium (rechts)

Diese Pfeifenvariante diente als Zwischenschritt zum Ultraschallheißprägen und -verschweißen von Ultraschallpfeifen aus PP-Folien, da ihre vereinfachte Struktur mit diesem bei KEmikro neu entwickelten Verfahren hergestellt werden kann.

5.4 Ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen aus PP-Folien

Mit Hilfe des Ultraschallschweißens und -heißprägens lassen sich viele Polymere fügen oder Strukturen in ihnen erzeugen [5.1]. Bei diesem Verfahren wird durch Ultraschallschwingungen Reibungswärme erzeugt, durch die der Werkstoff örtlich gezielt erwärmt werden kann und sich dort der Form eines Werkzeugs anpasst.

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Ultraschallpfeifen dienten Polypropylen-Folien mit 150 bzw. 250 μm Dicke. Um aus diesen Folien Ultraschallpfeifen herzustellen, ist das Verschweißen mehrerer Schichten notwendig. Benötigt werden ein Hohlraum für Luftzufuhr, Kernspalt und Resonanzraum sowie ein Deckel mit Öffnung für die Luftzufuhr und Aufschnitt für die Schallabstrahlung.

Für die Serienfertigung von Ultraschallpfeifen wurden Werkzeuge aus Aluminium gefräst, die in den Abbildungen 5.8 und 5.9 zu sehen sind. Für ein flächiges Verschweißen zweier Folien ist es notwendig, auf einer der Folien so genannte Energiedirektoren in geringem Abstand zueinander zu erzeugen. Energiedirektoren sind feine Strukturen, deren Oberseite mit dem zu verschweißenden Werkstück in Kontakt kommt. Durch die geringe Kontaktfläche wird die beim Ultraschallschweißen eingebrachte Energie auf die Energiedirektoren konzentriert, diese schmelzen auf und schließen den Hohlraum zwischen den beiden Füge-teilen wie ein Klebstoff.

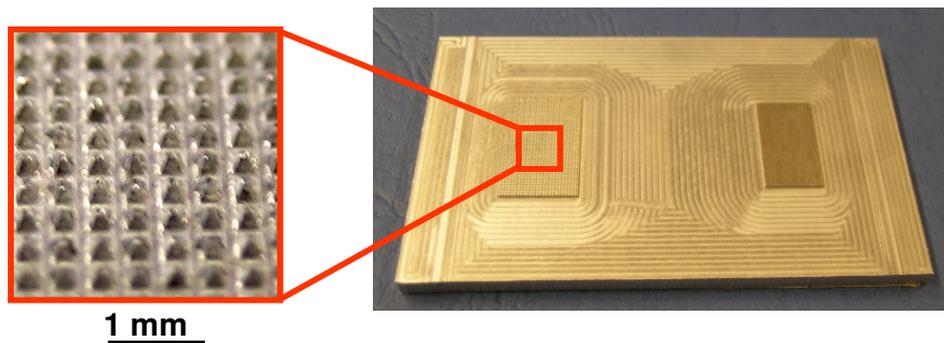


Abb. 5.8: Aluminiumplatte mit dem Werkzeug 1 mit Pyramidenstruktur (links) und Werkzeug 3 für das Verschweißen des Deckels (rechts)

Mit dem Werkzeug in Abb. 5.8 links wurden die Energiedirektoren hergestellt. Auf der Oberfläche des Werkzeugs wurden pyramidenförmige Strukturen eingefräst. Breite und Höhe der Pyramiden betragen jeweils 350 μm , der Abstand zwischen den Spitzen beträgt 500 μm . Ein glattes Werkzeug zum Aufschweißen des Deckels ist in Abb. 5.8 rechts abgebildet.

Zunächst sollten 15 unterschiedliche und unterscheidbare Pfeifenkombinationen gefertigt werden. Da eine gleichzeitige Ansteuerung der Pfeifen am einfachsten zu realisieren war, mussten nach Gl. 2.13 für sechs Pfeifen mit unterschiedlichen Frequenzen jeweils ein Werkzeug hergestellt werden wie in Abb. 5.9. Dafür wurden Werkzeuge mit sechs unterschiedlichen Resonanzraum-längen hergestellt. Die Breite der Pfeifen beträgt jeweils 1,5 mm, die Höhe des Resonanzraums 0,7 mm, die Höhe des Kernspalts 0,2 mm und die Breite des Kernspalts 1,5 mm.

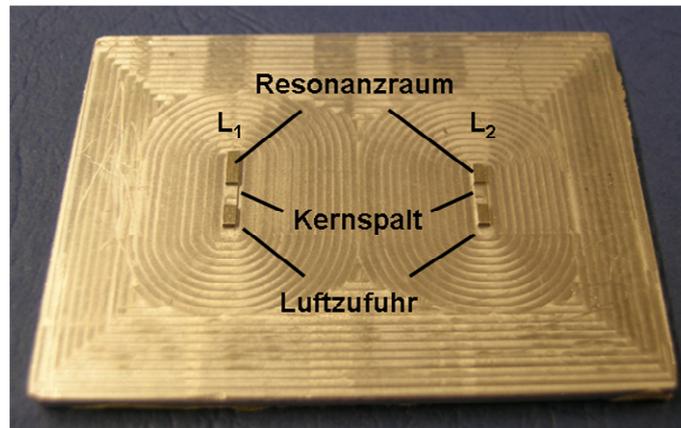


Abb. 5.9: Aluminiumplatte mit den Werkzeugen 1 und 2 zum Einprägen der Luftkanäle, der Kernspalte und der Resonanzräume mit den Längen L_1 und L_2

Die Herstellung der Ultraschallpfeifen aus Polypropylenfolien (PP) mit dem Ultraschallschweißverfahren erfolgte in 3 Arbeitsschritten:

- Verschweißen einer 150 μm mit einer 250 μm dicken Folie und Herstellung einer Pyramidenstruktur auf der Oberfläche (Ergebnis in Abb. 5.11 links)
- Aufbringen zweier weiterer Folien von 250 μm Stärke und Einprägen von Luftkanal und Resonanzraum (Ergebnis in Abb. 5.11 mittig)
- Aufschweißen der 150 μm starken Deckelfolie, aus der zuvor die Öffnungen für Luftversorgung und der Aufschnitt mit Hilfe eines Stanzwerkzeugs ausgestanzt wurden (Deckelfolie mit ausgestanzten Öffnungen Abb. 5.11 rechts)

Abb. 5.10 zeigt die Ultraschallschweißmaschine und eine schematische Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte und der Zwischenerzeugnisse der Fertigungsstufen.

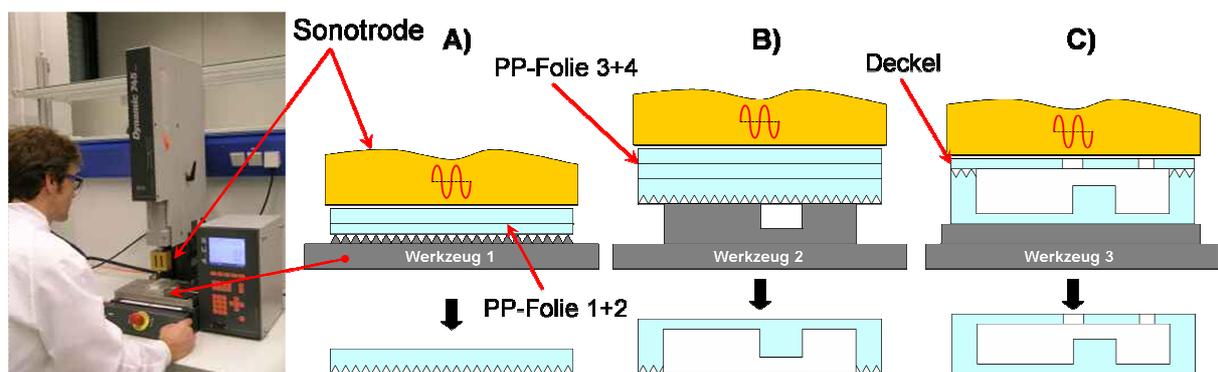


Abb. 5.10: Fertigungsschritte beim Ultraschallschweißen der Ultraschallpfeifen

Für die einzelnen Fertigungsschritte wurden die PP-Folien mit Klebeband auf den Werkzeugen fixiert. Der Deckel mit den ausgestanzten Öffnungen wurde mit Augenmaß auf dem Hohlraum positioniert, so dass der Aufschnitt mittig über dem Übergang des Kernspalts in den Resonanzraum lag.

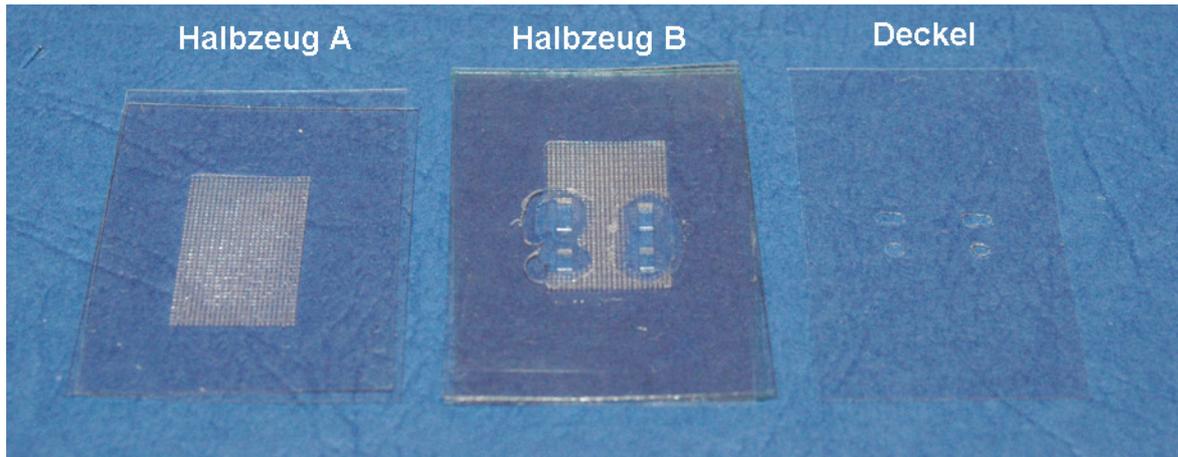


Abb. 5.11: Zwischenerzeugnisse bei der Herstellung von Ultraschallpfeifen

Um zwei Pfeifen nebeneinander herzustellen, wurden zunächst für eine Pfeife die Bearbeitungsschritte A und B ausgeführt. Neben der entstandenen Struktur wurde anschließend die Position der zweiten Pfeife angezeichnet, die Folie entsprechend auf dem Werkzeug fixiert und die Struktur der zweiten Pfeife geprägt. Anschließend wurde der Deckel mit den Öffnungen für beide Pfeifen aufgeschweißt.

In Abb. 5.12 ist ein Schnitt durch einen Resonanzraum gezeigt, in dem die 5 einzelnen PP-Folien der Fertigungsschritte zu erkennen sind. Der Resonanzraum hat einen leicht konischen Querschnitt, was auf die Verformung der Struktur beim Aufschweißen des Deckels zurückgeführt werden kann.

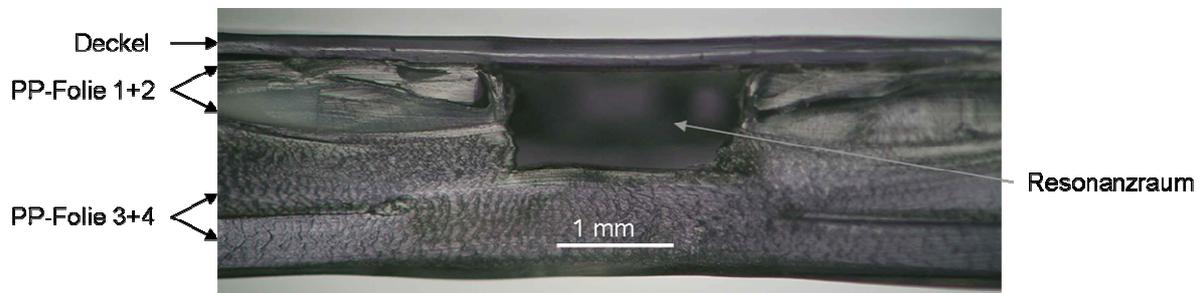


Abb. 5.12: Mikroskopaufnahme eines Schnitts durch den Resonanzraum einer heißgeprägten Pfeife aus fünf PP-Folien

Im Rahmen einer Diplomarbeit ist es gelungen, die Voraussetzungen für die Herstellung einer kodierten Ultraschallfernbedienung zu schaffen und einen Prototyp mit 15 Signalen herzustellen [5.2]. Ein Signal wurde durch eine Kombination von zwei unterschiedlichen Pfeifen erreicht, die über Silikonbälge mit Luft angesteuert wurden. Dadurch konnte ein kabel- und batterieloser Ziffernblock realisiert werden (5.13).

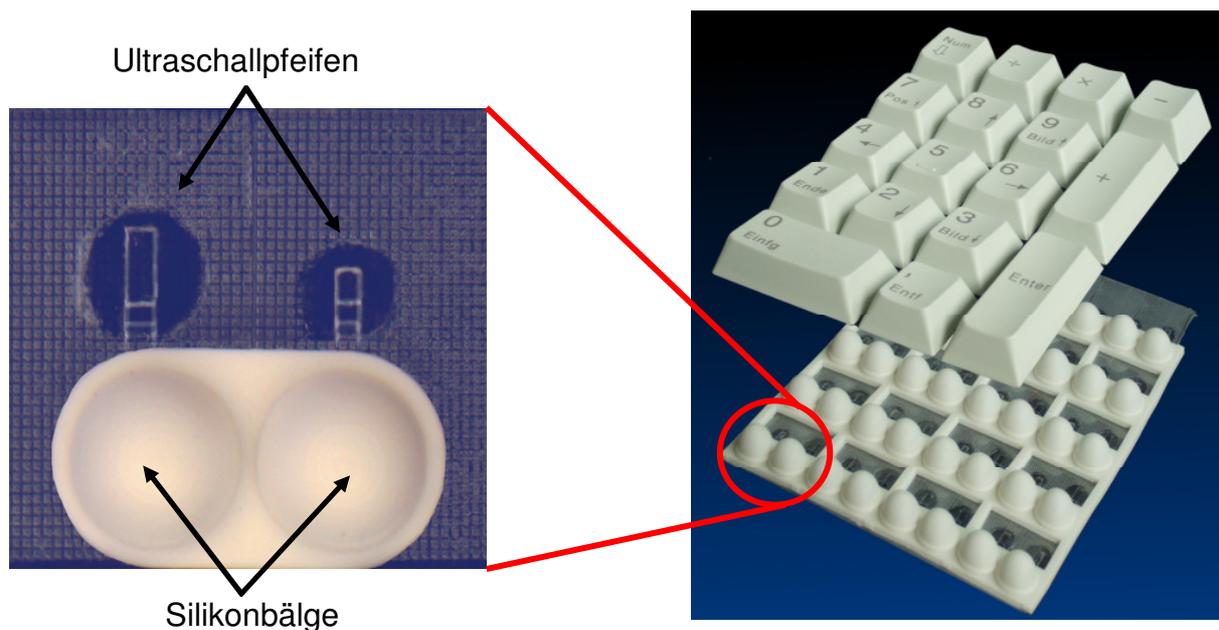


Abb. 5.13: Einzelner Ultraschallsignalgeber (links) und zusammenhängende Platte mit Signalgebern für die Verwendung in einem kabel- und batterielosen Ziffernblock

5.5 Ansteuerung der Ultraschallpfeifen

Zur Erzeugung eines Klangs mit einer Ultraschallpfeife wird ein Luftstrom mit einer bestimmten minimalen Strömungsgeschwindigkeit benötigt. Um diesen ausschließlich durch mechanische Energie zu erzeugen, eignen sich elastische Bälge, die zudem durch Silikonguss einfach herzustellen sind.

5.5.1 Luftversorgung durch elastische Bälge

Durch mechanische Betätigung wird der Balg elastisch verformt, die Luft im Inneren wird komprimiert und strömt durch den Aufschnitt der Pfeife nach außen. Nach der Betätigung nimmt der Balg seine ursprüngliche Form an, wobei durch den entstehenden Unterdruck Luft durch den Aufschnitt der Pfeife in den Balg angesaugt wird ohne dass ein Klang entsteht.

Verschiedene Varianten elastischer Bälge unterschiedlicher Abmessungen, Geometrien und Wandstärken wurden auf ihre Eignung zur Signalerzeugung untersucht. Bei der Gestaltung der Bälge wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

- ausreichender Luftvolumenstrom für die Signalerzeugung bei möglichst geringem Bauraum
- Betätigungskraft und Hub der Bälge angepasst an die Bedienung einer PC-Tastatur

In vielen Modellen handelsüblicher Tastaturen befinden sich zur Federung und Rückstellung der Tasten Zwischenstücke aus Silikon, die als Grundlage für den Entwurf der Bälge dienen. Die für die Luftversorgung der Mikropfeifen verwendeten Bälge sollen neben der Luftversorgung der Pfeifen auch die Funktion der Federung und Rückstellung der Tasten sowie die Kodierung der Signale übernehmen.

5.5.2 Herstellung der Bälge

Die zur Ansteuerung benötigten Bälge wurden aus Gießsilikon hergestellt, das mit einem Härter gemischt und in zweiteilige, gefräste Gussformen aus PMMA eingefüllt wurde. Nach einer Aushärtungszeit von mindestens drei Stunden ist das Silikon vollständig vernetzt und kann aus der Form entnommen werden. Die Abb. 5.14 zeigt eine Gussform, mit der vierzig, paarweise angeordnete Bälge in einem Arbeitsschritt hergestellt werden können. Auf der linken Seite befindet sich das Unterteil der Form mit den fertigen Bälgen, auf der rechten Seite das Oberteil der Form. Durch vier Zentrierstifte mit entsprechenden Bohrungen wird ein Verrutschen der Form verhindert, was zu ungleichmäßigen Wandstärken führen würde.

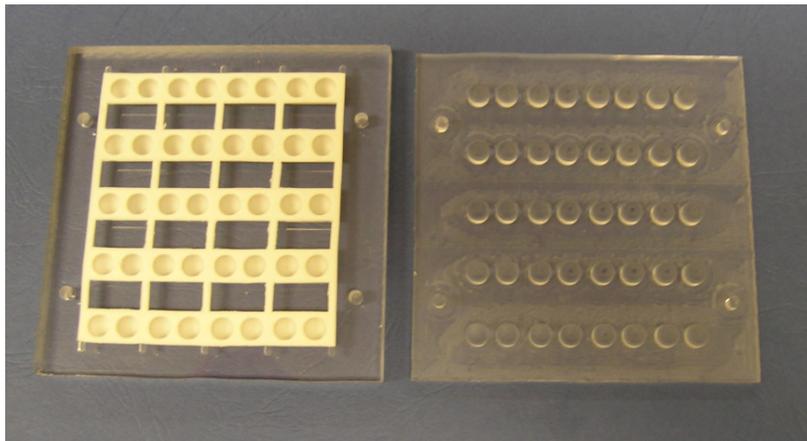


Abb. 5.14: Gussform aus PMMA mit fertigen Silikonbälgen für den Demonstrator in Form eines Ziffernblocks (Abb. 5.13)

5.5.3 Betätigung der Bälge

Die für die Luftversorgung der Pfeifen angefertigten Silikonbälge können direkt durch Druck mit der Fingerkuppe zusammengedrückt werden. Bei zwei Varianten der hergestellten Signalgeber müssen für die Erzeugung eines Signals zwei Bälge betätigt werden (Variante 2 und 5). Deshalb wurde eine Vorrichtung verwendet, bei der durch einen Tastendruck beide Bälge komprimiert werden. Dazu diente eine Taste aus einer PC-Tastatur, in die ein T-förmiges Zwischenstück eingesetzt wurde, das die beiden halbkugelförmigen Bälge bei Druck auf die Taste zusammendrückt (Abb. 5.15).

Ein weiterer Vorteil bei Verwendung einer Taste ist die integrierte Führung, die sicherstellt, dass die Silikonbälge bei jeder Betätigung senkrecht und mittig zusammengedrückt werden.

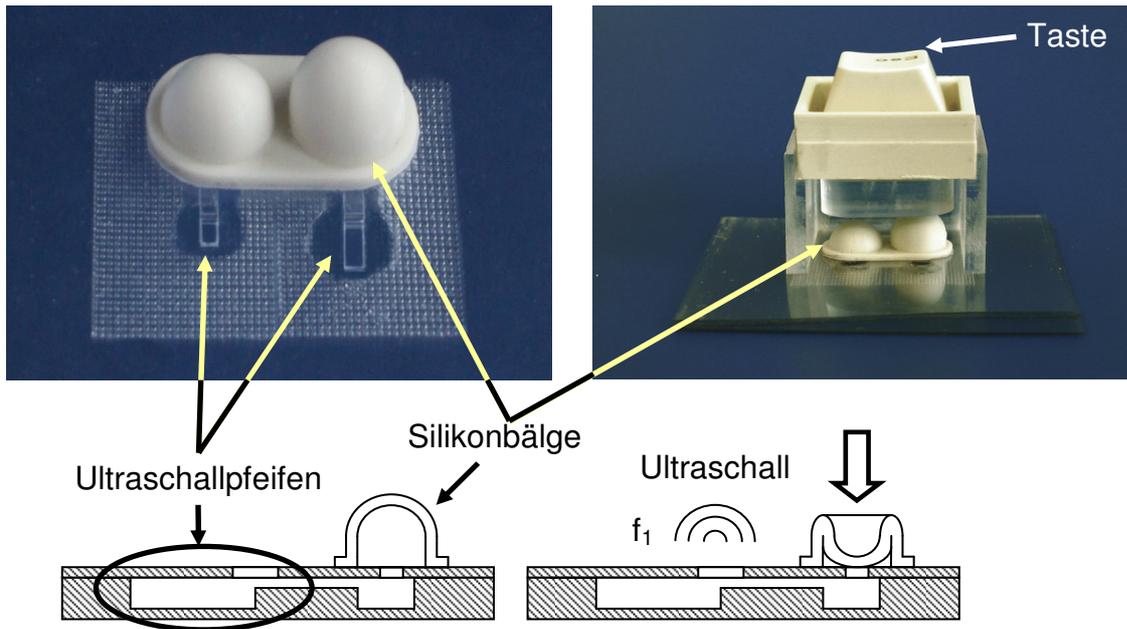


Abb. 5.15: Zwei Ultraschallpfeifen unterschiedlicher Frequenz mit verschieden hohen Bälgen, die mit einer Taste nacheinander betätigt werden

5.6 Technische Umsetzung der Kodierung durch unterschiedliche Kombinationen von Ultraschallpfeifen und Silikonbälgen

Die Erzeugung eines Signals, das aus mehreren Frequenzen besteht, die gleichzeitig gesendet werden, kann ohne zusätzliche Komponenten über gleichzeitige Ansteuerung mehrerer Ultraschallpfeifen mit einem gemeinsamen Balg oder getrennten Bälgen erfolgen, wie in Abb. 5.16 schematisch dargestellt.

