



ÜBERPRÜFUNG ELEKTRISCHER PARAMETER VON MINIATURLAUTSPRECHERN FÜR DIE VERWENDUNG IN HAUSHALTSGERÄTEN

TONINGENIEURPROJEKT

Michael Aurenhammer und Nadja Hölzl

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Technische Universität Graz

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Institutsleiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Graz, Juni 2023

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Theorie der Wandlerprinzipien | 2 |
| 2.1 | Dynamischer Wandler | 2 |
| 2.2 | Elektromagnetischer Wandler | 3 |
| 2.3 | Piezoelektrischer Wandler | 4 |
| 2.4 | MEMS Schallwandler | 5 |
| 2.4.1 | MEMS mit elektrostatischer Schallerzeugung | 5 |
| 2.4.2 | MEMS mit elektrodynamischer Schallerzeugung | 6 |
| 2.4.3 | MEMS mit piezoelektrischer Schallerzeugung | 6 |
| 2.4.4 | MEMS mit thermoakustischer Schallerzeugung | 7 |
| 3 | Messungen der Schallwandler | 8 |
| 3.1 | Messaufbau und Messprocedere | 8 |
| 3.2 | Elektrodynamische Lautsprecher | 11 |
| 3.2.1 | Visaton K 28.40 | 11 |
| 3.2.2 | Visaton K 23 | 13 |
| 3.2.3 | Visaton K 70 | 15 |
| 3.2.4 | Visaton BF 37 - 4 Ohm Version | 16 |
| 3.2.5 | Visaton K 40 | 18 |
| 3.3 | Elektromagnetische Buzzer | 20 |
| 3.3.1 | TDK SDC1610M5 | 20 |
| 3.3.2 | DBX05LFX050N | 21 |
| 3.4 | Piezoelektrische Buzzer | 24 |
| 3.4.1 | RS PRO 12x12 | 24 |
| 3.4.2 | RS PRO 17 | 26 |
| 3.4.3 | RS PRO 13.8 | 28 |
| 3.4.4 | RS PRO 27 | 29 |
| 3.4.5 | CSPT12A03 | 30 |
| 4 | Diskussion der Messergebnisse | 32 |
| 4.1 | Elektrodynamische Lautsprecher | 32 |
| 4.1.1 | Strom-, Spannungs- und Impedanzverlauf | 32 |
| 4.1.2 | Membranauslenkung | 32 |
| 4.1.3 | Resonanzfrequenz | 33 |
| 4.1.4 | Erklärung der Begriffe "Nennbelastbarkeit" und "Musikbelastbarkeit" | 34 |
| 4.2 | Elektromagnetische Buzzer | 34 |
| 4.3 | Piezoelektrische Buzzer | 35 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 36 |