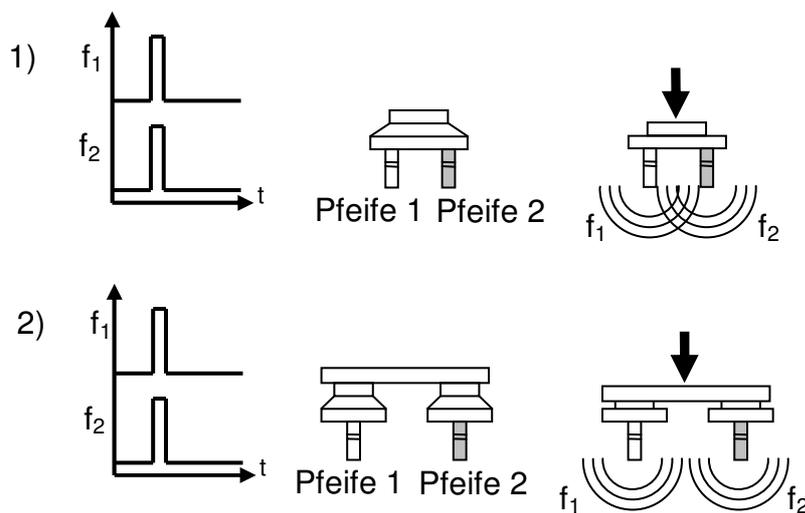


Abb. 5.16: Kodierung durch Kombination von zwei Frequenzen (Variante A)

Die Erzeugung mit einer zeitlichen Unterbrechung des Signals kann durch Bälge mit verschiedenen Zonen oder durch Verwendung unterschiedlich großer Bälge mit mehreren Pfeifen erfolgen. Entsprechende Kombinationen aus Ultraschallpfeifen und Bälgen sind in Abb. 5.17 dargestellt. Bei der Variante 3 wird ein Balg mit zwei Zonen in

zwei Schritten zusammengedrückt, wobei zwischen den Schritten durch das Aufsetzen des Balges eine Pause entsteht (siehe Abb. 6.15 auf Seite 55).

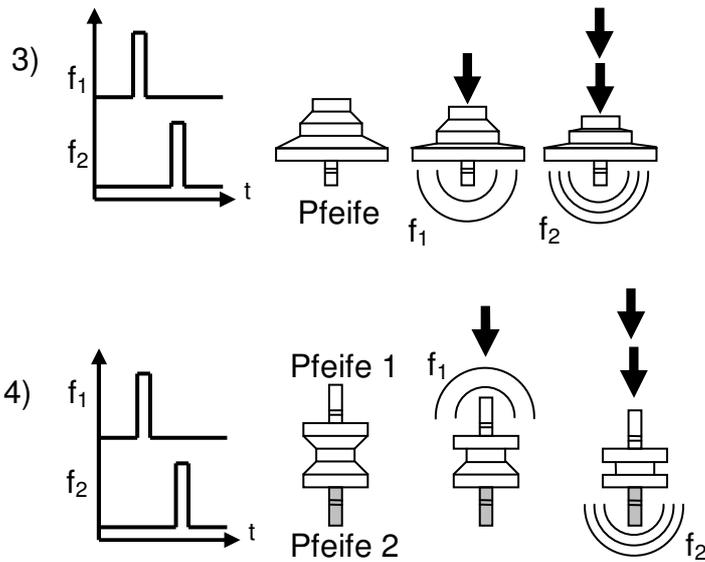


Abb. 5.17: Konstruktive Möglichkeiten zur Umsetzung einer zeitlichen Kodierung mit Pause nach Variante B

Da im zweiten Schritt eine höhere Kraft zur Komprimierung des Balges benötigt wird, wird auch innerhalb des Balges die Luft stärker komprimiert und dieselbe Pfeife mit einem höheren Anblasdruck angesteuert. Dies hat gemäß Abb. 4.3 in Kap. 4 eine erhöhte Frequenz zur Folge. Bei der Variante 4 werden zwei Bälge mit unterschiedlichen Wandstärken verwendet, sodass zunächst der Balg mit der geringeren Wandstärke einknickt und die Luft durch Pfeife 1 entweicht. Im zweiten Schritt knickt dann auch der zweite Balg ein und die Pfeife erzeugt eine Frequenz f_2 .

Bei der Variante 5 werden zwei Bälge mit unterschiedlicher Höhe genutzt, wodurch keine Pause zwischen den Signalen erzeugt wird, sondern ein versetzter Beginn der kombinierten Frequenzen.

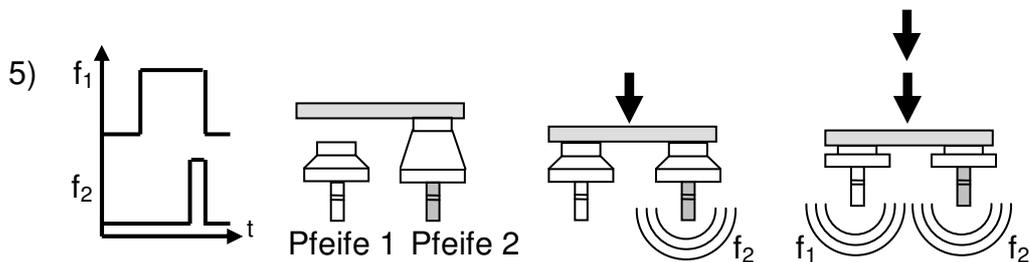


Abb. 5.18: Zeitliche Kodierung mit zwei unterschiedlich hohen Bälgen mit zwei Pfeifen und zeitlichem Versatz nach Kodierungsvariante C

Insgesamt wurden 5 verschiedene Varianten von Silikonbälgen in Verbindung mit verschiedenen Pfeifenarten näher untersucht. Die Bälge sind in Abb. 5.19 dargestellt und der Kodierungsvariante entsprechend bezeichnet. Eine mit abgebildete PC-Taste dient zum Größenvergleich.

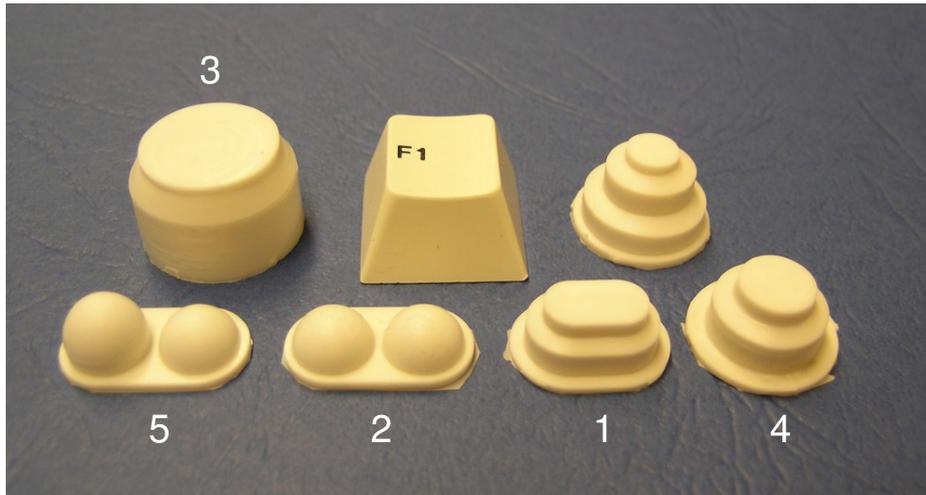


Abb. 5.19: Zur Umsetzung der Kodierungsmöglichkeiten hergestellte Bälge aus Silikon mit der Bezeichnung der Kodierungsvariante 1-5

6 Experimentelle Untersuchungen an Ultraschallpfeifen

Zunächst wurden grundlegende Untersuchungen an den verschiedenen Varianten der hergestellten Ultraschallpfeifen durchgeführt und damit die theoretischen Zusammenhänge überprüft, die zu den Labialpfeifen in Kap. 4 und den Grundlagen des Schalls in Kap. 2 aufgestellt wurden. Diese Untersuchungen wurden mit einem Prüfstand mit einstellbaren Druck- und Durchflusswerten zur quantitativen Untersuchung der Zusammenhänge durchgeführt. Im Anschluss wurden zu den unterschiedlichen Tastenvarianten vergleichende Aufnahmen bei Fingerbetätigung gemacht.

6.1 Grundlegende Untersuchungen an Ultraschallpfeifen

6.1.1 Frequenzspektrum einer gedackten Ultraschallpfeife

In Abb. 6.1 ist das typische Frequenzspektrum einer im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Ultraschallpfeife dargestellt. Der theoretische Zusammenhang bzgl. der Obertöne aus Gl. 4.1 wird durch das Frequenzspektrum bestätigt.

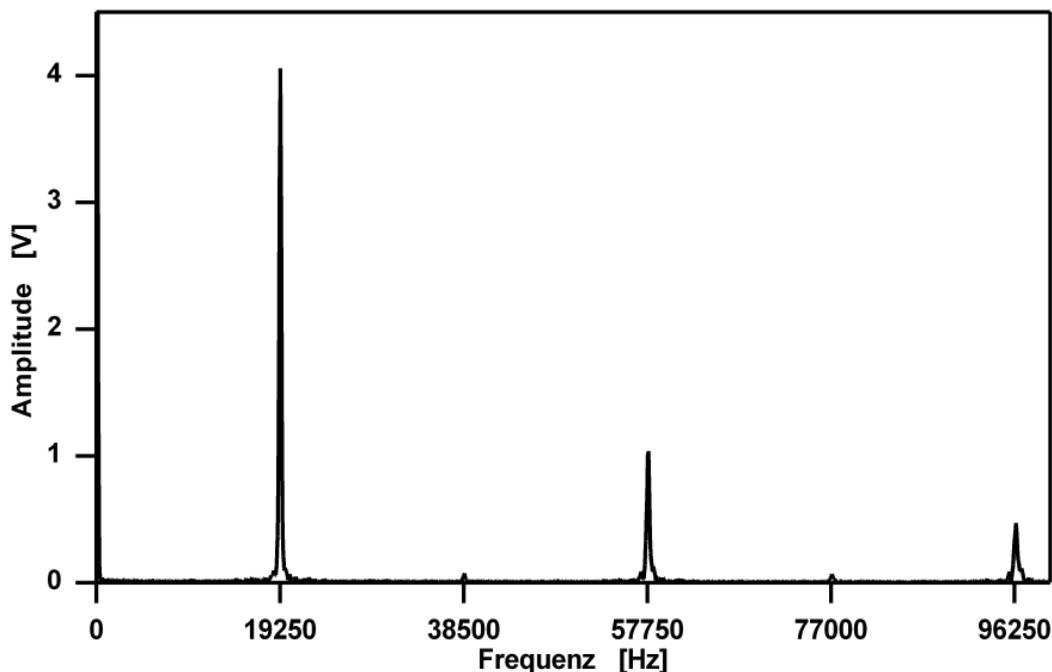


Abb. 6.1: FFT eines typischen Pfeifensignals bei kontinuierlicher Ansteuerung einer Ultraschallpfeife, die mit Ultraschallheißprägen hergestellt wurde

Der Grundton sowie der erste und zweite Oberton als ungerade Vielfache der Grundfrequenz sind deutlich zu erkennen. Dagegen sind Obertöne mit geraden Vielfachen des Grundtons nur ganz schwach zu erkennen.

6.1.2 Zusammenhang zwischen Resonanzraumlänge und Frequenz

Die theoretischen Betrachtungen zu den Zusammenhängen zwischen den geometrischen Abmessungen, insbesondere der Einfluss der Resonanzraumlänge, sind in Abb. 6.2 dargestellt. Hier werden die theoretisch berechneten Frequenzen nach Gl. 4.3 und Gl. 4.5 mit den gemessenen Frequenzen von 6 Ultraschallpfeifen verglichen. Dabei stellt die Raute die mittlere gemessene Frequenz einer Pfeife dar und die Striche die Ober- und Untergrenze der von der jeweiligen Pfeife erzeugten Fre-

quenz. Alle gemessenen Werte der Pfeifenfrequenzen lagen unterhalb der theoretischen Frequenzen nach Gl. 4.3. Die Mittelwerte der jeweiligen Messungen stimmten mit der Näherung nach Ising (Gl. 4.5) gut überein, weshalb diese Theorie als anwendbar auf Ultraschallpfeifen angesehen werden kann.

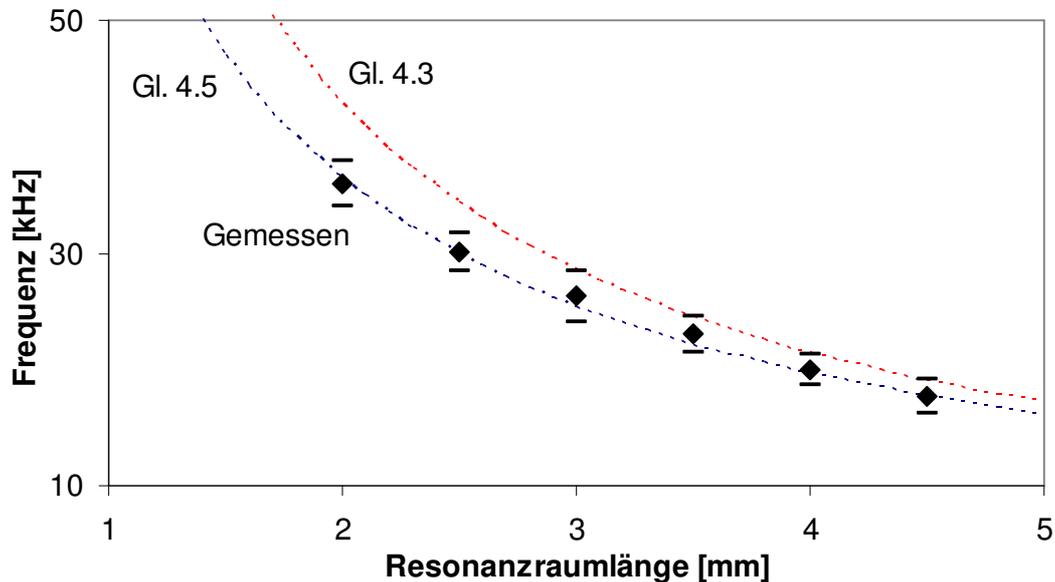


Abb. 6.2: Gemessene Frequenzen im Vergleich zur Theorie in Gl. 4.3 und Gl. 4.5

6.1.3 Temperaturabhängigkeit

Die von einer Ultraschallpfeife erzeugte Frequenz ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Die Abb. 6.3 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Frequenz einer Messingpfeife für verschiedene Ansteuerungsdrücke.

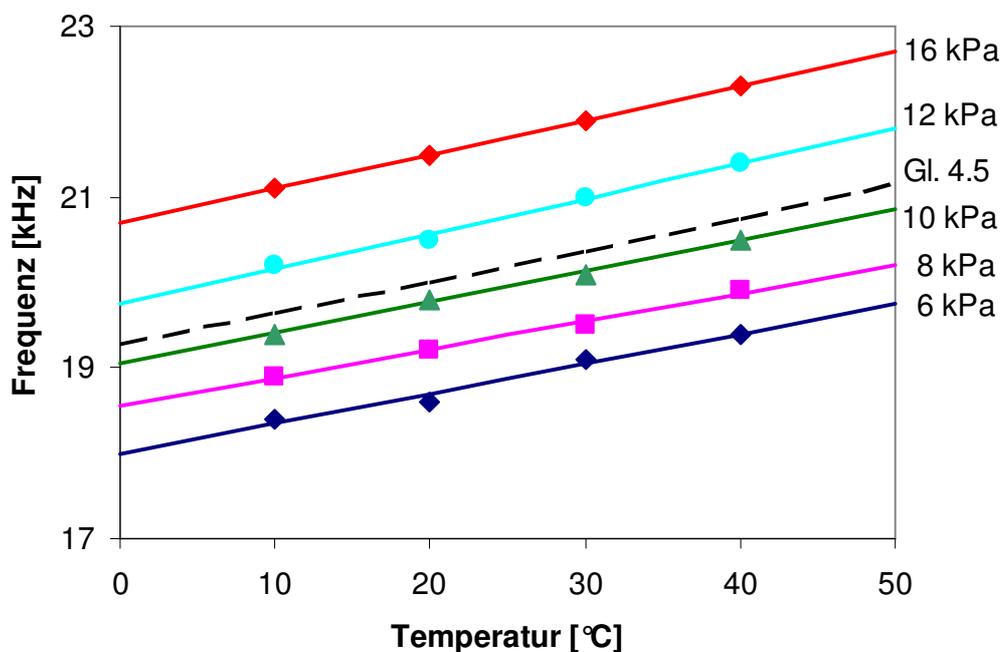


Abb. 6.3: Experimentell ermittelte Temperaturabhängigkeit der Frequenz einer Ultraschallpfeife aus Messing bei unterschiedlichen Drücken im Vergleich zur Theorie Gl. 4.5

Für die Ermittlung der Messkurven wurde eine Pfeife über einen Druckluftanschluss mit einem kontinuierlichen Volumenstrom versorgt und in einer Klimakammer bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen die erzeugten Schwingungen gemessen. Es ist bei gleichem Druck ein Anstieg der Frequenz um jeweils ca. 1 kHz im relevanten Raumtemperaturbereich $T_R = 10 - 40 \text{ °C}$ zu verzeichnen.

6.1.4 Druckabhängigkeit

Einen noch größeren Einfluss als die Temperatur hat der Ansteuerungsdruck einer Pfeife, wie bereits Abb. 6.3 zu entnehmen ist. Zur Verdeutlichung dient Abb. 6.4, aus der hervorgeht, dass die Frequenz der untersuchten Pfeife bei 40 °C und maximalem Ansteuerungsdruck ca. 5 kHz über der Frequenz bei 10 °C und minimalem Ansteuerungsdruck lag.

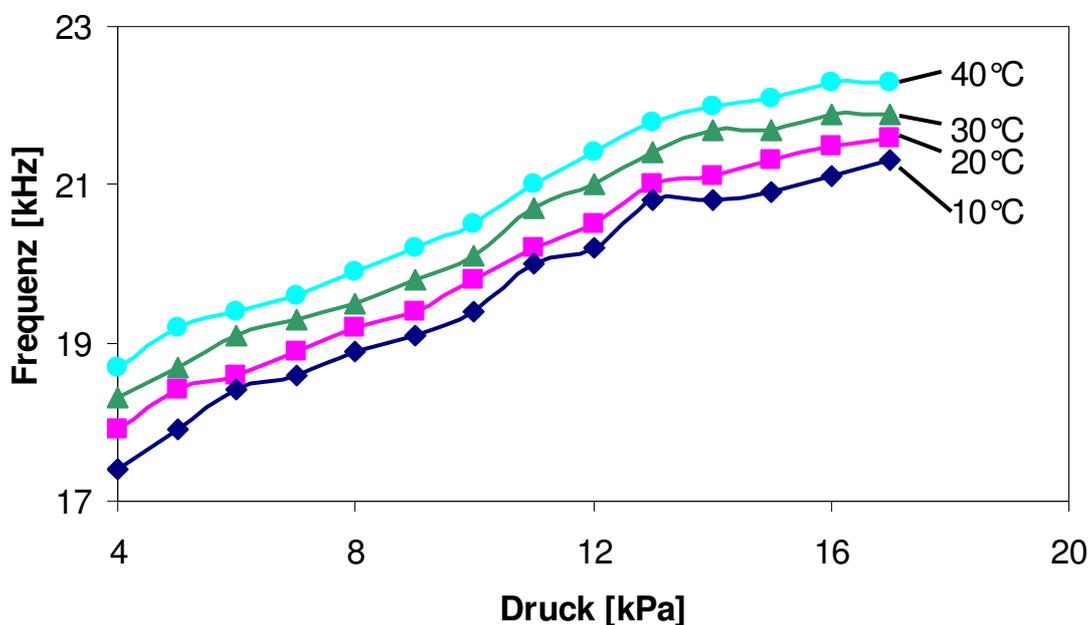


Abb. 6.4: Experimentell ermittelte Druckabhängigkeit der Frequenz von einer Ultraschallpfeife aus Messing bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

Wenn es nicht möglich sein sollte, durch konstruktive Maßnahmen das von einer Pfeife erzeugte Frequenzband auf $\pm 5 \%$ zu beschränken, werden kaum genügend Kodierungen für eine kabellose Tastatur möglich sein. Falls diese Einschränkung gelingen sollte, ergeben sich in dem Frequenzbereich 18 bis 50 kHz $N = 10$ sicher unterscheidbare Frequenzen. Allerdings kann man aus Tab. 6.1 erkennen, dass die Abweichung um die mittlere Pfeifenfrequenz der beiden Pfeifen aus Abb. 6.5 f_M ca. 10 % betragen kann. Dadurch sind nur noch 5 Frequenzen sicher zu unterscheiden.

	f_{Min}	f_{Max}	f_M	Δf	$\Delta f/f_M [\%]$
Pfeife 1	17,1	20,4	18,75	$\pm 1,65$	$\pm 8,8$
Pfeife 2	27,6	33,6	30,6	$\pm 3,0$	$\pm 9,8$

Tab. 6.1: Frequenzbereiche von zwei Ultraschallpfeifen und die Abweichung von der mittleren Frequenz diese Bereiche

Daher ist es notwendig die Druckabhängigkeit der Pfeifen genauer zu untersuchen um auftretende Gesetzmäßigkeiten bei der Kodierung nutzen zu können. Interessant ist in diesem Zusammenhang, bei einem aus zwei Frequenzen zusammengesetzten Signal, das Verhältnis der Frequenzen der Pfeifen zueinander, da eine Änderung des Drucks beide Pfeifen gleichzeitig betrifft.

In Abb. 6.5 ist die Abhängigkeit der Frequenz von zwei ultraschallgeprägten Pfeifen (vgl. Abb. 5.13) vom Volumenstrom dargestellt. Man erkennt die größere Steigung der Kurve von Pfeife 2, die dazu führt, dass beide Pfeifen in jedem Messpunkt ein annähernd gleiches Verhältnis aufweisen (Abb. 6.5 unten).

In Abb. 6.6 sind die Kurven von 7 Ultraschallpfeifen mit unterschiedlichen Grundfrequenzen in Abhängigkeit von ihrer Resonanzraumlänge L in einer logarithmischen Darstellung aufgetragen.

Es zeigt sich, dass der Abstand der Kurven von einander fast überall konstant ist. Der konstante Abstand zwischen zwei im logarithmischen Maßstab aufgetragenen Kurven bedeutet aber, dass sich die Kurven nur um einen konstanten Faktor unterscheiden.

Eine Temperaturverschiebung und damit eine Änderung der Schallgeschwindigkeit nach Gl. 4.4 hat auf das Verhältnis der Pfeifenfrequenzen zueinander keinen Einfluss. Da sich nach Gl. 4.3 die Schallgeschwindigkeit herauskürzt, bleibt das Frequenzverhältnis konstant.