Literaturverzeichnis

- [1] Manfred Zollner und Eberhard Zwicker. *Elektroakustik*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. ISBN: 978-3-540-56600-7 978-3-642-58003-1. DOI: 10.1007/978-3-642-58003-1. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-58003-1> (besucht am 14.04.2023).
- [2] Haoran Wang u. a. „Review of Recent Development of MEMS Speakers“. In: *Micromachines* 12.10 (16. Okt. 2021), S. 1257. ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi12101257. URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/10/1257> (besucht am 20.04.2023).
- [3] Abdullah Saleh Algamili u. a. „A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices“. In: *Nanoscale Research Letters* 16.1 (26. Jan. 2021), S. 16. ISSN: 1556-276X. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7. URL: <https://link.springer.com/10.1186/s11671-021-03481-7> (besucht am 21.04.2023).
- [4] A Fargas Marques, R Costa Castello und A M Shkel. „MODELING THE ELECTROSTATIC ACTUATION OF MEMS. STATE OF THE ART 2005“. In: (2005).
- [5] Minhang Bao. *Comb Drive Actuator*. 2005. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/comb-drive-actuator> (besucht am 14.06.2023).
- [6] E. Sturtzer u. a. „High fidelity microelectromechanical system electrodynamic micro-speaker characterization“. In: *Journal of Applied Physics* 113.21 (7. Juni 2013), S. 214905. ISSN: 0021-8979, 1089-7550. DOI: 10.1063/1.4808334. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4808334> (besucht am 17.04.2023).
- [7] Gabriel L. Smith u. a. „PZT-Based Piezoelectric MEMS Technology“. In: *Journal of the American Ceramic Society* 95.6 (Juni 2012). Hrsg. von D. J. Green, S. 1777–1792. ISSN: 00027820. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2012.05155.x. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1551-2916.2012.05155.x> (besucht am 20.04.2023).
- [8] Sijie Yang und Qingsong Xu. „A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers“. In: *Journal of Micro-Bio Robotics* 13.1 (Okt. 2017), S. 1–14. ISSN: 2194-6418, 2194-6426. DOI: 10.1007/s12213-017-0098-2. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s12213-017-0098-2> (besucht am 21.04.2023).
- [9] P. La Torraca u. a. „Linearization of thermoacoustic loudspeakers by adaptive predistortion“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 297 (Okt. 2019), S. 111551. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111551. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424719307903> (besucht am 14.06.2023).
- [10] Blake J. Mason u. a. „Thermoacoustic Transduction in Individual Suspended Carbon Nanotubes“. In: *ACS Nano* 9.5 (26. Mai 2015), S. 5372–5376. ISSN: 1936-0851, 1936-086X. DOI: 10.1021/acsnano.5b01119. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.5b01119> (besucht am 14.06.2023).
- [11] J J Brown u. a. *Ultrathin thermoacoustic nanobridge loudspeakers from ALD on polyimide*. 2016. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/27/47/475504/meta?casa_token=QNEtAq6ZHpuAAAAA:f5KrPNaERMqjlcx98isxsulGZJY1FY-C4ZMM9GAAe_WiEYmbaFUdyEVAD-ICFwXg0VEz0nWsfq (besucht am 14.06.2023).
- [12] Klippel. *Manual LPM*. Klippel Analyzer System. (Besucht am 15.04.2023).
- [13] VISATON GmbH & Co. KG. *Visaton K 28.40 Art. No. 2945 – 8 Ω Datasheet*. 2021. URL: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/K%2028.40_2945.pdf (besucht am 15.04.2023).
- [14] VISATON GmbH & Co. KG. *Visaton K 23 Art. No. 2820 – 8 Ω Datasheet*. 2021. URL: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/K%2023_2820.pdf (besucht am 15.04.2023).

- [15] Visaton Germany. *Visaton K 70 Art. No. 2973 8 Ω Datasheet*. 2023. URL: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/K%2070_2973.pdf (besucht am 14.04.2023).
- [16] VISATON GmbH & Co. KG. *Visaton BF 37 Art. No. 2260 – 4 Ω Datasheet*. 2021. URL: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/BF%2037_2260_2261_0.pdf (besucht am 15.04.2023).
- [17] VISATON GmbH & Co. KG. *Visaton K 40 Art. No. 2840 – 8 Ω Datasheet*. 2021. URL: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/K%2040_2840_2841_0.pdf (besucht am 15.04.2023).
- [18] TDK. *Electromagnetic Buzzers SDC series Datasheet*. 2013. URL: <https://docs.rs-online.com/e300/0900766b81566646.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [19] DB. *MAGNETIC TRANSDUCER DBX*. URL: <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/138740.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [20] RS-Pro. *NewRS Surface Mount Electromagnetic Buzzer RS Stock 837-7856*. URL: <https://docs.rs-online.com/a988/0900766b8158448f.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [21] RS-Pro. *PCB Mount Continous External Piezo Buzzer RS Stock number 457-011*. URL: <https://docs.rs-online.com/c67b/0900766b8157f471.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [22] RS-Pro. *RS PRO 80dB, Through Hole Continuous Internal Piezo Buzzer RS Stock No 511-7620*. URL: <https://docs.rs-online.com/6a6c/A700000008880879.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [23] RS-Pro. *Piezo Electric Transducer 15Vpp RS Stock number 724-3162*. URL: <https://docs.rs-online.com/ddb6/0900766b815817d8.pdf> (besucht am 15.04.2023).
- [24] LTD. CHANGZHOU CHINASOUND ELECTRONICS CO. *CSPT12A03-4.0F Chinasound SMD Piezo Transducer 12mm length*. URL: https://v1.cecdn.yun300.cn/130001_2101265066/CSPT12A03-4.0F-C2.pdf (besucht am 15.04.2023).
- [25] VISATON GmbH Co. KG. *Nennbelastbarkeit*. URL: <https://www.visaton.de/de/service/technische-grundlagen/lexikon/nennbelastbarkeit> (besucht am 20.05.2023).
- [26] VISATON GmbH Co. KG. *Musikbelastbarkeit*. URL: <https://www.visaton.de/de/service/technische-grundlagen/lexikon/musikbelastbarkeit> (besucht am 20.05.2023).
- [27] ÖVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik Austrian Standards Institute. „ÖVE/Ö-NORM EN 60268-5“. In: (2010).