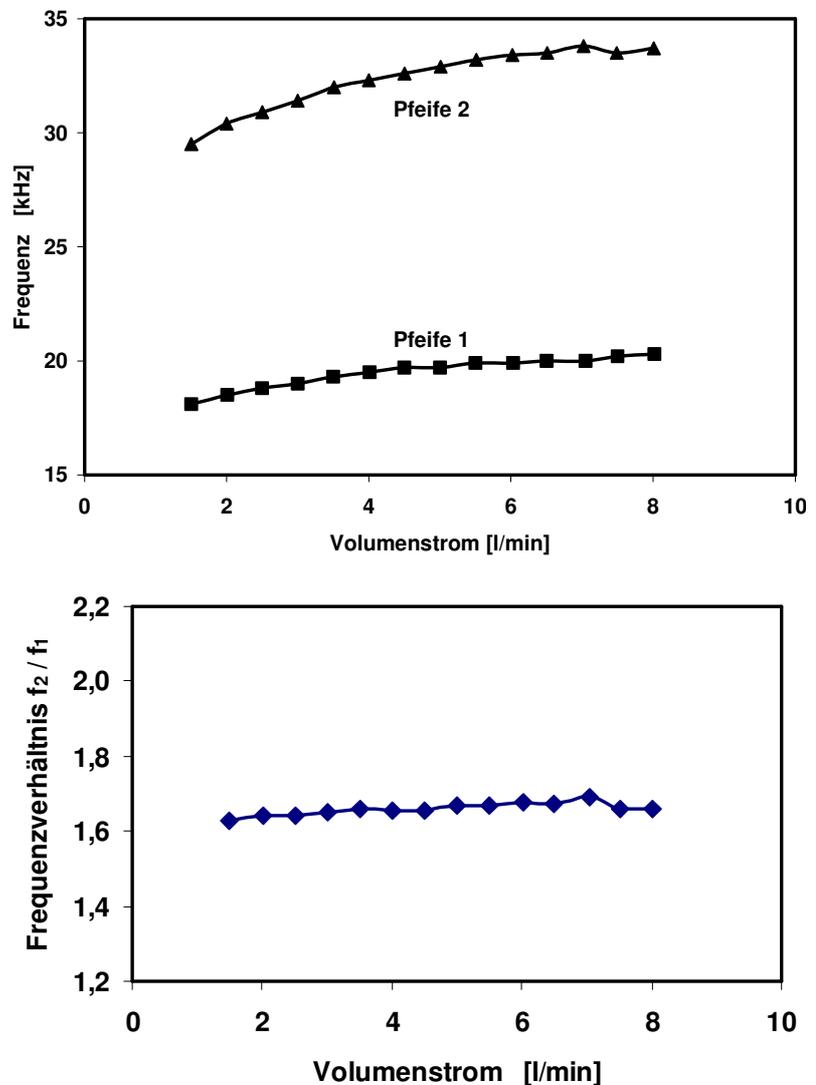


Abb. 6.5: Experimentell ermittelte Abhängigkeit der Frequenz von der Anströmgeschwindigkeit von zwei ultraschallgeprägten Pfeifen und das Verhältnis der Frequenzen (unten)

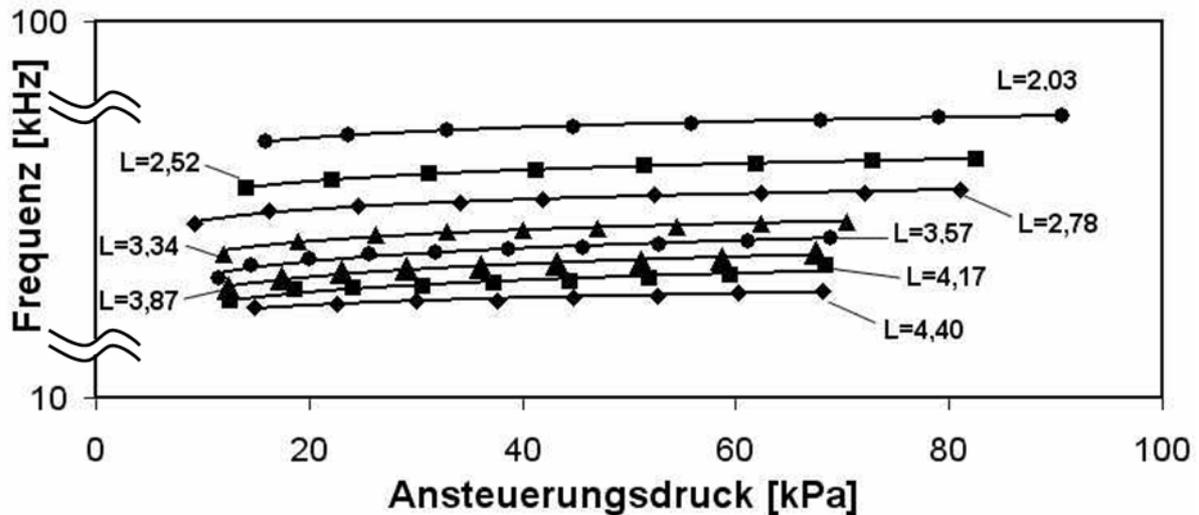


Abb. 6.6: Experimentell ermittelte Druckabhängigkeit von 8 Pfeifen der PMMA-Pfeifenplatte (vgl. Kap.5 Abb. 5.6) mit einfacher logarithmischer Darstellung. Der Kurvenscharparameter L gibt die Länge des Resonanzraumes der jeweiligen Pfeife an.

6.1.5 Schwingungsgüte

Die Güte einer Schwingung nach Gl. 2.10 wird mit der Frequenzbreite und der mittleren Frequenz gebildet. Da die Frequenzbreite bestimmt, wie viele Frequenzen prinzipiell in einem Frequenzbereich unterschieden werden können, ist eine hohe Güte bzw. eine geringe Frequenzbreite anzustreben. In Abb. 6.7 ist die Güte von 5 Pfeifen der Pfeifenplatte (vgl. Abb. 5.6) in Abhängigkeit vom Ansteuerungsdruck dargestellt.

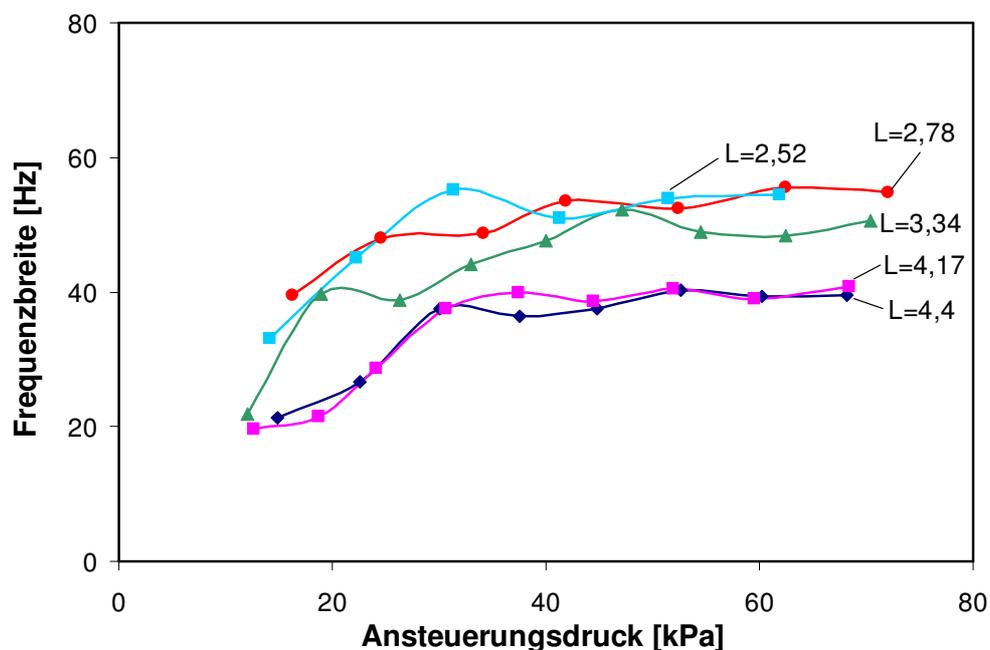


Abb. 6.7: Experimentell ermittelte Güte von 5 Pfeifen in Abhängigkeit vom Ansteuerungsdruck. L bezeichnet die Länge des jeweiligen Resonanzraumes

Die Pfeifen mit einer geringeren Resonanzraumlänge L haben eine höhere Güte, die hauptsächlich durch die höhere mittlere Frequenz bedingt ist. Dies ist durch die

Darstellung der Frequenzbreite der Pfeifen in Abb. 6.8 erkennbar, da sich die Frequenzbreiten über einen großen Bereich kaum unterscheiden.

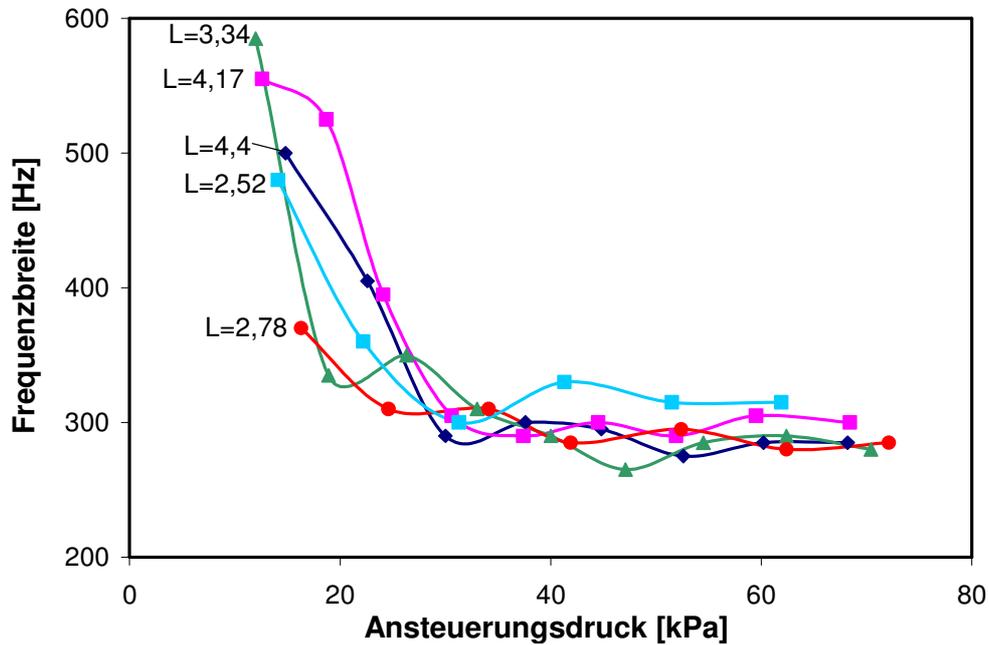


Abb. 6.8: Experimentell ermittelte Halbwertsbreite des Resonanzpeaks im Spektrum von 5 Pfeifen in Abhängigkeit vom Ansteuerungsdruck

Die Halbwertsbreite ist wiederum sehr stark von der Länge des analysierten Klangs abhängig. Um dies zu untersuchen, wurde der Klang einer kontinuierlich angeblasenen Pfeife aufgenommen und von unterschiedlich langen Teilen dieses Signals Fourier-Spektren berechnet. Eine Abtastrate von 300 KHz bei der Signalaufnahme stellte sicher, dass die Breite der Resonanzpeaks nicht durch die Abtastrate bestimmt war. Darüber hinaus wurde der kürzeste Signalteil, der die größte Halbwertsbreite ergab, noch einmal mit einer Abtastrate von nur 100 kHz aufgenommen und es ergab sich kein erkennbar breiterer Peak. In Abb. 6.9 sind die Spektren von drei verschiedenen langen Signalanteilen der Pfeifenschwingung dargestellt. Dabei sieht man, dass die Halbwertsbreiten (HWB) um den Faktor 6 abnehmen, wenn sich die Länge des Signals auf das 10-fache erhöht.

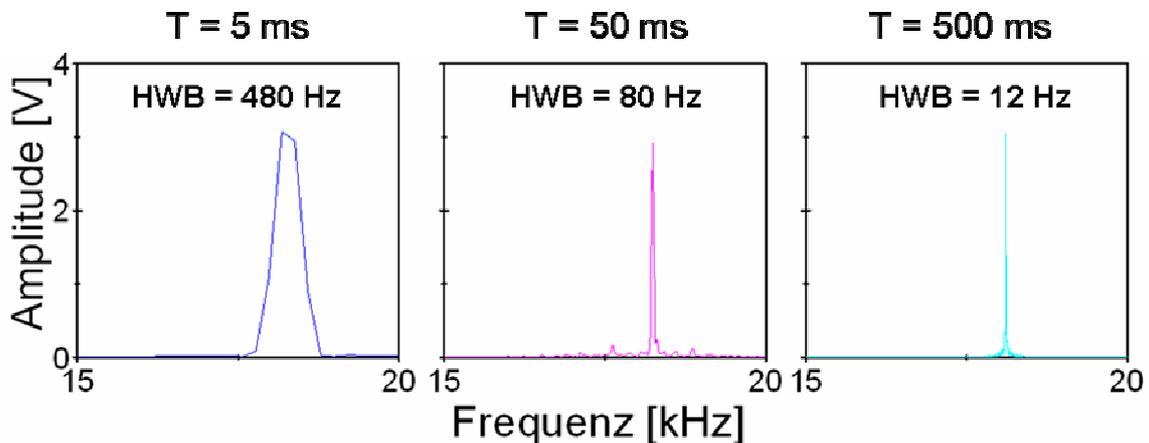
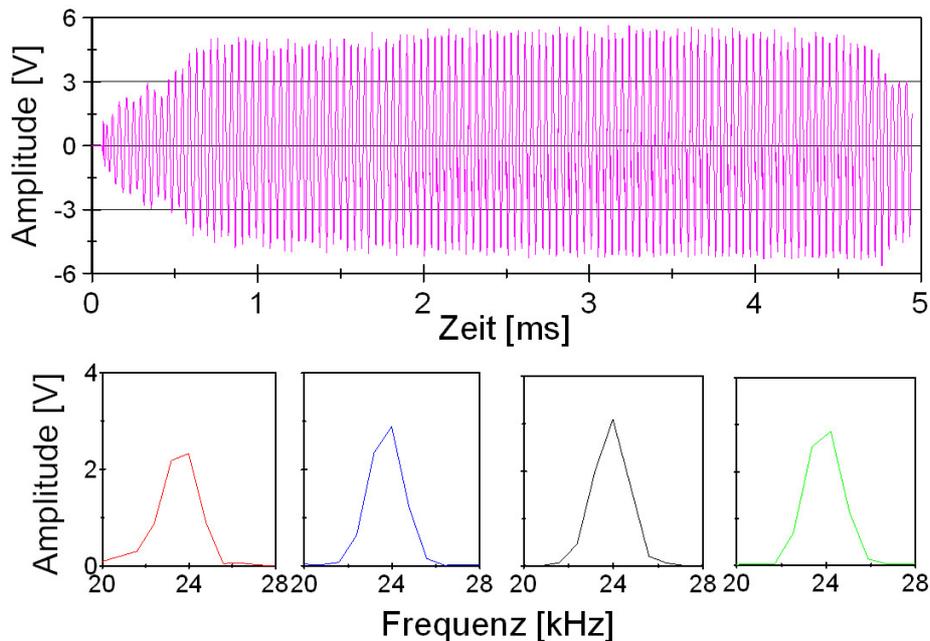


Abb. 6.9: Frequenzbreite in Abhängigkeit von der Abtastlänge einer kontinuierlich angeströmten Ultraschallpfeife

Eine andere Überlegung war, ob in einer $T = 5 \text{ ms}$ langen handbetätigten Pfeifenschwingung Druckanstieg und Druckabfall zu unterschiedlichen Frequenzen innerhalb der Schwingung und somit zu einer höheren Frequenzbreite führen. Abb. 6.10 zeigt allerdings, dass zwar die Amplitude beim Einschwingen der Pfeife innerhalb der ersten ms ansteigt und am Ende der Schwingung leicht wieder abfällt, aber kein Unterschied der Frequenz über die aufgenommene Schwingungsdauer zu erkennen ist.



Tab. 6.10: Schwingungsverlauf einer handbetätigten Pfeife und 4 Frequenzspektren über aufeinander folgende, jeweils 1,25 ms lange Teile der Schwingung.

6.2 Vergleich der hergestellten Kombinationen von Ultraschallpfeifen und Bälgen

Um ein Konzept für den Signalgeber auszuwählen, wurden die hergestellten Varianten hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften und der Signalerzeugung verglichen. Sämtliche in diesem Kapitel dargestellten Signale wurden bei Raumtemperatur aufgezeichnet.

6.2.1 Zwei mit Ultraschall geschweißte Ultraschallpfeifen mit einem Silikonbalg

Für diese Variante wurden zwei Pfeifen nebeneinander angeordnet und mit einem länglichen Balg angesteuert (Abb. 6.11). Das von dieser Variante erzeugte Signal ist in Abb. 6.12 dargestellt. Das Signal, in dem beide Frequenzen gleichzeitig enthalten sind, weist eine Länge von ca. 3 ms auf.

Prinzipiell ist diese Variante für die Erzeugung von Signalen aus zwei Frequenzen geeignet und erzielte mit den meisten geschweißten Pfeifenkombinationen gute Ergebnisse. Bei einem Anteil von etwa 20 % der Kombinationen von Ultraschallpfeifen trat jedoch das Problem auf, dass nur eine Frequenz im erzeugten Klang vorhanden war oder die zweite Frequenz eine sehr geringe Amplitude (ca. 10 % der ersten) aufwies. Dieses Problem trat auch dann auf, wenn beide Pfeifen im Test mit einzelner Ansteuerung funktionierten und Töne mit annähernd gleichen Amplituden erzeugten. Als ursächlich für dieses Problem wird angenommen, dass durch geometrie- und fertigungsbedingte Unterschiede des Strömungswiderstands der Pfeifen bei Ansteuerung mit einem gemeinsamen Luftvolumen die Luft hauptsächlich durch die Pfeife mit dem geringeren Strömungswiderstand entweicht. Eine einfache Möglichkeit dieses Problem zu beheben ist die Verwendung getrennter Bälge zur Ansteuerung der Pfeifen wie es bei den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Varianten umgesetzt wurde.

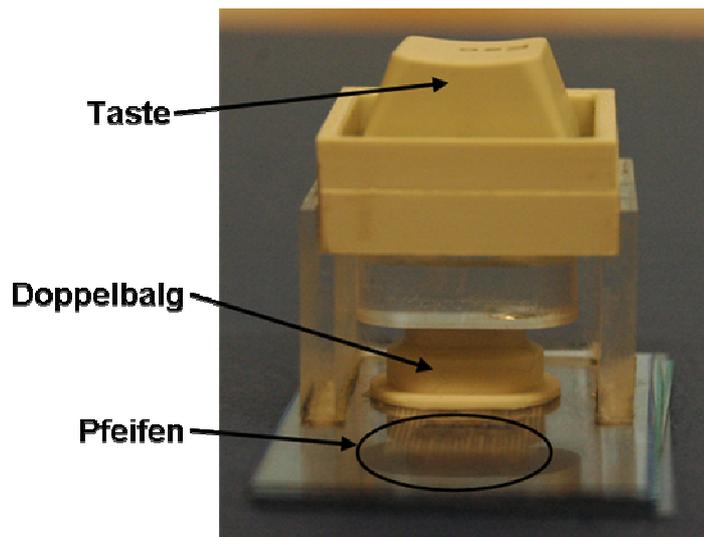


Abb. 6.11: Zwei ultraschallgeprägte Ultraschallpfeifen mit einem gemeinsamen Silikonbalg

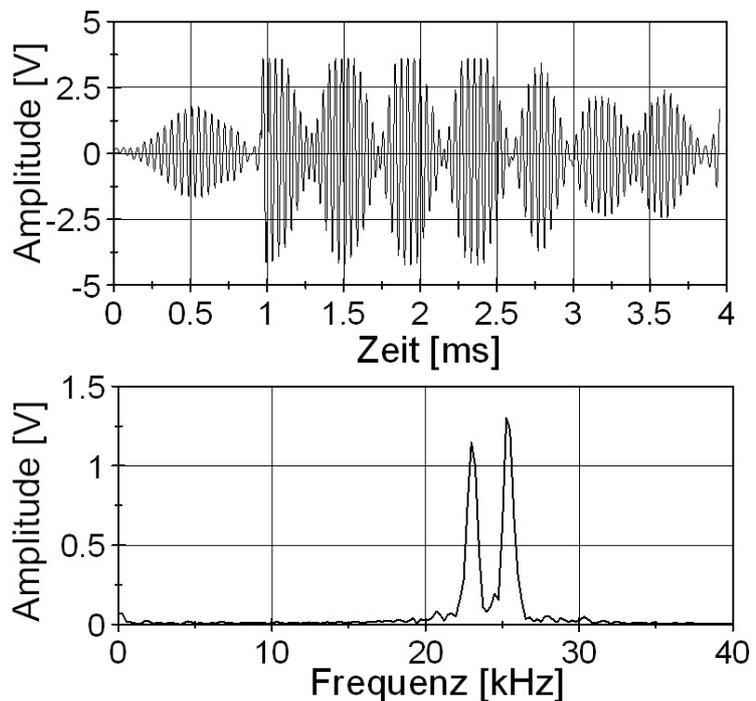


Abb. 6.12: Aufnahme und Fourieranalyse eines Signals der in Abb. 11 gezeigten Mikro-pfeifen

6.2.2 Zwei ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen mit zwei identischen Silikonbälgen

Für diese Variante wurden zwei ultraschallgeprägte Pfeifen mit zwei halbkugelförmigen Bälgen verwendet (Abb. 6.13). Die Ansteuerung erfolgt über eine Taste mit Zwischenstück, das beide Bälge gleichzeitig zusammendrückt.

Die Gesamthöhe des Signalgebers beträgt ohne Zwischenstück und Taste 10 mm, mit Taste 30 mm. Der Hub beträgt 4 mm. Die Grundfläche des Signalgebers hat die Abmessungen $16 \cdot 18 \text{ mm}^2$. Die Wandstärke der Bälge beträgt jeweils 0,5 mm.

In Abb. 6.14 ist ein mit dieser Variante erzeugtes Signal dargestellt. Die Gesamtlänge des Signals beträgt ca. 3,5 ms. Deutlich zu erkennen ist die periodische Auslöschung des Signals, das durch Überlagerung der beiden Frequenzen der Ultraschallpfeifen entsteht.

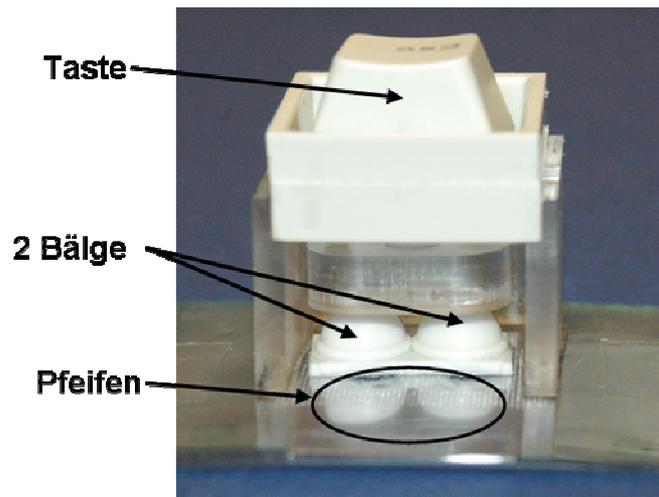


Abb. 6.13: Zwei mit Ultraschall geschweißte Ultraschallpfeifen mit zwei identischen Silikonbälgen

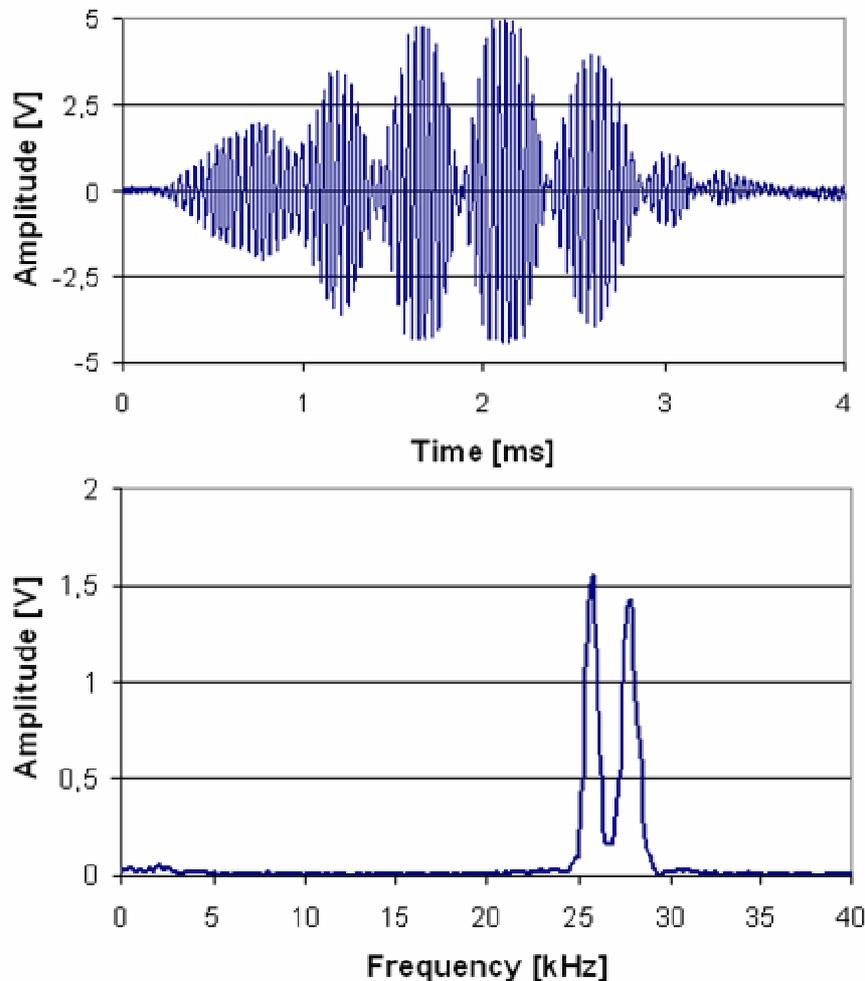


Abb. 6.14: Aufnahme und Fourieranalyse eines Signals der in Abb. 6.13 gezeigten Anordnung von Mikropfeifen und Bälgen

6.2.3 Gefräste Ultraschallpfeife mit Zweizonen-Silikonbalg

Dies ist die erste Variante eines Signalgebers, die für die Untersuchungen hergestellt wurde. Sie besteht aus einer gefrästen Ultraschallpfeife aus PMMA mit einem Silikonbalg mit zwei ineinander angeordneten Zonen gemäß Abb. 6.15. Wie im ersten Bild zu erkennen, sind Pfeife und Balg für die Betätigung unter einer Tastaturtaste angeordnet.

Die Gesamthöhe des Signalgebers beträgt 25 mm, die Höhe des Balgs 12 mm, der Durchmesser des Balgs 18 mm, der Durchmesser der inneren Kammer 10 mm. Der Abstand der Unterkante der inneren Kammer von der äußeren beträgt 4 mm. Der Gesamthub beträgt ca. 7 mm.

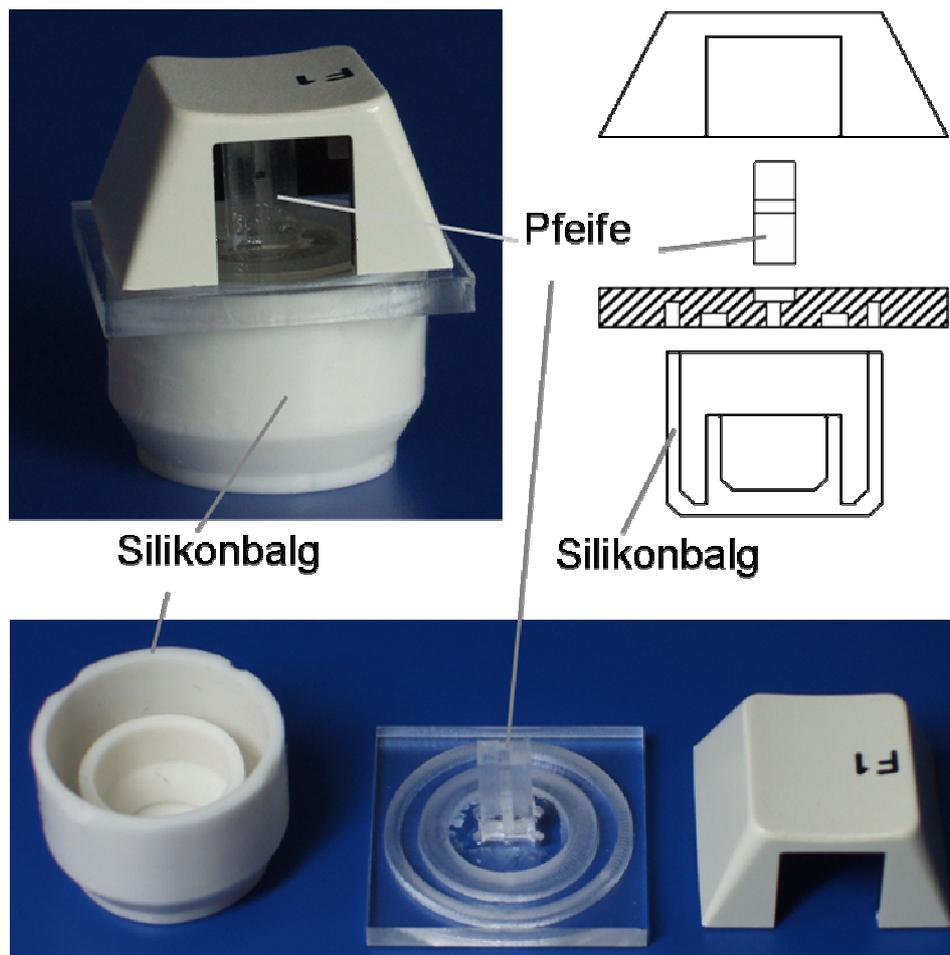


Abb. 6.15: Ultraschallpfeife aus PMMA mit Silikonbalg mit zwei Zonen

Ziel bei der Herstellung dieser Variante war die Erzeugung eines durch eine Pause unterbrochenen Signals, das wie in Abb. 6.16 zu erkennen auch realisiert werden konnte. Bei Betätigung der Taste entsteht zunächst durch Komprimierung der äußeren Kammer des Balgs ein Klang. Durch das Aufsetzen der Wand der inneren Kammer entsteht eine Unterbrechung des Signals, bevor durch die anschließende Komprimierung der inneren Kammer ein zweiter Klang erzeugt wird. Die Länge der einzelnen Töne beträgt ca. 5 ms, die Gesamtlänge des Signals ca. 30 ms.

Bei Betrachtung der Frequenz der erzeugten Töne in Abb. 6.16 fällt auf, dass obwohl nur eine Ultraschallpfeife verwendet wurde, die Frequenz des ersten Klangs um etwa 2,5 kHz unter der Frequenz des zweiten Klangs liegt. Dieses Verhalten wird

auf die Druckabhängigkeit der mit den Ultraschallpfeifen erzeugten Töne zurückgeführt (vgl. Abb. 6.4 bzw. 6.5 oben). Für die Komprimierung des äußeren Teils des Balges wird weniger Druck benötigt als für den inneren Teil, deshalb entsteht erst ein Luftstoß mit geringerem Druck und dann einer mit größerem Druck.

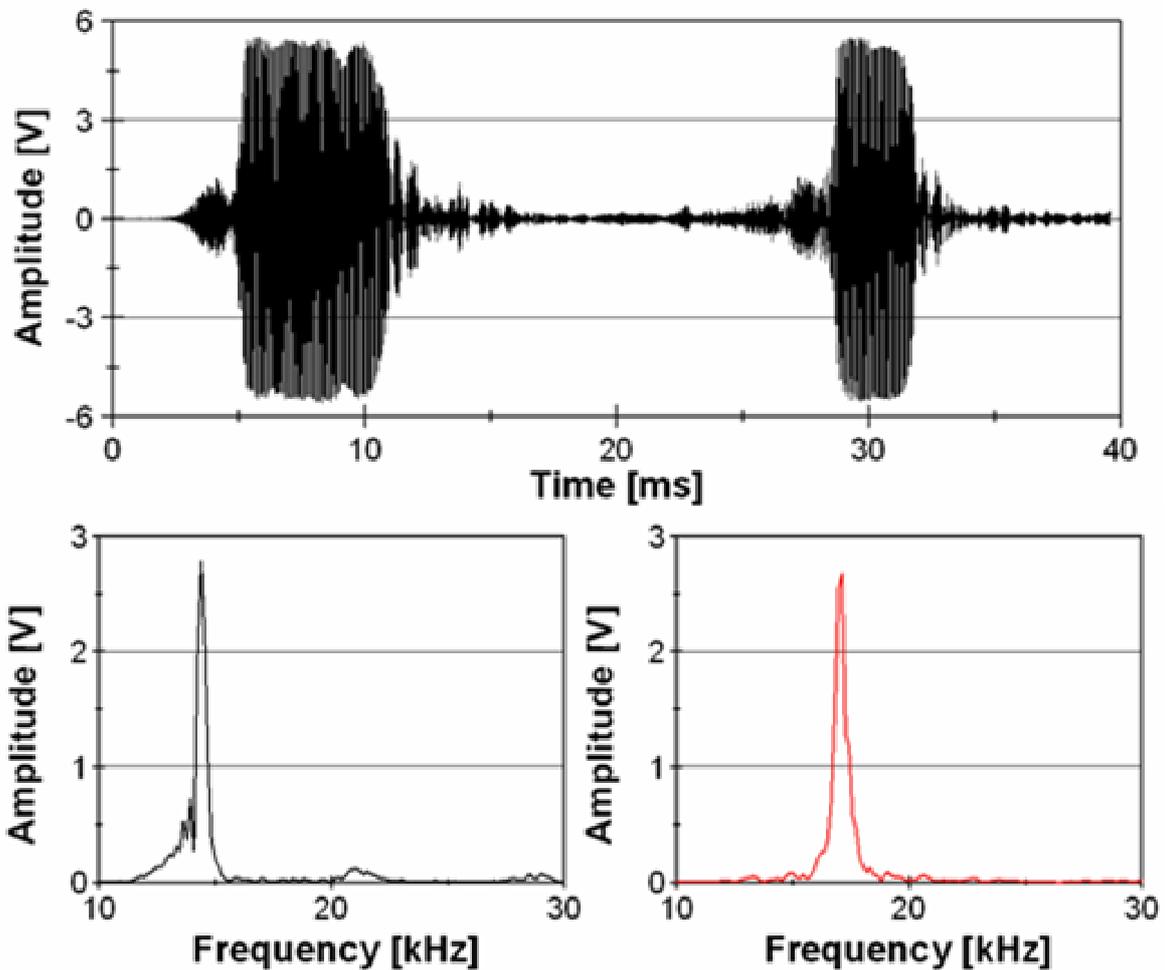


Abb. 6.16: Aufnahme und Fourieranalysen der beiden Signale der Mikropfeife und des Balgs aus Abb. 6.15

Diese Variante ist somit grundsätzlich zur Erzeugung einer Kodierung geeignet und benötigt nur eine Ultraschallpfeife für jedes Signal. Nachteile dieser Variante sind der durch die Zonen des Balges bedingte Bauraum, der relativ große Hub, die notwendige große Betätigungskraft sowie die Länge des Signals.

6.2.4 Zwei gefräste Ultraschallpfeifen übereinander mit einzelnen Silikonbälgen

Die zweite untersuchte Variante besteht aus zwei übereinander angeordneten Ultraschallpfeifen aus PMMA, die durch getrennte Bälge mit Luft versorgt werden. Die Gesamthöhe dieser Variante beträgt 38 mm, der Durchmesser der Bälge beträgt 16 mm, der Gesamthub 8 mm.

Ziel bei der Herstellung dieser Variante war eine Kodierung durch Kombination von zwei Frequenzen, die nacheinander angesteuert werden. Durch unterschiedliche Wandstärken der Bälge wurde sichergestellt, dass bei Druck auf die Taste der obere Balg zuerst zusammengedrückt wird.

Das von dieser Variante erzeugte Signal ist in Abb. 6.18 dargestellt. Es besteht aus zwei Tönen unterschiedlicher Frequenzen mit einer Unterbrechung. Der erste Klang hat eine Länge von ca. 5 ms, die nachfolgende

Pause ist ca. 18 ms lang und der zweite Klang ca. 10 ms. Die Gesamtdauer des Signals beträgt ca. 33 ms. Hauptnachteile dieser Variante sind der durch die Anordnung bedingte Bauraum und Hub, sowie die Länge des erzeugten Signals, obwohl dieses kürzer ist als bei der unter 6.2.3 beschriebenen Variante.

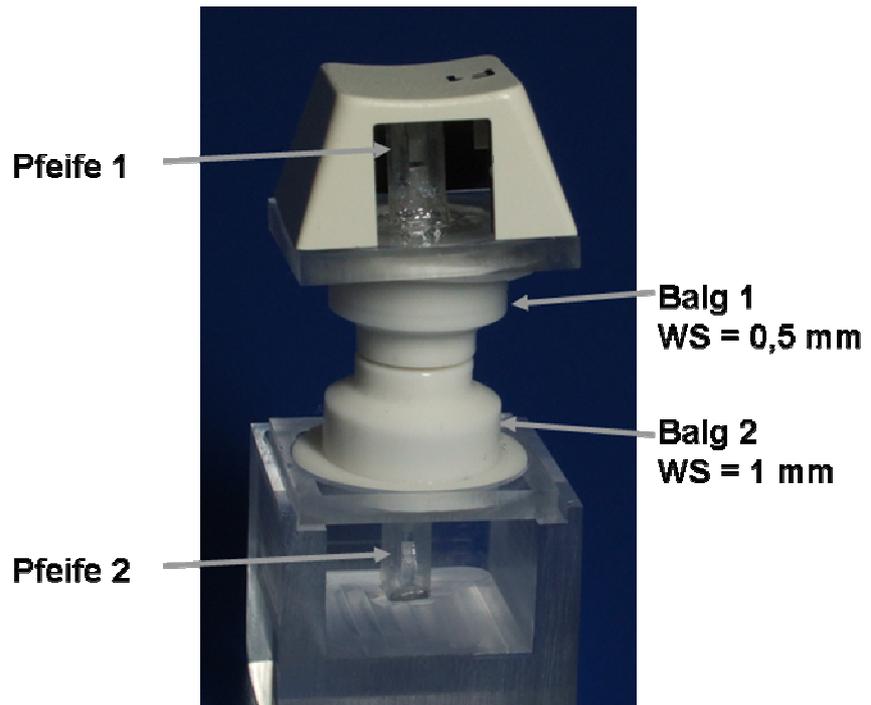


Abb. 6.17: Zwei Ultraschallpfeifen aus PMMA mit zwei getrennten Bälgen unterschiedlicher Wandstärken

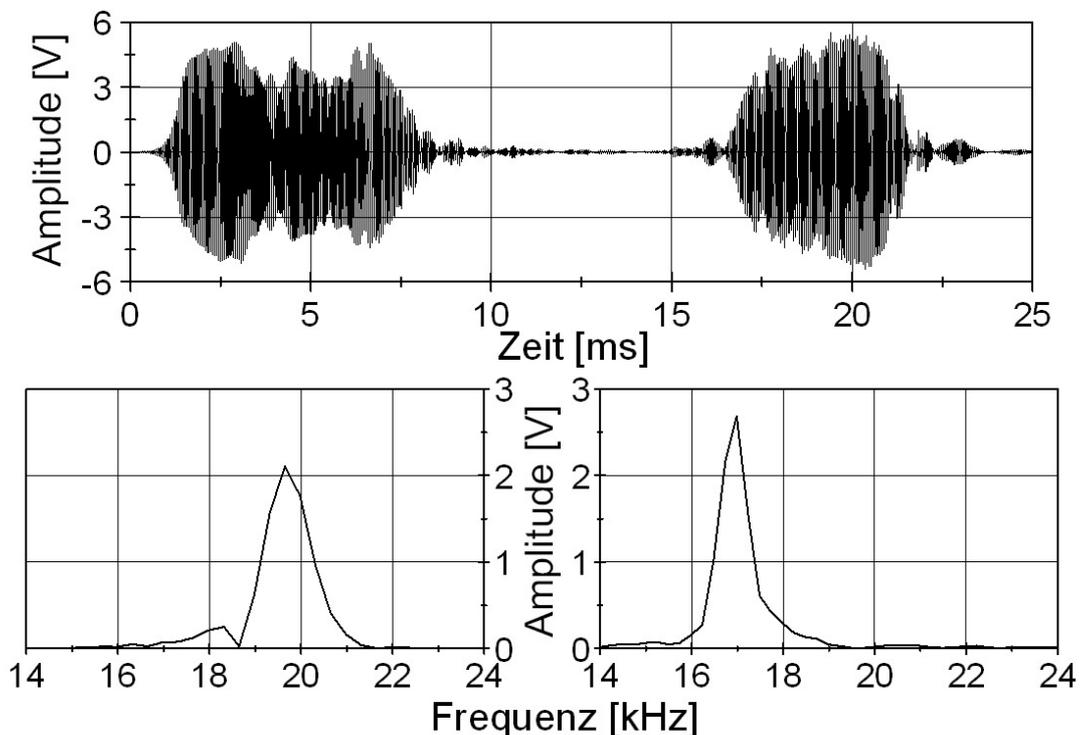


Abb. 6.18: Schwingungsverlauf und FFTs der Signale der in Abb. 6.17 dargestellten Variante

6.2.5 Zwei ultraschallgeschweißte Ultraschallpfeifen mit unterschiedlichen Silikonbälgen

Die in Abb. 6.13 dargestellte Anordnung der beiden Bälge wurde dahingehend variiert, dass diese unterschiedlich hoch entworfen wurden, der Gesamthub erhöht sich dadurch auf 6 mm.

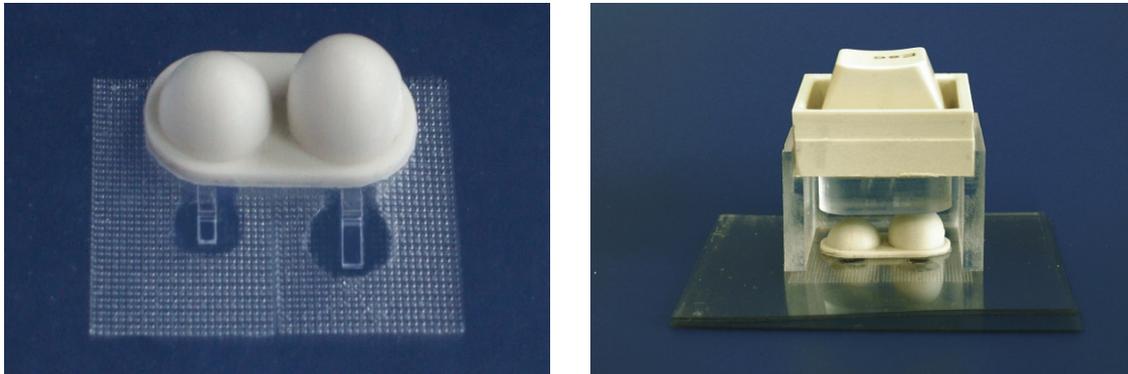


Abb. 6.19: Zwei mit Ultraschall geschweißte Ultraschallpfeifen mit unterschiedlich großen Bälgen

In Abb. 6.20 sind das gesamte Signal, die unterschiedlichen Bereiche sowie die Frequenzspektren der Bereiche des Signals dargestellt.

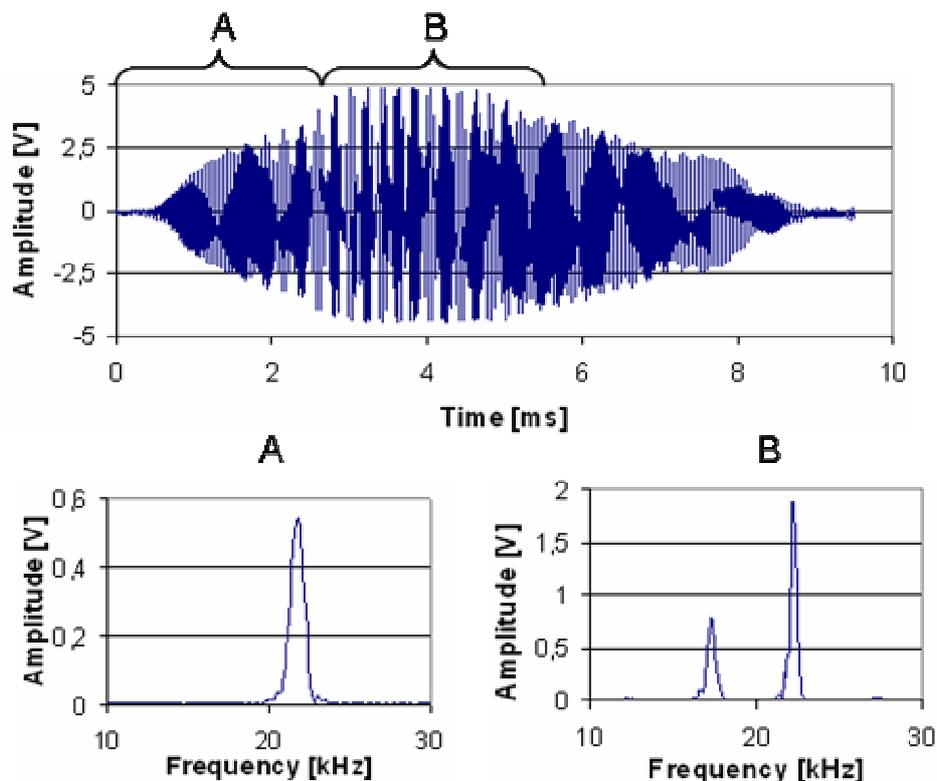


Abb. 6.20: Schwingungsverlauf und Frequenzspektren der zeitlichen Abschnitte A (0 bis 2,5 ms) und B (2,5 bis 5 ms) des zeitlich versetzten Signals

Durch die Verwendung von zwei Bälgen mit unterschiedlicher Größe soll zusätzlich zur Kombination zweier Frequenzen eine Zeitkomponente in die Kodierung eingebracht werden. Bei Betätigung der Taste wird zunächst nur der größere Balg kompri-

miert, das Signal beginnt entsprechend mit der Frequenz der durch diesen Balg angesteuerten Pfeife. Kurz danach setzt die Taste auf dem kleineren Balg auf, die zweite Pfeife wird ebenfalls angesteuert und die zweite Frequenz kann in der FFT erkannt werden.