1

Einleitung

Kühl- und Gefriergeräte müssen energieeffizient und funktional für die Industrie und zusätzlich ansprechend für den Privatkunden sein. Mit der Zunahme an Smart-Home-fähigen Geräten sind auch die Ansprüche an die verbaute Audiotechnik in Haushaltsgeräten enorm gestiegen. Je nach Anforderung werden entweder elektrodynamische Lautsprecher für komplexere Klänge und Melodien oder elektromagnetische oder piezoelektrische Buzzer für eher schmalbandige Piepstöne verbaut.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Überprüfung der elektrischen Parameter von diversen Miniaturlautsprechern, welche für zukünftige Produktionsserien in Betracht gezogen werden. Ziel der Arbeit ist es, die verschiedenen Miniaturlautsprecher in ihrer Funktionsweise durch Anlegen diverser Spannungssignale zu untersuchen und elektrisch zu messen. Im Anschluss wurden sie auch teilweise zerlegt, um genaueren Aufschluss über das Innere der Systeme zu erhalten. Gemessen wurden die elektrischen Parameter ausschließlich mit dem Klippel-System.

In Kapitel 2 werden vorerst die verschiedenen zugrunde liegenden Wandlerprinzipien kurz erklärt. Zusätzlich zu den elektrodynamischen, elektromagnetischen und piezoelektrischen Wandlern, welche im Laufe der Arbeit vermessen wurden, werden auch MEMS-Schallwandler in Bezug auf ihr Funktionsprinzip und ihre Eigenschaften untersucht. Anschließend folgt in Kapitel 3 (Messungen der Schallwandler) eine Übersicht der gemessenen Schallwandler, eine Erklärung wie die Messungen durchgeführt wurden, eine genaue Auflistung der einzelnen Schallwandler und deren Messergebnisse. In Kapitel 4 werden die Messergebnisse diskutiert und in Kapitel 5 wird die Arbeit kurz zusammengefasst und mögliche nächste Schritte diskutiert.

2

Theorie der Wandlerprinzipien

2.1 Dynamischer Wandler

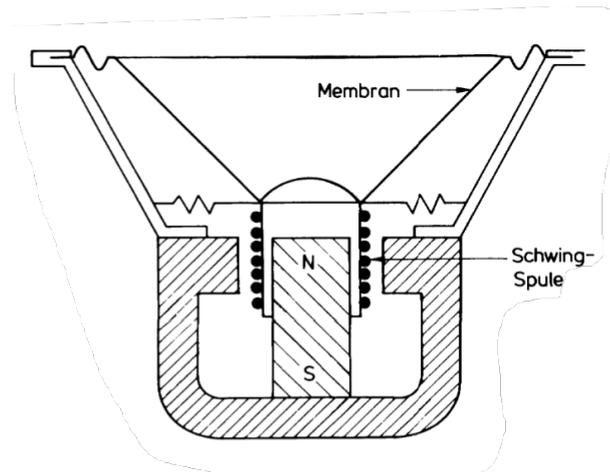


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines elektrodynamischen Lautsprechers [1, S.171]

In Abbildung 2.1 ist eine schematische Darstellung eines dynamischen Lautsprechers zu sehen. Es wird eine Schwingspule im Luftspalt innerhalb eines Magnetfeldes eines Permanentmagneten bewegt. Die Membranaufhängung wird aus einem weichen und elastischen Material hergestellt, welches die Dämpfung und Steifigkeit des Lautsprechers bestimmt. Die relevante Masse des Lautsprechers setzt sich aus allen sich bewegenden Teilen des Systems zusammen. Zur Erhöhung der Stabilität und Steifigkeit wird meist eine konusförmige Membran für Tief- und Mitteltöner eingesetzt. In Abbildung 2.2 ist das Ersatzschaltbild des realen dynamischen Wandlers zu sehen. Dieses gilt auch für den elektromagnetischen Wandler, nur mit einer anderen Wandlerkonstante [1, S.171].