6.3 Auswahl einer Variante

Aus den fünf untersuchten Varianten wurde eine für die Verwendung in einem Prototyp einer Fernbedienung mit 15 Signalen ausgewählt. Die Bewertung der Varianten erfolgte gemäß den Kriterien der Tabelle 6.2. Bauraum und Hub der Variante sollten gering sein, die Betätigung mit geringem Kraftaufwand und nah an der gewohnten Betätigung einer PC-Tastatur ausgeführt werden können. Die Signallänge sollte zur Erzielung einer großen Zahl von Anschlägen pro Minute gering sein. Die Kodierung sollte einfach und eindeutig sein, die Herstellung einfach unter Verwendung weniger Komponenten.

	Abb. 6.11	Abb. 6.13	Abb. 6.15	Abb. 6.17	Abb. 6.19
Bauraum	+	+	-	-	+
Hub	+	+	-	-	+
Betätigung	+	+	-	-	+
Signallänge	-	+	-	-	+
Kodierung	-	+	+ -	+	+
Herstellung	+	+	-	-	+

Tab. 6.2: Bewertung der untersuchten Varianten

Auch wenn die Varianten aus den Abbildungen 6.11, 6.15 und 6.17 durch konstruktive Maßnahmen verbessert werden können, ist der Gesamteindruck der Varianten mit den halbkugelförmigen Bälgen aus Abb. 6.13 und 6.19 im Vergleich besser. Da eine Abfrage von zwei gleichzeitig erzeugten Frequenzen prinzipiell einfacher zu realisieren scheint, wurde zur weiteren Untersuchung die Variante aus Abb. 6.13 ausgewählt und 15 Signalgeber dieser Bauart wurden hergestellt.

6.4 Analyse der 15 vom Prototyp erzeugten Signale

6.4.1 Signale bei Betätigung mit annähernd konstanter Kraft und Geschwindigkeit

Jedes der 15 Signale besteht wie in Abb. 6.14 dargestellt aus zwei Frequenzen, die gleichzeitig erzeugt werden. Um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Signalerzeugung treffen zu können, wurden die Signale von 3 Kombinationen, in denen alle 6 Frequenzen enthalten sind, achtmal nacheinander durch einen Fingerdruck auf die Taste erzeugt und die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt, das in Abb. 21 zu sehen ist.

Für die Aufnahmen dieser Signale wurde versucht, die Taste jedes Mal mit der gleichen Kraft und Geschwindigkeit zu betätigen. Aufgrund der Betätigung mit dem Finger war eine exakte Reproduzierbarkeit von Betätigungskraft und Geschwindigkeit jedoch nicht gegeben. Die Abweichung der erzeugten Frequenzen betrug maximal 1 kHz, wenn jeweils die Maxima der dargestellten Graphen verglichen werden.

Anhand dieser Abbildung ist auch erkennbar, dass zumindest im Rahmen der bei diesen Versuchen ähnlichen Betätigungskraft und -geschwindigkeit eine eindeutige und sichere Unterscheidung der einzelnen Frequenzen der 6 Pfeifen gegeben ist.

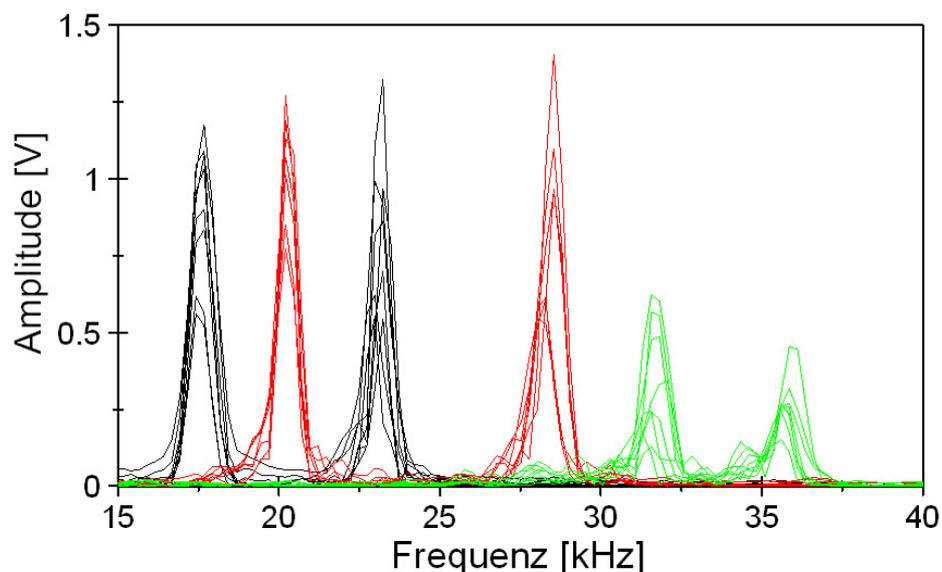


Abb. 6.21: FFT von jeweils 8 Aufnahmen der Pfeifenkombinationen 1-3 sowie 2-4 und 5-6

6.4.2 Betätigungsabhängige Abweichungen der Signale

Die Betätigungsabhängigkeit der erzeugten Signale wurde beispielhaft an der Kombination der Ultraschallpfeifen 3 und 5 untersucht. Für die in Abb. 6.22 dargestellten Signale wurde die Taste gezielt mit möglichst unterschiedlicher Kraft und Geschwindigkeit betätigt. Die Abweichungen der Frequenzmaxima derselben Pfeife betragen bis zu 4 kHz. Dieses Verhalten stimmt mit dem in Kap. 6.1 dargestellten Zusammenhang zwischen Ansteuerungsdruck und Frequenz überein.

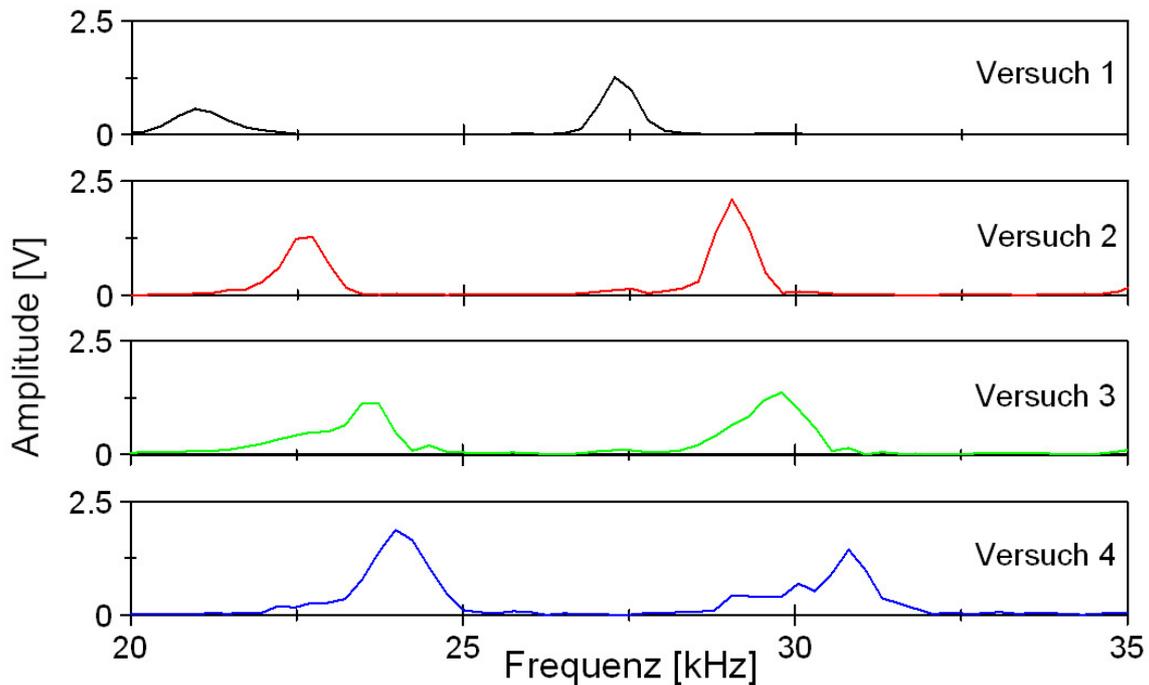


Abb. 6.22: Betätigungsabhängigkeit der Ultraschallpfeifen am Beispiel der Kombination 3-5 bei Raumtemperatur (20 °C)

Eine Analyse der Aufnahmen ergab, dass die betätigungsabhängige Verschiebung von der niedrigsten zur höchsten ermittelten Frequenz einer Pfeife mit einem Faktor von etwa 1,2 erfolgte, so dass höhere Frequenzen sich absolut um einen größeren Betrag verschieben.

Versuch	1	2	3	4
Frequenz 1	27,273	29,040	29,798	30,808
Frequenz 2	21,212	22,727	23,485	23,990
Verhältnis	1,286	1,278	1,269	1,284
Abweichung vom \emptyset	0,007	-0,001	-0,010	0,005

Tab. 6.3: Absolute Frequenzen der jeweiligen Versuche und ihr Verhältnis

Die erzeugten Signale wiesen keine für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit relevanten Unterschiede bei der Signallänge auf, sondern unterschieden sich fast ausschließlich in ihrer Amplitude, wie die Abbildung 6.23 zeigt.

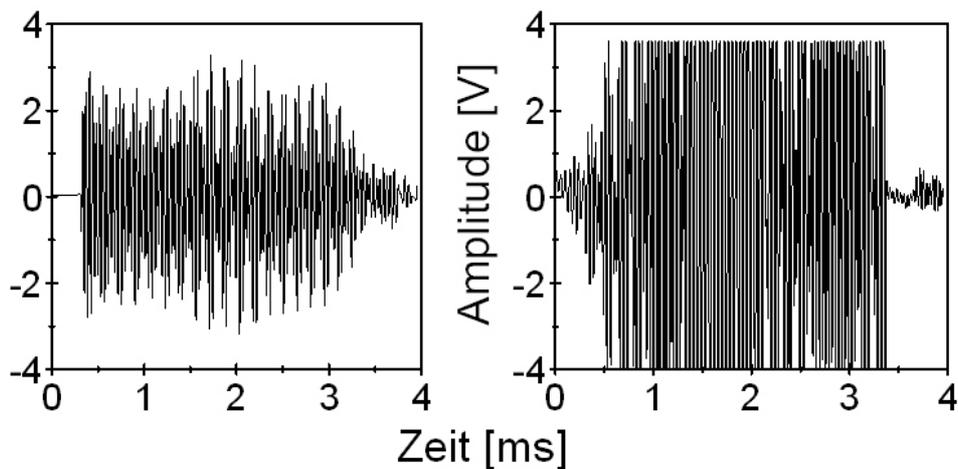


Abb. 6.23: Signal zweier Mikropfeifen bei niedriger Betätigungskraft (links) und hoher Betätigungskraft (rechts)

6.4.3 Fertigungsbedingte Abweichungen der Frequenzen von Ultraschallpfeifen mit gleichen Abmessungen

Von jeder der sechs für die Signalerzeugung hergestellten Ultraschallpfeifen sind in den 15 Signalkombinationen fünf Ausfertigungen enthalten. Diese Ausfertigungen weichen zum Teil erheblich voneinander ab, was die mit ihnen erzeugten Frequenzen betrifft. Für die Aufnahmen, deren Frequenzen in Abb. 6.24 dargestellt sind, wurde versucht, die Tasten bei jeder Betätigung mit der gleichen Kraft und Geschwindigkeit anzusteuern.

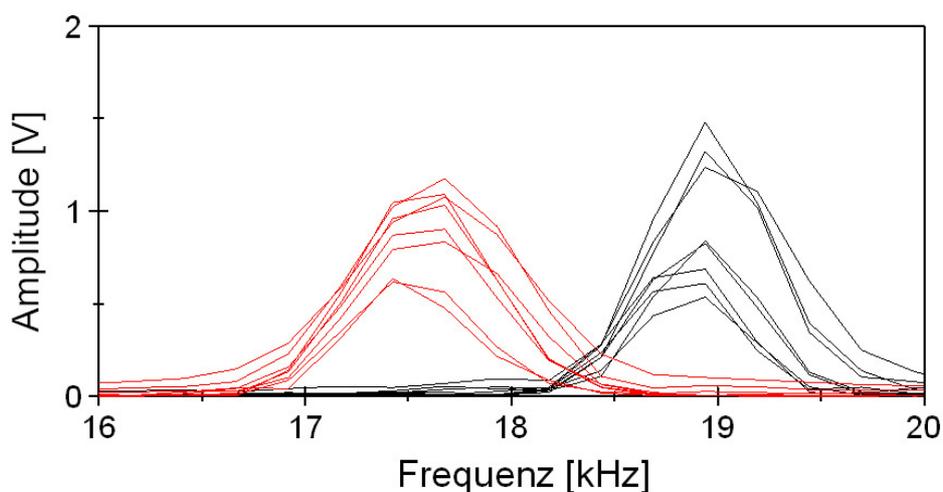


Abb. 6.24: Fertigungsbedingte Abweichungen innerhalb der Ultraschallpfeifen gleicher Abmessungen am Beispiel der Pfeife 1

Während die Abweichung der Frequenz bei jeder einzelnen Pfeife maximal 0,4 kHz betrug, lag die Differenz der Frequenzen der Pfeifen vom niedrigsten zum höchsten

Maximum bei fast 1,4 kHz, so dass durch Fertigungsungenauigkeit eine Abweichung von 1 kHz auftraten. In Abb. 6.25 wurden weitere Pfeifen mit gleicher Resonanzraumlänge verglichen und kontinuierlich angesteuert. Dabei ist zu erkennen, dass bei einer Pfeifenvariante bei gleichem Volumenstrom Abweichungen bis zu 3 kHz auftreten. Diese Fertigungsungenauigkeiten sind hauptsächlich mit der nicht reproduzierbaren Platzierung der Deckelfolie mit dem Aufschnitt zu erklären, da somit keine exakt gleiche Resonanzraumlänge erzielt werden konnte.

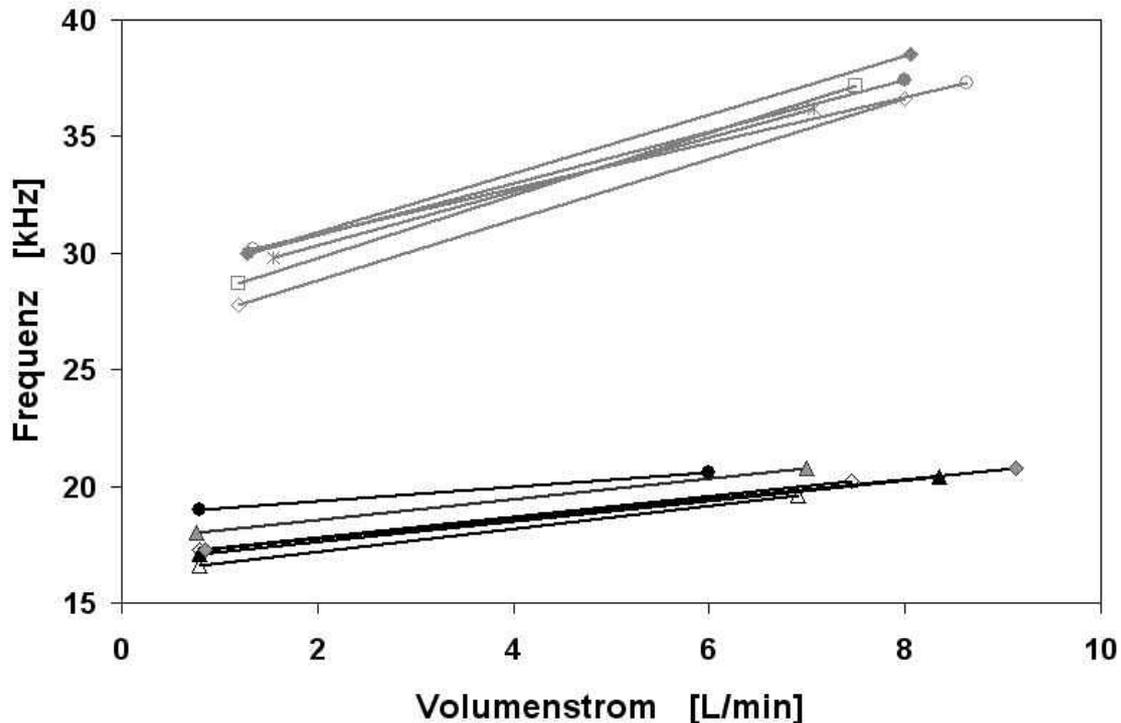


Abb. 25: Fertigungsbedingte Abweichungen innerhalb der Ultraschallpfeifen 1 und 5

6.4.4 Intensität und Reichweite der Signale

Um die Reichweite der Signale und die Abnahme der Amplitude mit zunehmender Entfernung des Senders vom Empfänger zu ermitteln, wurde durch ein Kondensatormikrofon mit Verstärker die Amplitude in [V] mittels LabView bestimmt. Das verwendete Mikrofon hat laut Herstellerangabe [6.1] eine Sensitivität von 12,6 mV/Pa (bei 1 kHz). Der erzeugte Schalldruck in unmittelbarer Nähe des Mikrofons (5 cm) errechnet sich aus der gemessenen Amplitude von 4 V bei einem Verstärkungsfaktor von 180 zu ca. 2 Pa. Wobei die Sensitivität des Mikrofons bei den gemessenen Frequenzen nicht bekannt ist. Der für diese Aufnahmen eingestellte Verstärkungsfaktor betrug $V = 180$.

Durch Aufnahmen in Entfernungen von 0,5 bis 5 m vom Mikrofon konnte der Zusammenhang zwischen Abstand und Amplitude der Signale ermittelt werden, der näherungsweise mit der Theorie (Kap. 2 Gl. 2.9) übereinstimmt (Abb. 6.26). Die Reichweite der erzeugten Signale ist für eine Fernbedienung ausreichend, da auch bei einer Entfernung von 5 m eine ausreichende Amplitude zur Auswertung vorhanden ist.

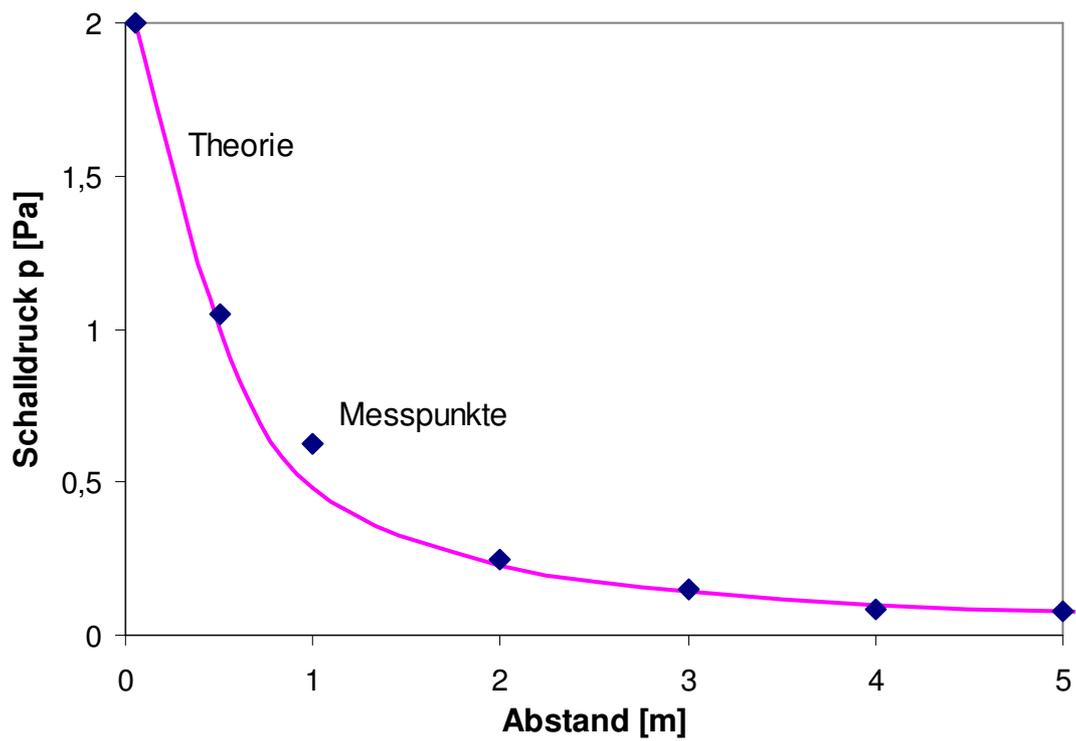


Abb. 6.26: Experimentell ermittelte Abnahme des Schalldrucks einer 4 mm langen Mikropfeife, die mit einem Silikonbalg angesteuert wurde und deren Resonanzfrequenz 20 kHz betrug, mit der Entfernung im Vergleich zu Gl. 2.9 auf Seite 6

7 Empfänger

Um die Empfängereinheit vor Fertigstellung des Senders entwickeln und testen zu können, erfolgte die Entwicklung zunächst mit Hilfe elektronisch erzeugter Signale. Als Eingangssignal wurden über den analogen Eingang eines Digitalen Signal-Prozessors (DSP) Sinuswellen von zwei Frequenzgeneratoren eingespeist, um die Frequenzerkennung mit ersten Programmen prinzipiell zu testen. Mit Hilfe der Frequenzgeneratoren konnten Schallwellen beliebiger Frequenzen simuliert und exakt reproduziert werden.

Im nächsten Schritt wurde die Auswertungssoftware mit zwei Ultraschallpfeifen getestet, wie sie auch in den Fernbedienungen eingesetzt werden (vgl. Abb. 5.2). Die Ultraschallpfeifen konnten über einen pneumatischen Prüfstand (Kap. 7.1.1) mit elektronischer Ansteuerung entweder gleichzeitig oder zeitlich versetzt mit einstellbarem Druck angeblasen werden. Für die Auswertung der Signale wurden ein DSP-Entwicklungsboard sowie die Auswertungssoftware LabView verwendet. Das DSP-Empfängersystem wies eine Abtastrate $f_A = 96$ kHz auf und benötigte Signallängen von mindestens $T = 100$ ms. In LabView steht mit der Messkarte NI PCI-6052E eine Abtastrate von $f_A = 333$ kHz zur Verfügung und Signale von nur 4 ms Länge können noch analysiert werden. Insbesondere für die Auswertung der in Kap. 6 beschriebenen, mit Handbetätigung erzeugten Signale war es notwendig, die Signalauswertung mit LabView zu programmieren, da die Signallängen im Bereich weniger ms lagen. Die erzeugten Signale und typische Störgeräusche wurden ebenfalls mit in LabView erstellten Programmen analysiert, sodass passende Algorithmen für die Signalerkennung und die Differenzierung zwischen Signal und Störsignal entwickelt werden konnten. Parallel zur Entwicklung der Empfängereinheit wurden die Ultraschallpfeifen und die Ansteuerung des Senders weiterentwickelt und auf die Anforderungen zur Signalerkennung angepasst. Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten unterschiedlichen Empfängereinheiten genauer betrachtet.

7.1 Empfängersystem DSP

7.1.1 Elektropneumatischer Prüfstand mit Ultraschallpfeifen

Der pneumatische Versuchsaufbau (Abb. 7.1 und Abb. 7.2) wurde zum Ansteuern von zwei Ultraschallpfeifen mit den Frequenzen 14 kHz und 19 kHz verwendet, die zu diesem Zeitpunkt verfügbar waren. Für die Erprobung der Programme waren diese niedrigen Frequenzen ausreichend. Die Pfeifen können gleichzeitig angesteuert werden oder mit einer Zeitverschiebung einstellbarer Länge.

Mit der Druckregelung wurde am Drucksensor ein reproduzierbarer Druckwert $p = 4,11$ kPa eingestellt, der vor jedem Versuch für die Erzeugung der gleich bleibenden Frequenzen überprüft wurde. Damit beide Pfeifen gleichzeitig oder in definierten Abständen von den Ventilen angesteuert werden konnten, wurde ein Druckluftspeicher mit einem Volumen von 1 L vor den Ventilen eingebaut, um den Druckabfall nach dem Schalten zu kompensieren. Diese Entkoppelung der beiden Pfeifen war notwendig, da erste Versuche zeigten, dass anderenfalls die Reihenfolge der Ansteuerung Auswirkungen auf die erzeugten Frequenzen hat.

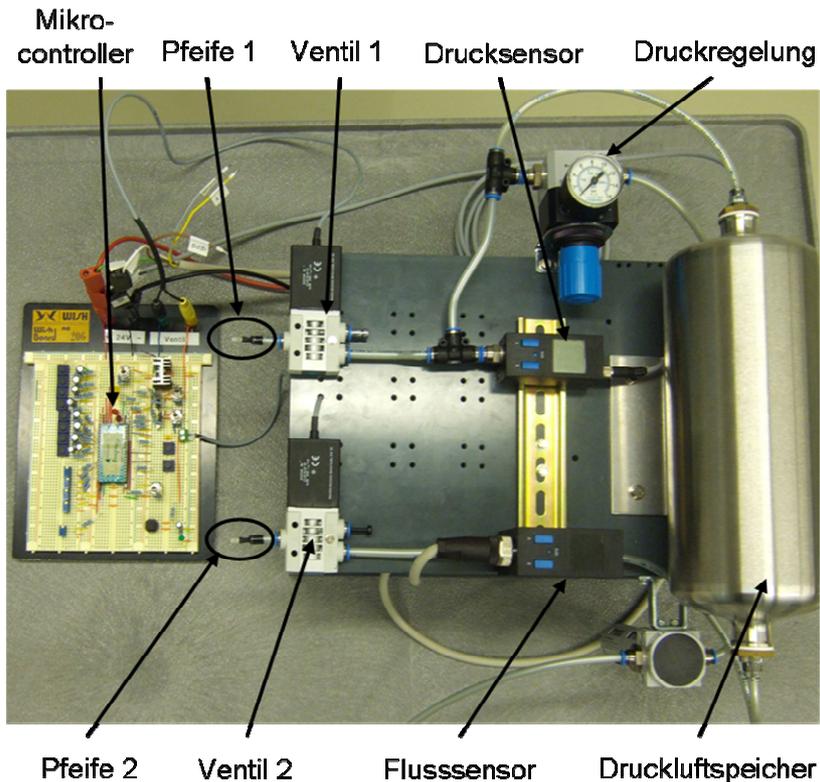


Abb. 7.1: Pneumatischer Versuchsaufbau zur Ansteuerung von zwei Ultraschallpfeifen mit elektrischer Ansteuerung über einen Mikrocontroller

Wie man in Abb. 7.1 erkennen kann, werden beide Ventile über einen Mikrocontroller angesteuert, der seine Eingabebefehle über eine Ansteuerungselektronik (Abb. 7.3) bekommt.

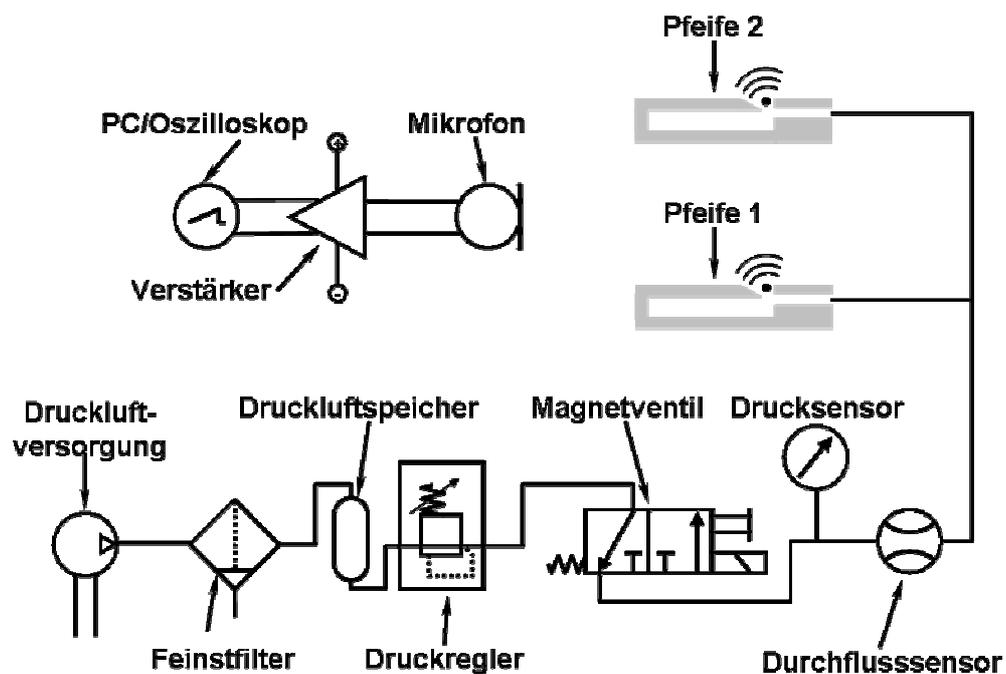


Abb. 7.2: Schematische Darstellung des pneumatisches Versuchsaufbaus

Diese Ansteuerungselektronik ermöglichte eine Ansteuerung der Ventile mit gleichzeitigen Impulsen einer Länge $T = 40$ ms. Diese Ansteuerungslänge konnte in Schritten von $\Delta T = 20$ ms über ein Potentiometer variiert werden. Für die Versuche standen Ultraschallpfeifen mit Resonanzfrequenzen von 14 und 19 kHz zur Verfügung. Die Länge eines einzelnen Pfeifenklangs wurde auf $T = 40$ ms festgelegt.

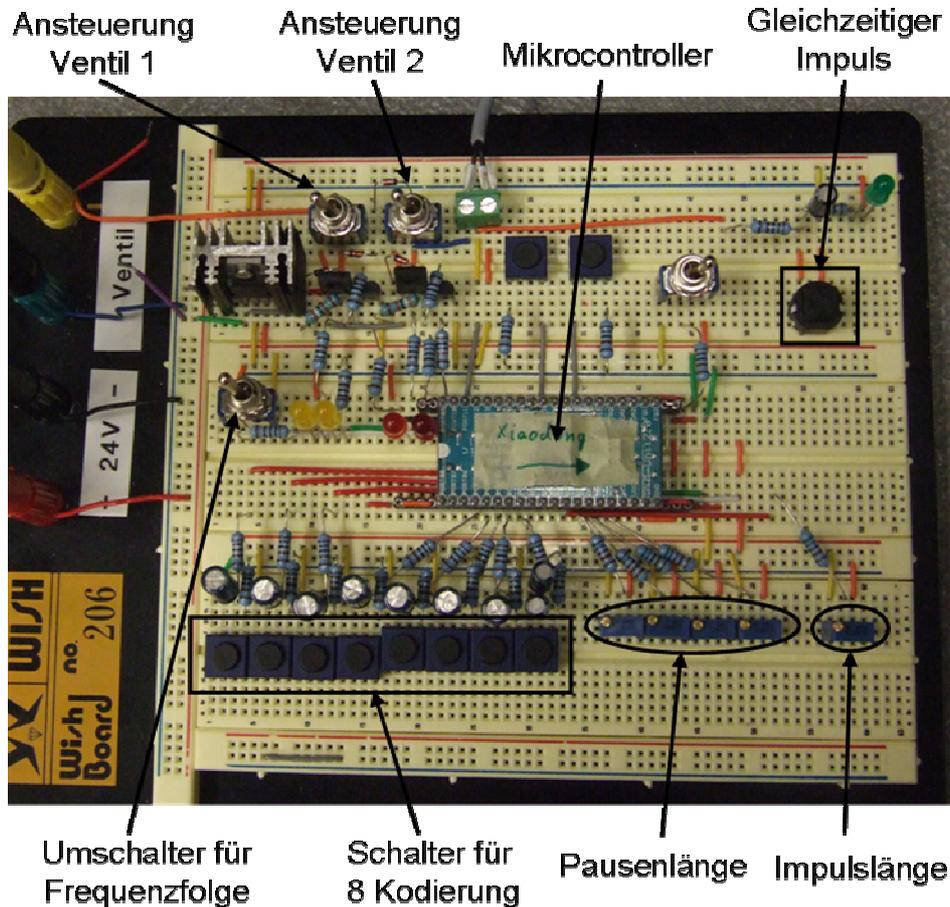


Abb. 7.3: Ansteuerungselektronik zur Erzeugung unterschiedlich kodierter Signale

7.1.2 Ultraschallsignale und Störgeräusche

Für eine fehlerfreie Signalerkennung muss ein Empfängersystem zwischen Signalen und Störgeräuschen unterscheiden können. Dazu ist es zunächst notwendig, die charakteristischen Merkmale der Signale anhand ihrer Schwingungsverläufe und Frequenzspektren zu analysieren. In sämtlichen Versuchen wurden die Pfeifen mit den Frequenzen 14 kHz und 19 kHz als Signalgeber verwendet. Bei der gleichzeitigen Ansteuerung der Pfeifen sieht man in der Aufnahme im Frequenzspektrum bei beiden Frequenzen deutliche Peaks (Abb. 7.4 rechts).

Die Asymmetrie der Schwingungsverläufe (Abb. 7.4 links) entstand durch Verwendung eines asymmetrischen Verstärkers, der eine höhere Amplitude im positiven Achsenabschnitt erzeugte.

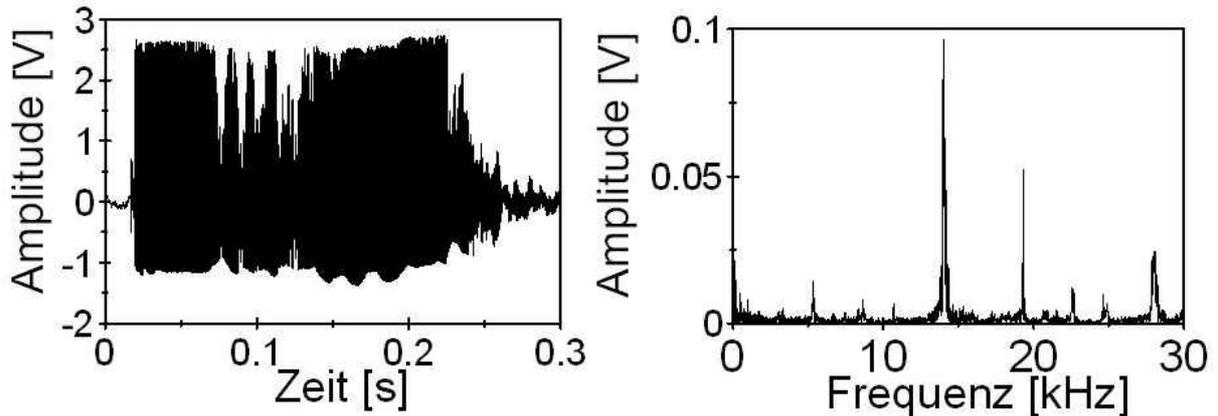


Abb. 7.4: Schwingungsverlauf und FFT des Signals der beiden gleichzeitig angeblasenen Pfeifen mit den Resonanzfrequenzen 14 kHz und 19 kHz

Ein typisches Störgeräusch mit Frequenzen in diesem Bereich ist das Klingeln eines Schlüsselbundes, dessen Schwingungsverlauf und FFT in Abb. 7.5 dargestellt ist.

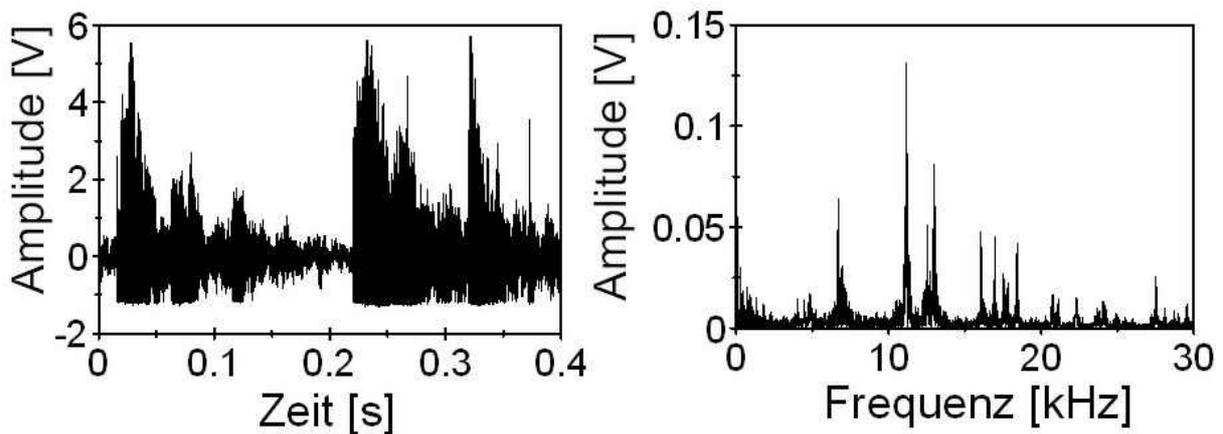


Abb. 7.5: Schwingungsverlauf und FFT von einem Störgeräusch (Schlüsselbund)

In diesem Geräusch treten ebenfalls deutliche Frequenzpeaks bei ca. 14 kHz und 19 kHz auf, sodass eine einfache Abfrage von zwei Frequenzen nicht ausreicht.

Daher wurde neben der Abfrage von gleichzeitig erzeugten Frequenzen auch die zeitliche Kodierung von Signalen verfolgt. Ein zu diesem Zweck erzeugtes Signal ist in Abb. 7.6 dargestellt. Es besteht aus zwei ca. 40 ms langen Schallsignalen der Frequenz 19 kHz mit einer Unterbrechung von 160 ms. Bei Verwendung von zwei Frequenzen können auf diese Weise 4 Signale erzeugt werden. Durch Variation der Pausenlänge kann die Anzahl

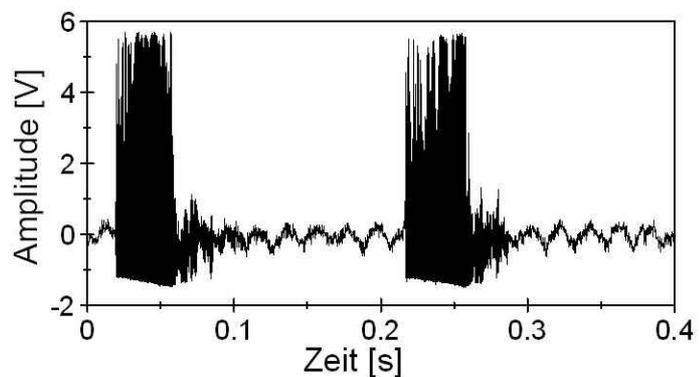


Abb. 7.6: Signalverlauf eines codierten Signals mit einer Pause von 160 ms

der unterscheidbaren Signale nochmals erhöht werden. Somit ist es möglich, mit zwei Pfeifen und vier Pausenlängen 16 verschiedene Signale zu erzeugen. Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Frequenzen wurde auf vier feste Werte zwischen 160 ms und 460 ms eingestellt.

	160 ms	260 ms	360 ms	460 ms
14 – 14 kHz	1	2	3	4
14 – 19 kHz	5	6	7	8
19 – 14 kHz	9	10	11	12
19 – 19 kHz	13	14	15	16

Tab. 7.1: Kombinationsmöglichkeiten von zwei Frequenzen und 4 Pausenlängen zur Erzeugung kodierter Pfeifenklänge

Tab. 7.1 zeigt die Nummerierung dieser 16 Kombinationen, die später in dieser Arbeit verwendet wird.

7.1.3 Aufbau Empfängersystem DSP

Bei diesem Aufbau bestand der Empfänger aus einem Mikrofon mit einem zwei-stufigen Verstärker, der über einen Eingang mit dem A/D-Wandler eines DSP-Entwicklungsboards verbunden ist (Abb. 7.7).

Mit dem DSP können die digitalen Daten mit Programmen weiterverarbeitet werden. Diese Programme werden über eine USB-Schnittstelle von einem PC auf einen Speicher auf dem DSP-Entwicklungsboard übertragen und können mit Hilfe einer Entwicklungssoftware auf dem PC programmiert und gesteuert werden. Zur Programmierung des DSP wurde das DSP-Entwicklungsboard TMS320C6713 DSK von Texas Instruments verwendet, das in ein Gehäuse eingebaut wurde, um die empfindliche Elektronik vor Beschädigungen zu schützen (Abb. 7.8). Daher war es notwendig, Dateneingänge wie die Verbindung zum Mikrofon und die USB-Schnittstelle zum PC aus dem Gehäuse herauszuführen.

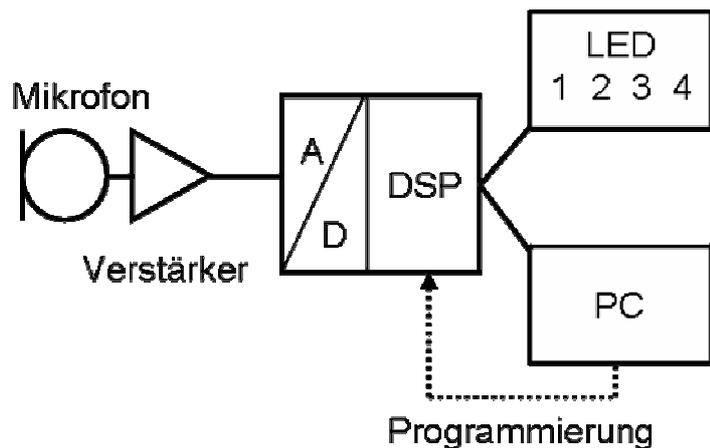


Abb. 7.7: Schema DSP-Empfängersystem

Abb. 7.8). Daher war es notwendig, Dateneingänge wie die Verbindung zum Mikrofon und die USB-Schnittstelle zum PC aus dem Gehäuse herauszuführen.

Die Ausgabe von Signalen wurde über 4 LED-Anzeigen am Gehäuse visualisiert, deren Ausgänge jeweils an einen Kanal eines Oszilloskops angeschlossen (Abb. 7.8) wurden, um für einige Messungen den zeitlichen Verlauf der ausgegebenen Signale betrachten zu können. Die digitale Datenausgabe kann alternativ über eine 26-polige Ausgabemöglichkeit von TTL-Signalen an den PC erfolgen, wobei diese Möglichkeit nicht genutzt wurde.



Abb. 7.8: Versuchsaufbau DSP-Empfängersystem

7.1.4 DSP Auswertungsprogramme

- **Gleichzeitige Frequenzen**

Die Hauptaufgaben der Auswertungsprogramme sind die Erkennung von Signalen und die sichere Unterscheidung zwischen Signalen und zufällig auftretenden Störgeräuschen. Zunächst wurde die Möglichkeit getestet, ein Signal mit zwei gleichzeitig gesendeten Frequenzen zu erkennen und dieses von Störgeräuschen zu unterscheiden, indem für ein gültiges Signal gefordert wird, dass die Frequenz in der Mitte zwischen den beiden Frequenzen kleiner ist als der nach Gl. 7.1 definierte Pegel (siehe unten). In Abb. 7.9 sind die zeitlichen Verläufe der 4 Ausgabekanäle des DSP dargestellt, wobei auf der linken Seite die Auswertung eines erzeugten Signals und rechts die Auswertung eines Störsignals dargestellt ist.

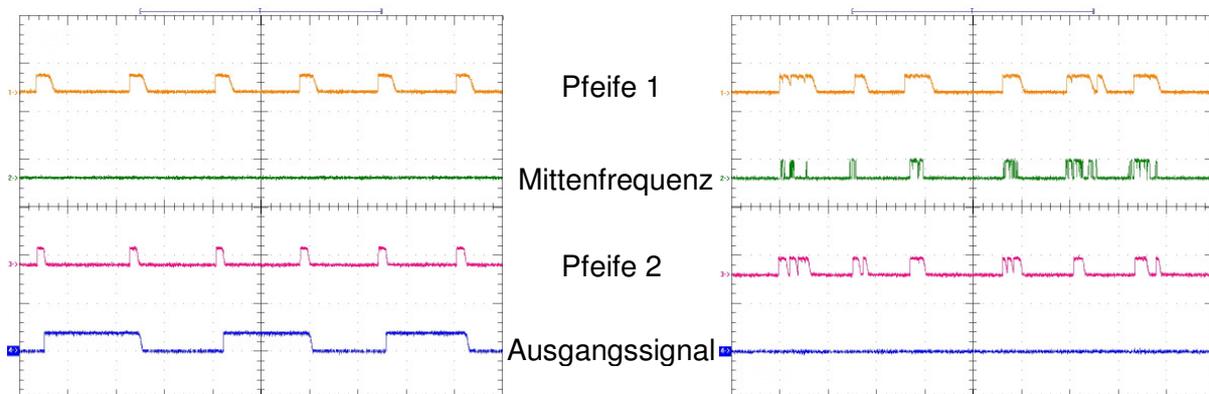


Abb. 7.9: Signalverläufe von Signalen (links) und einem Störgeräuschen (rechts)

Wenn die Frequenzen von Pfeife 1 oder 2, die Mittelfrequenz oder ein gültiges Ausgangssignal erkannt werden, entsteht am jeweiligen Ausgang ein digitales Signal, das zu einem Peak im Auswertungsdiagramm führt. Um die Schaltvorgänge des

Ausgangssignals besser nachvollziehen zu können, wurde dieses Signal mit einer Flip-Flop-Schaltung versehen, die den Pegel des Ausgangssignals bei jedem erkannten Ereignis umschaltete. Andernfalls wären sehr kurze Ausgangssignale entstanden, die nur schwer zu erkennen wären.

Der einfachste Algorithmus wertete zunächst aus, ob die beiden Pfeifenfrequenzen gleichzeitig detektiert wurden. Wenn dies der Fall war und die Mittenfrequenz zwischen den beiden Pfeifenfrequenzen nicht erkannt wurde, schaltete das Ausgangssignal wie links in Abb. 7.9 zu erkennen ist. Da bei dem betrachteten Störgeräusch viele Frequenzen inklusive der Mittenfrequenz angeregt wurden, kam es dabei zu keinem Schaltvorgang (Abb. 7.9 rechts).

Diese Abfragen wurden durch eine statistische Auswertung der Signale realisiert. Nachdem die Frequenzen der Pfeifen beide gleichzeitig erkannt wurden, wurden diese beiden Frequenzen bei den nächsten 15 Programmdurchläufen ausgewertet. Wenn dabei die Pfeifenfrequenzen mindestens zehnmal einen gewissen Pegel in der vom Programm durchgeführten FFT erreichten und die Mittenfrequenz weniger als zehnmal, wurde das ausgewertete Geräusch als ein Signal gewertet.

Anfänglich wurde ein statischer Pegel für die Amplitude definiert über dem der Wert der FFT liegen muss, damit das Programm die Frequenz als erkannt definiert. Die Amplitudenwerte für die 128 in der FFT abgetasteten Frequenzen liegen zwischen 500 – 1.000 für Frequenzen, die durch Grundrauschen erzeugt werden und 20.000 – 30.000 für die Peaks von den Signalen der Ultraschallpfeifen. Für den statischen Pegel wurde der Wert 10.000 definiert, da dadurch viele Frequenzen von Störgeräuschen herausgefiltert werden können.

Als Verbesserung zu dieser Variante wurde ein dynamischer Pegel programmiert, der sich der Umgebungslautstärke anpasst. Zunächst wird ein Durchschnittswert aller Amplituden der 128 Frequenzen gebildet und ein Maximalwert bestimmt. Dann wird der Pegel nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Dyn.Pegel} = 0,3 \cdot \text{Maximum} + 0,7 \cdot \text{Durchschnitt} + 2000 \quad (7.1)$$

Dadurch ist es auch möglich Signale mit relativ zur Umgebungslautstärke geringem Pegel zu erkennen.

- **Zeitliche Kodierung mit Pausen**

Der vorherige Algorithmus hat den Nachteil, dass mit zwei gleichzeitig emittierten Frequenzen nur ein Signal erzeugt werden kann und somit innerhalb eines definierten Frequenzbandes weniger Signale zur Verfügung stehen als bei der zeitlichen Kodierung. Daher sind die Möglichkeiten der Nutzung dieser Signale eingeschränkt und nicht ausreichend für die Anwendung in einer Computertastatur. Außerdem besteht bei dieser Variante noch Verbesserungsbedarf bei der Unterscheidung zwischen Signal und Störgeräusch.

Daher wurde ein neues Programm erstellt, das nach 15 Programmdurchläufen eine statistische Auswertung der aufgenommenen Daten aus der FFT macht. Es wird für 4 Frequenzen abgefragt, wie häufig innerhalb von 15 Durchläufen der Amplitudenwert aus der FFT über dem dynamischen Pegel liegt. Wenn eine Frequenz dabei mehr als 5-mal oberhalb des dynamischen Pegels liegt, wird ein gültiges Signal definiert. Da die Signaldauer ca. 40 ms und ein Schleifendurchlauf ca. 4 ms beträgt, kann das Signal im Idealfall bei 10 Schleifen erkannt werden, aber nicht bei zwei aufeinander folgenden Abfrageperioden. Wenn das Signal weniger als fünfmal erkannt wird, werden die 15 Schleifendurchgänge als Pause gewertet. Allerdings benötigt dieser Algo-

rithmus für jede Pausenlänge mindestens zwei Pausenanzahlen (Abb. 7.10), da die Abfrage kontinuierlich läuft und das Programm nicht mit der Erkennung des ersten Signals startet. Wenn das Eingangssignal z.B. etwas früher empfangen würde, erkennt dieser Abtastalgorithmus anstatt 5 Pausen dann 6 Pausen. Das führte dazu, dass eine relativ lange Zeitspanne benötigt wurde, um diese kodierten Signale zu erkennen. Um dies zu verbessern, musste eine schnellere Auswertung realisiert werden. Gegen Störgeräusche erwies sich diese Programmvariante als unempfindlich und konnte auch bei gezielt erzeugten Störgeräuschen das Signal eindeutig erkennen und durch dieses gesteuert werden.

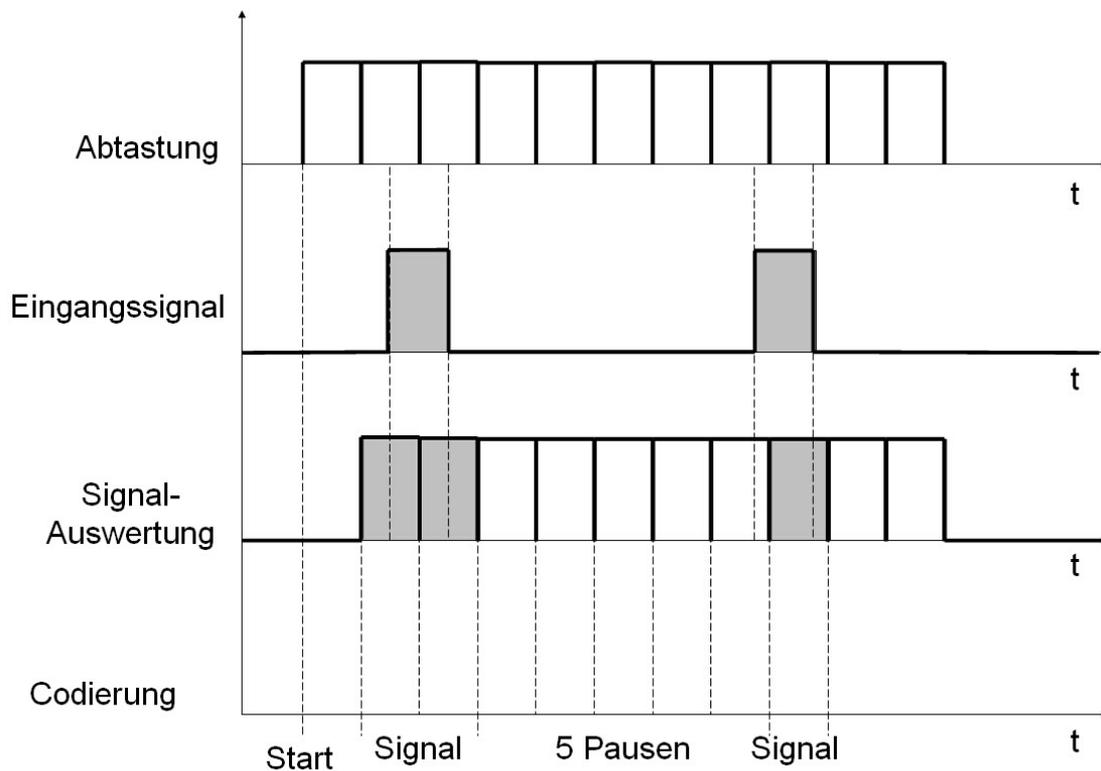


Abb. 7.10: Signalabtastung bei zeitlicher Kodierung

Das Signal kann nach einem Schema ausgewertet werden, das verschiedenen Frequenzabfolgen und Pausenlängen (Tab. 7.2) Ausgangssignale zuweist.

Pausenlänge	160 ms	260 ms	360 ms	460 ms
Pausenanzahl	3 – 4	5 – 6	7 – 8	9 – 10

Tab. 7.2: Anzahl der Pausen in Abhängigkeit der eingestellten Pausenlänge

Diese Ausgangssignale wurden an den 4 LED-Anzeigen als Binärcode angezeigt:

	160 ms	260 ms	360 ms	460 ms
14 – 14 kHz	0 0 0 1	0 0 1 0	0 0 1 1	0 1 0 0
14 – 19 kHz	0 1 0 1	0 1 1 0	0 1 1 1	1 0 0 0
19 – 14 kHz	1 0 0 1	1 0 1 0	1 0 1 1	1 1 0 0
19 – 19 kHz	1 1 0 1	1 1 1 0	1 1 1 1	0 0 0 0

Tab. 7.3: LED-Anzeige für die jeweilige Codierung

Mit diesen Einstellungen konnte das Programm die Signale gut erkennen, wenn beim Sender die Impulslängen, Pausenlängen und der Ansteuerungsdruck exakt eingestellt wurden. Besonders der Ansteuerungsdruck war wichtig, da sich die Frequenz und die Schwingungsdauer der Pfeifen bereits bei geringen Druckschwankungen (5 - 10 % Abweichung) so stark verändern, dass das kodierte Signal nicht mehr vom Programm erkannt wurde.

Um kürzere Signale zu erzeugen, wurde zunächst die Ansteuerdauer der Ventile durch eine neue Ansteuerelektronik auf $T = 10$ ms verringert. Durch die Auswertung von nur noch 3 Programmdurchläufen wurde eine schnellere Signalerkennung realisiert. Allerdings scheint eine einzelne Auswertung der FFT bei jedem Schleifendurchlauf nicht sinnvoll, da keine statistische Auswertung vorgenommen werden kann und somit eine Unterscheidung zwischen Signal und Störgeräusch schwierig wird. Die Ausgangssignale mit Pausenlängen von 90 ms bis 150 ms wurden mit folgenden Pausenanzahlen geschaltet:

	90 ms	110 ms	130 ms	150 ms
14 – 14 kHz	3	4 – 5	6 – 7	8 – 9
19 – 19 kHz	3 -4	5 – 6	7 – 8	9 – 10

Tab. 7.4: Pausenanzahlen für die Kodierung mit einer Abtastungslänge von $n = 5$ Schleifendurchgängen

Damit beträgt die minimale Dauer für ein zeitlich kodierte Signal $T = 110$ ms und es ist möglich Signale zu unterscheiden, deren Pausenlänge um $\Delta T = 20$ ms variiert.

7.3 Empfängersystem LabView

Mehr Möglichkeiten zur Signalauswertung bietet das PC-Programm LabView. Deshalb wurde für die weitere Suche nach einem günstigen Auswerte-Algorithmus dieses Programm verwendet, obwohl in einer realen Anwendung in der Regel kein Computer zur Verfügung steht. Nach der Auswahl eines geeigneten Algorithmus kann dieser jedoch auf einen DSP oder einen ASIC (Analog Signal Integrated Circuit) übertragen werden.

7.3.1 Aufbau Empfängersystem LabView

Der Empfänger bestand bei dieser Variante aus einem Mikrofon mit einem Verstärker, das über einen A/D-Wandler mit dem PC verbunden war (siehe Abb. 7.11). Das verwendete Mikrofon hatte einen symmetrischen Verstärker mit einem einstellbaren Verstärkungsfaktor, der maximal $V = 180$ betrug. Die digitalen Daten vom A/D-Wandler wurden dann durch ein in LabView erstelltes Programm verarbeitet. Dieses Auswertungsprogramm kann wiederum über den A/D-Wandler Ausgangssignale an eine externe Logik ausgeben, die über ein USB-Kabel mit dem PC verbunden ist. Dadurch ist die Eingabe von Ziffern oder Befehlen in Windows-Programme, z.B. den Taschenrechner oder Word möglich.

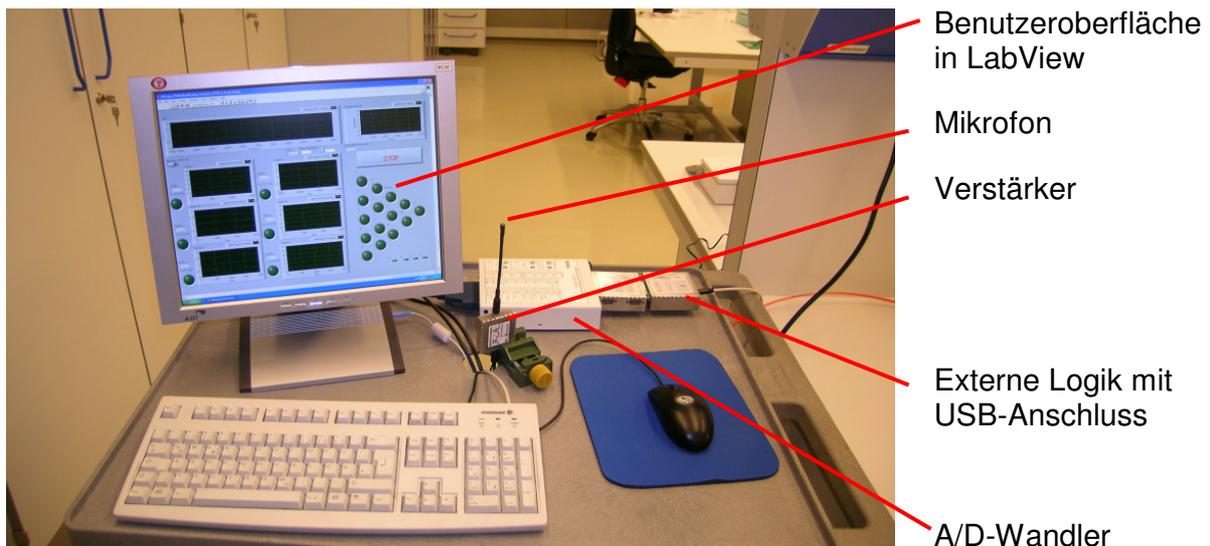


Abb. 7.11: Mit einem PC verbundener Empfänger

Abb. 7.12 zeigt ein in LabView ausgewertetes Signal mit zwei Frequenzen. Für die Aufnahme wurde ein Hochpassfilter programmiert, der nur für Frequenzen über 15 kHz durchlässig ist. Für die Auswertung wird eine bestimmte Amplitudenschwelle (Trigger) festgelegt, unterhalb derer keine Aufzeichnung erfolgt. Erreicht ein Signal diese Schwelle, wird es aufgezeichnet und mittels einer Fourieranalyse die im Signal enthaltenen Frequenzen ermittelt, die unten im Bild dargestellt sind. Oben links ist das ungetriggerte Signal abgebildet, rechts daneben das ausgewertete Signal. Mit diesem Programm wurden sowohl Störgeräusche als auch Signale von sämtlichen untersuchten Ultraschallerzeugern analysiert.

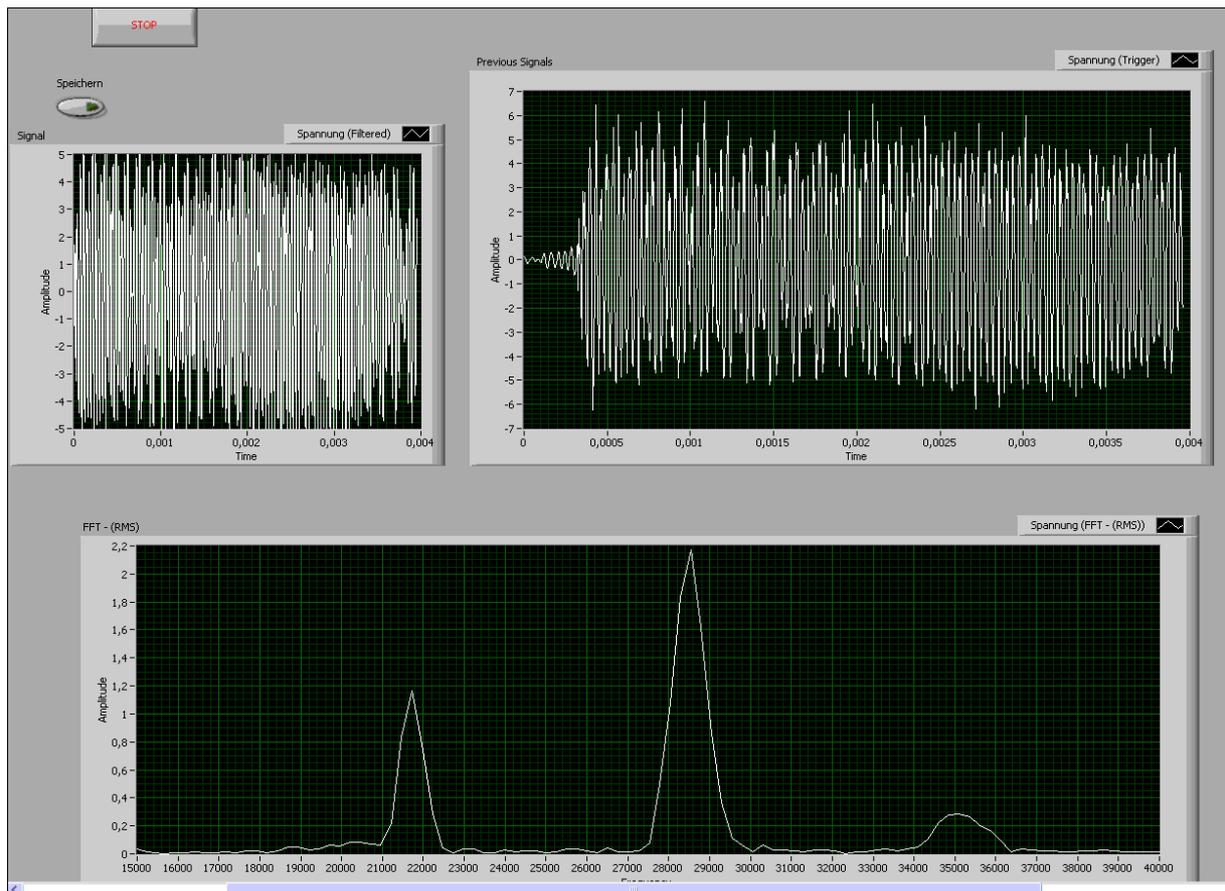


Abb. 7.12: Vom PC-Programm LabView dargestelltes Originalsignal (oben links), gefiltertes Signal (oben rechts) und Frequenzspektrum (unten)

7.3.2 Signalerkennung von zwei zeitgleichen Frequenzen

Um die Erkennung der mit Handbetätigung (Kap. 6.2) erzeugten Signale zu überprüfen, wurde in LabView ein Auswertungsprogramm erstellt, bei dem eingehende Signale auf die sechs Frequenzen der verwendeten Ultraschallpfeifen untersucht werden.

In Abb. 7.13 ist die Aufnahme eines Signals auf dem Controlpanel von LabView dargestellt. Oben links befindet sich ein Fenster mit einem Darstellungsbereich von 15 bis 36 kHz, in dem die beiden Frequenzen der jeweiligen Ultraschallpfeifenkombination angezeigt werden. Rechts daneben werden Intensität und Dauer des erzeugten Signals angezeigt. Im unteren Bereich befinden sich Anzeigefenster, die für die Signalerkennung relevant sind. Links sind sechs Fenster mit den Frequenzbereichen der verwendeten Mikropfeifen angeordnet. Die einzelnen Pfeifen sind aufsteigend nach ihrer Frequenz mit 1 bis 6 bezeichnet. Im vorliegenden Fall wurde das Signal der Mikropfeifenkombination 2-5 erzeugt und auch von der Auswertungssoftware erkannt, erkennbar an den grün leuchtenden Feldern. Rechts daneben befinden sich 15 Felder, die den Mikropfeifenkombinationen zugeordnet sind und die Funktionen eines Taschenrechners abbilden. Der Mikropfeifenkombination 2-5 ist die Ziffer 7 zugeordnet, deren Feld entsprechend leuchtet. Ganz unten rechts befindet sich eine Anzeige für die digitalen Ausgaben.

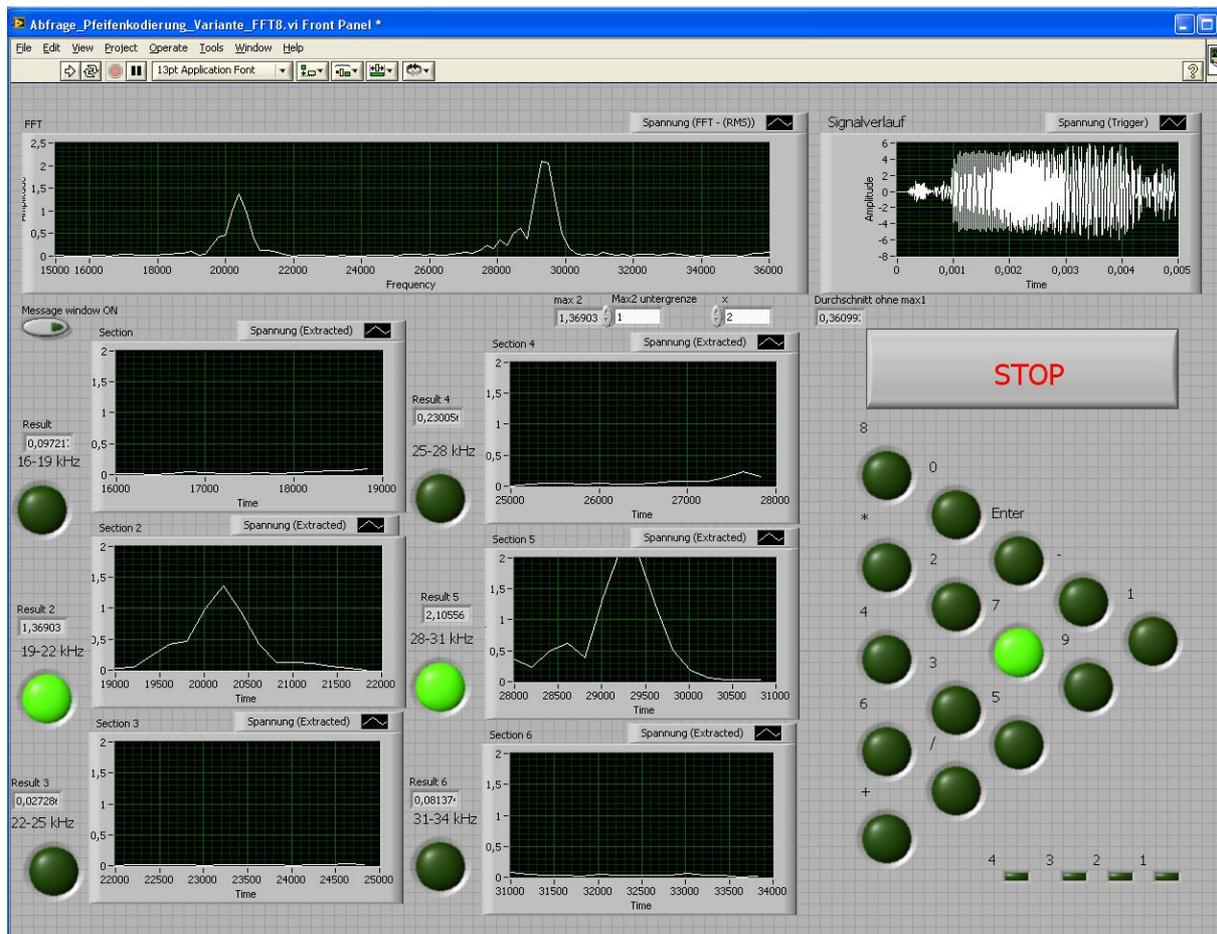


Abb. 7.13: Signalerkennung in LabView

Für eine sichere Signalerkennung wurden folgende Bedingungen programmiert:

- Frequenzen außerhalb des Bereichs der Signale werden ignoriert
- Eine Frequenz wird erst ab einer bestimmten Amplitude, in diesem Fall 1 V aufgezeichnet
- Nur wenn zwei Frequenzmaxima erkannt werden, erfolgt die Signalerkennung
- Das Maximum des zweithöchsten Frequenzmaximums muss doppelt so groß sein wie der Durchschnitt der bei den übrigen vier Signalfrequenzen ermittelten Amplituden

Die letzte Bedingung verhindert eine Fehlerkennung von Umgebungsgeräuschen, in denen zufällig Frequenzen der Signale enthalten sind, da bei Geräuschen keine diskreten Frequenzmaxima auftreten, sondern ein ganzes Spektrum von Frequenzen mit ähnlich großen Amplituden erzeugt wird.

Um die Qualität der Signalerkennung zu testen, wurden mit jeder der 15 hergestellten Pfeifenkombinationen jeweils 50 Aufnahmen in LabView aufgezeichnet und die Anzahl der Fehler (keine Signalerkennung oder Interpretation als anderes Signal) in Tab. 7.7 notiert.

Kombination						
Pfeife	1	2	3	4	5	6
1	-	1	2	4	2	3
2	-	-	3	3	5	6
3	-	-	-	0	1	10
4	-	-	-	-	3	9
5	-	-	-	-	-	0

Tab. 7.5: Anzahl der Erkennungsfehler bei 50 Betätigungen jedes Signals

7.3.3 Signalerkennung mit Frequenzverschiebung in LabView

Um die Temperatur- und Druckabhängigkeit (Kap. 6.1) der Ultraschallpfeifen auszugleichen, wurden die Auswertelgorithmen weiter entwickelt. Dabei werden zwei Eigenschaften als Auswertekriterien herangezogen, um zwei gleichzeitige Pfeifenfrequenzen zu erkennen. Zunächst wird der Quotient der beiden Frequenzen gebildet. Darüber hinaus kann die absolute Frequenz zur Unterscheidung herangezogen werden, um Pfeifenpaare von einander zu unterscheiden, die zwar dasselbe Frequenzverhältnis aufweisen, deren absolute Frequenzen sich aber ausreichend deutlich unterscheiden. Zunächst betrachten wir, wie viele Frequenzen im Ultraschallbereich zwischen 18 kHz und 50 kHz eindeutig unterschieden werden können. Dazu werden Mittenfrequenzen f_M mit dazu gehörigen Bereichen von $\pm 10\%$ bestimmt.

Frequenz f_M $\pm 10\%$	Faktor							Kombinationen
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	...	2,8	
16,2	17,8	19,4	21,1	22,7	24,3	...	43,7	
18,0	19,8	21,6	23,4	25,2	27,0	...	48,6	17
19,8	21,8	23,8	25,7	27,7	29,7	...	53,4	
19,9	21,9	23,9	25,9	27,8	29,8	...		
22,1	24,3	26,5	28,7	30,9	33,2	...		13
24,3	26,7	29,2	31,6	34,0	36,5	...		
24,4	26,8	29,3	31,7	34,1	36,6	...		
27,1	29,8	32,5	35,2	37,9	40,7	...		8
29,8	32,8	35,8	38,8	41,7	44,7	...		
29,9	32,9	35,9	38,8	41,8	44,8			
33,2	36,5	39,8	43,2	46,5	49,8			5
36,5	40,2	43,8	47,5	51,1	54,8			
36,6	40,2	43,8						
40,6	44,7	48,7						2
44,7	49,1	53,6						$\Sigma = 45$

Tab. 7.6: Kombinationsmöglichkeiten von Frequenzen, die durch Abfrage ihres Verhältnisses zueinander und ihrer absoluten Frequenz unterschieden werden

Der Abweichungsbereich von $\pm 10\%$ entspricht dem Frequenzbereich, den eine Ultraschallpfeife in Abhängigkeit von Ansteuerungsdruck und Temperatur erzeugt. Daraus können 5 Mittenfrequenzen mit ihren jeweiligen Bereichen bestimmt werden, die sich gerade nicht überschneiden (Tab. 7.6 Spalte 1). Damit ist die erste Frequenz eindeutig bestimmt und aus dem Quotienten der zweiten und ersten Frequenz ergibt sich dann der Faktor durch den die Kombinationen eindeutig definiert sind. Die angegebenen Faktoren werden in der Auswertungssoftware mit einem Toleranzbereich von $\pm 0,05$ abgefragt, sodass die abgefragten Frequenzen nicht exakt das in Tab. 7.6 angegebene Verhältnis aufweisen müssen. Dadurch können betätigungsbedingte Abweichungen des Verhältnisses (Tab. 6.3) kompensiert werden und fertigungsbedingte Abweichungen der Mittenfrequenz (6.24) zum Teil ausgeglichen werden.

In Abb. 7.14 ist die Bedienungsoberfläche des in LabView geschriebenen Auswertungsprogramms für die gleichzeitige Erkennung von zwei bestimmten Frequenzen dargestellt, welches die Frequenzkombinationen nach dem erläuterten Algorithmus unterscheiden kann. Im oberen Bereich ist der Schwingungsverlauf eines simulierten Signals mit einer Länge von $T = 5$ ms und den beiden Frequenzen 22,1 und 24,5 kHz (siehe FFT unterhalb) angezeigt. Daraus ergibt sich ein Verhältnis der Frequenzen von $V = 1,133$ und dadurch in der Auswertungstabelle die erste Faktorspalte und die zweite Mittenfrequenzzeile wie in der Tab. 7.6 zu erkennen ist.

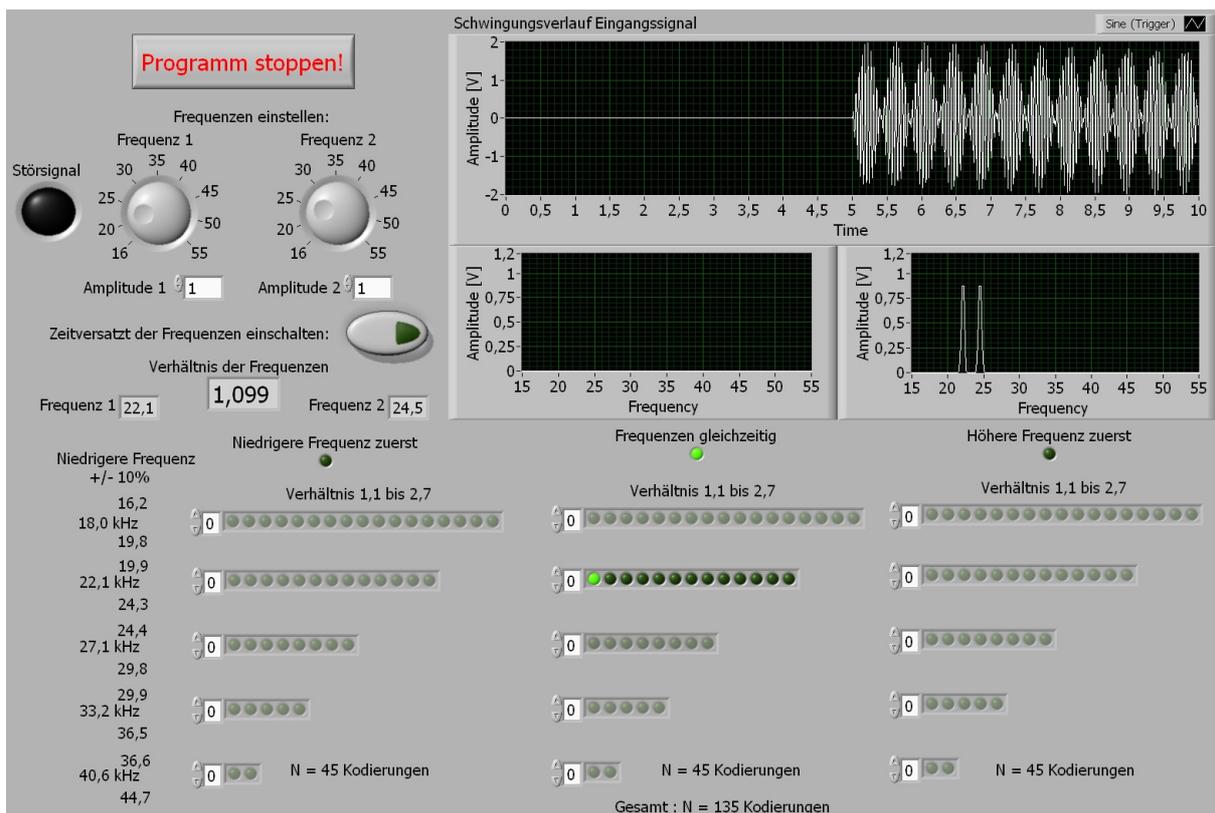


Abb. 7.14: Erkennung von zwei gleichzeitigen Ultraschallfrequenzen über die Faktorabfrage beider Frequenzen zueinander und der absoluten Frequenz

In der nächsten Variante des Programms wird ein zeitlich versetztes Signal mit zwei unterschiedlichen Frequenzen simuliert und von der Software ausgewertet. Dieses Signal besteht zunächst aus einer $T = 5$ ms langen Schwingung mit $f = 18,0$ kHz und danach aus einer Schwingung mit zwei Frequenzen von 18,0 und 34,9 kHz. Dabei wird der zweite Teil des Signals so ausgewertet wie oben erläutert und in Abb. 7.15

gezeigt. Als zusätzliches Kriterium wird abgefragt, ob in dem Zeitraum $T = -5$ ms vor den beiden Frequenzen entweder keine, die niedrigere oder die höhere der beiden erkannten Frequenz aufgetreten ist. Durch diese erweiterte Abfrage können die $N = 45$ gleichzeitigen Kodierungen dreifach abgefragt werden und man erhält insgesamt $N_{\text{Ges}} = 135$ Kodierungsmöglichkeiten.

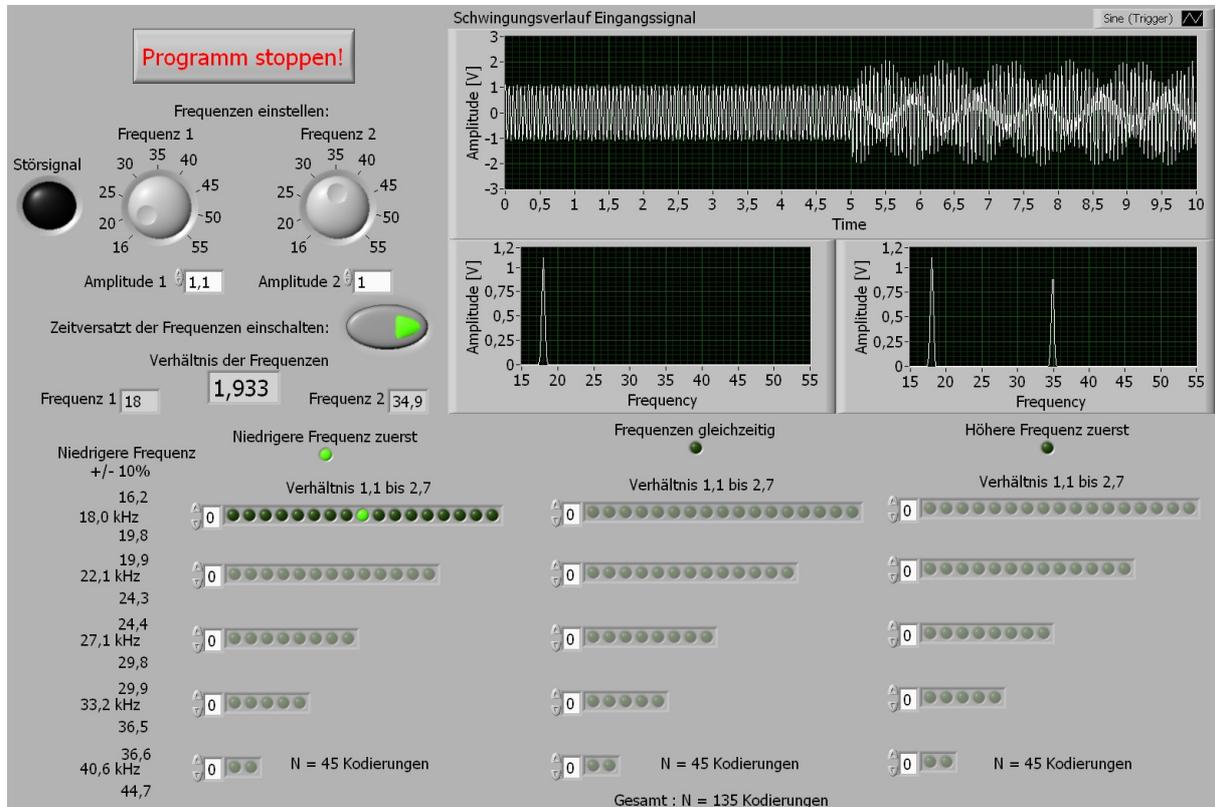


Abb. 7.15: Erkennung von zwei zeitlich versetzten Ultraschallfrequenzen über die Faktorabfrage beider Frequenzen zueinander und der absoluten Frequenz

Die beiden gleichzeitig auftretenden Frequenzen werden von dem Programm ausgewertet, indem zunächst die Frequenz f_{MAX1} und die Amplitude A_{MAX1} des höchsten Peaks bestimmt werden. Dann werden die Daten der FFT in dem Frequenzbereich $F = f_{\text{MAX1}} \pm 1$ kHz gelöscht und in den restlichen Daten der Peak mit der nächst größten Höhe detektiert. Wenn eine weitere Amplitude A_{MAX2} aus diesen Daten bestimmt werden kann, die einen gewissen Wert $A_{\text{MIN}} = 0,1$ V und mindestens die halbe Amplitude von A_{MAX1} überschreitet, so wird eine zweite Frequenz f_{MAX2} als Signalbestandteil erkannt. Für eine zusätzliche Abfrage zur Abgrenzung von Störgeräuschen wird der Frequenzbereich $F = f_{\text{MAX2}} \pm 1$ kHz ebenfalls aus den Daten der FFT gelöscht. Aus den Restdaten können eine dritte maximale Amplitude A_{MAX3} und eine durchschnittliche Amplitude bestimmt werden. Die durchschnittliche Amplitude darf nicht höher als 10% von A_{MAX1} betragen und die maximale Amplitude A_{MAX3} nicht mehr als 50% von A_{MAX2} , damit sichergestellt ist, dass es sich nicht um ein Störgeräusch handelt.

Für die Erkennung von Signalen entsprechend Abb. 6.21 und Abb. 6.22, die zwei ausgeprägte Peaks aufweisen, ist dieser Algorithmus gut geeignet. Die in Abb. 6.22 dargestellten betätigungsabhängigen Frequenzverschiebungen können vollständig kompensiert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist es gelungen, kodierte Ultraschallsignale rein mechanisch durch manuelle Betätigung einer Taste zu erzeugen. Dies wurde mit zwei prinzipiell unterschiedlichen Methoden erreicht: Durch Ultraschallpfeifen und schwingende Balken. Die hauptsächlich untersuchte Variante ist die Signalerzeugung mit Ultraschallpfeifen, die mit Silikonbälgen angesteuert wurden. Dabei ist es gelungen, die Voraussetzungen für die Herstellung einer kodierten Ultraschalltastatur zu schaffen und einen Prototyp in Form eines kabellosen Ziffernblocks mit 15 Signalen herzustellen (Abb. 8.1).

Für die Signalerzeugung wurden Ultraschallpfeifen mit 6 unterschiedlichen Frequenzen verwendet und jeweils zwei Pfeifen zur Erzeugung eines Signals kombiniert. Ein Signal besteht daher aus zwei Tönen unterschiedlicher Frequenzen, die über Druck auf die Taste einer PC-Tastatur erzeugt werden.

Durch Experimente wurde nachgewiesen, dass eine eindeutige Identifizierung der erzeugten Signale und insbesondere eine Unterscheidung von zufälligen Geräuschen in der Umgebung grundsätzlich gegeben sind. Durch weitere Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Anzahl der Signale z.B. durch zeitliche Kodierung mit Hilfe einfacher konstruktiver Änderungen deutlich erhöht werden kann, und so z.B. die Herstellung einer kabel- und batterielosen Tastatur mit Ultraschallpfeifen möglich ist.



Abb. 8.1: Platte mit Signalgebern für die Verwendung in einem kabellosen Ziffernblock

Die Frequenz der mit den Ultraschallpfeifen erzeugten Signale ist vom Ansteuerungsdruck und der Temperatur abhängig und weicht um bis zu $\pm 10\%$ vom jeweiligen Mittelwert ab. Fehler bei der Signalerkennung durch Temperatur- und Druckabhängigkeit können durch Abfrage der Verhältnisse der beiden Signalfrequenzen zueinander ausgeschlossen werden.

Des Weiteren wurden in ihrer Eigenfrequenz schwingende Balken genutzt um Ultraschallsignale zu erzeugen. Diese Methode der Signalerzeugung hat die prinzipiellen Vorteile, dass keine Abhängigkeit der Frequenz vom Anschlagmechanismus und nur eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit (Frequenzabweichungen von ca. 0,5%) bestehen. Dagegen sind der Anregungsmechanismus und die Aufhängung der Balken mit größerem Aufwand herzustellen, sodass von der weiteren Verfolgung dieser Variante im Rahmen dieser Arbeit abgesehen wurde. Allerdings sind die Voraussetzungen und Ansätze für eine weitere Verfolgung dieser Methode durchaus viel versprechend und für Anwendungen mit geringeren Schaltfrequenzen interessant, da die untersuchten Balken ca. 50-fach längere Signale erzeugen als die Ultraschallpfeifen. Die längeren Signale haben jedoch den Vorteil, dass die Frequenzen genauer gemessen werden können und so mehr Frequenzen voneinander unterscheidbar sind.

9 Literaturverzeichnis

- [1.1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU, „Zweites Programm der Bundesrepublik Deutschland zur Verminderung der Umweltbelastungen aus Batterien und Altbatterien“, Stand: 11. Juli 2007
- [1.2] Adler, Robert “Control System” US Patent Nr. 2817025, Anmelder: Zenith Radio Corporation United States Patent Office, Patentiert 17.12.1957
- [1.3] Schröder, Wolfgang „Ultraschallsender zur Fernbedienung von Rundfunk- und Fernsehgeräten“ DE 2329740 Anmelder: Standard Elektrik Lorenz AG Stuttgart, Angemeldet 12.06.1973
- [1.4] Dangschat, Rainer „Fernseh-Empfänger mit Infrarot-Fernbedienung“ Anmelder: Siemens AG, Anmelde­nummer DE 3137081, Anmeldedatum 17.09.1981
- [1.5] Website Stand Oktober 2008: www.zenith.com
- [2.1] H. Kuttruff, „Physik und Technik des Ultraschalls“, Hirzel Verlag (1988)
- [2.2] Website Stand Juni 2005: <http://www.bmtp.akh-wien.ac.at>
- [2.3] S. S. Stevens, F. Warshofsky, „Schall und Gehör“, Life – Wunder der Wissenschaft (1966)
- [2.4] M. Vorländer, „Technische Akustik I“, Vorlesungsskript (2004)
- [2.5] K. Winkler „Die Physik der Musikinstrumente“, Spektrum Akademischer Verlag (1992)
- [2.6] H. Kuchling, „Taschenbuch der Physik“, Fachbuchverlag Leipzig 18. Auflage (2004)
- [2.7] Owen Cramer, „The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration“, JASA 93 (5), (1993)
- [2.8] L. Bergmann, C. Schäfer, „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1“, de Gruyter (1990)
- [2.9] Website Stand April 2008:
<http://www.iqo.uni-hannover.de/ap/versuche/A06b.pdf>
- [2.10] J. G. Roederer, „Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik“, Springer-Verlag (1993)
- [2.11] Karl-Dirk Kammeyer, Kristian Kroschel: *Digitale Signalverarbeitung*. 6. Auflage. Teubner, 2006
- [2.12] W.K. Schomburg, Vorlesung „Konstruktion in der Mikrotechnik II“, KEmikro, RWTH Aachen (2006)
- [2.13] R. Midgley, „Musikinstrumente der Welt“, Orbis Verlag (1988)
- [2.14] H. Simbriger, A. Zehelein, „Handbuch der musikalischen Akustik“, Josef Habbel Verlag (1974)
- [2.15] N. H. Fletcher, T.D. Rossing, „The Physics of Musical Instruments“, Springer Verlag (1991)

- [3.1] R.D. Blevins, "Formulas for Natural Frequency and mode Shape", KRIEGER PUBLISHING COMPANY (2001)
- [3.2] D. Weichert, „Festigkeitslehre“, Vorlesungsskript Mechanik (1998)
- [3.3] W. Beitz, K.-H. Grote, „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, Springer (2001)
- [3.4] L. Bergmann, C. Schäfer, „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1“, de Gruyter (1990)
- [3.5] Aluminium-Taschenbuch, 3 Bde., Bd.2, Umformen von Aluminium Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökol: BD 2 (Sondereinband) von Günter Drossel (Autor), S. Friedrich (Autor), W. Huppatz (Autor)
- [4.1] K. Winkler „Die Physik der Musikinstrumente“, Spektrum Akademischer Verlag (1992)
- [4.2] H. Ising, „Klangerzeugung in Orgelpfeifen“ , Technische Universität Berlin, Diss. (1969)
- [4.3] H. v. Helmholtz, „Lehre von den Tonempfindungen“, Verlag Vieweg Braunschweig (1877)
- [4.4] J. W. Rayleigh, „Theory of sound II“, 2. Auflage London (1929)
- [4.5] A. Bamberger, „Experimental and Numerical Investigation of Edge Tones“, Berlin (2001)
- [4.6] Website Stand September 2002:
<http://members.aol.com/ReinerJank/emden.htm>
- [4.7] Website Stand September 2009:
<http://www.uibk.ac.at/exphys/museum/html/details/mech/ultraschall.html.de>
- [5.1] P. Khuntontong, T. Blaser, W.K. Schomburg, "Ultrasonic micro hot embossing of thermoplastic polymers", Proc. 24th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, PPS24, Salerno, Italy, June 15-19 (2008) Seite II.364, „Experimental and Numerical Investigation of Edge Tones“, Berlin (2001)
- [5.2] K. Burlage, „Batterielose Fernbedienung mit kodierter Signalübertragung durch Ultraschallpfeifen“, Diplomarbeit bei KEmikro (2008)
- [6.1] Website Stand Mai 2009:
<http://www.ekulit.de/fileadmin/Bilder/produkte/mikrofone/200033%20EMY-63MP.pdf>