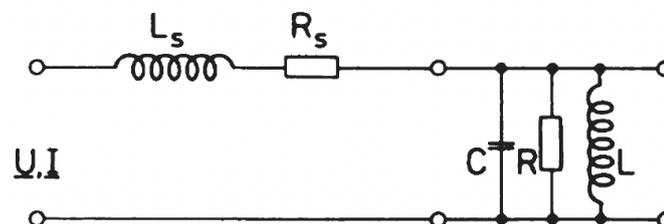


Abbildung 2.2: Ersatzschaltbild des realen dynamischen und elektromagnetischen Wandlers [1, S.173]

L_s und R_s stellen die Induktivität und den elektrischen Widerstand der Schwingspule dar. C , R und L stellen die über die FI-Analogie konvertierten mechanischen Größen der Masse, Dämpfung und Feder als Kapazität, elektrischen Widerstand und Induktivität dar.

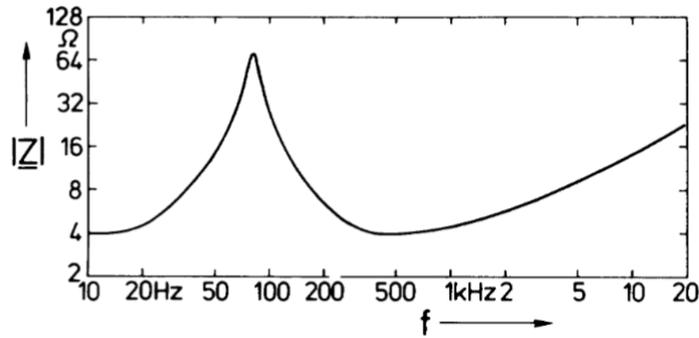


Abbildung 2.3: Elektrische Eingangsimpedanz des akustisch kurzgeschlossenen realen dynamischen Wandlers [1, S.173]

Abbildung 2.3 zeigt den elektrischen Impedanzverlauf eines akustisch kurzgeschlossenen realen dynamischen Wandlers. Im tieffrequenten Bereich nähert sich der Impedanzwert der Gleichstromimpedanz des Leitungsdrahtes der Spule an, in diesem Fall 4Ω . Um 80 Hz befindet sich die Resonanzspitze, bei welcher die Lautsprechermembran die maximale Auslenkung erreicht. Bei hohen Frequenzen fällt das induktive Verhalten der Schwingspule ins Gewicht, dies hat einen Anstieg der Impedanz des Systems mit zunehmender Frequenz zur Folge.

2.2 Elektromagnetischer Wandler

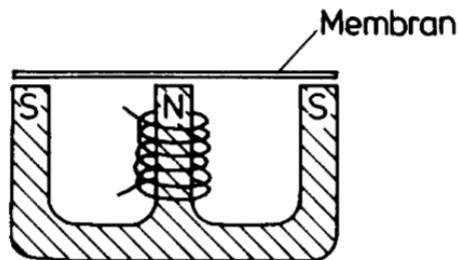


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Wandlers [1, S.176]

In Abbildung 2.4 ist schematisch ein rotationssymmetrischer Wandler mit elektromagnetischem Prinzip abgebildet. Im Unterschied zum elektrodynamischen Lautsprecher ist beim elektromagnetischen Prinzip in der Regel die Spule fixiert. Der bewegliche Teil ist ein federnd gelagertes Metallplättchen, welches bei Bewegung eine Luftspalt- und Magnetfeldänderung des Systems zur Folge hat. Als Ersatzschaltbild kann Abbildung 2.2 herangezogen werden, da sich der elektromagnetische Wandler analog zum elektrodynamischen Prinzip verhält. Lediglich sind durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Schnelle der Membran und der Ausgangsspannung des Wandlers die Wandlergleichungen aus einer gekrümmten Kennlinie entstanden, welche linearisiert wurde [1, S.176].

2.3 Piezoelektrischer Wandler

Piezoelektrische Wandler basieren auf dem piezoelektrischen Prinzip, nachdem gewisse Materialien unter mechanischer Krafteinwirkung eine elektrische Spannung erzeugen. In Abbildung 2.5 ist ein piezoelektrischer Wandler, bestehend aus einer Aluminiumscheibe, auf welcher eine Piezokristallscheibe aufgebracht ist, dargestellt. Wird die Piezokristallscheibe durch auftretende Schallwellen verformt, entsteht eine elektrische Spannung an den Anschlussklemmen. Wird hingegen eine elektrische Spannung angelegt, fungiert der Wandler umgekehrt als Lautsprecher. Bei unseren Modellen befinden sich fast alle Piezo Buzzer in einem zylindrischen Kunststoffgehäuse mit runder Lochöffnung. Dieses Gehäuse dient, zusätzlich zum mechanischen Schutz, auch als Helmholtzresonator bei der Resonanzfrequenz des Lautsprechers, um dessen Effizienz zu erhöhen.

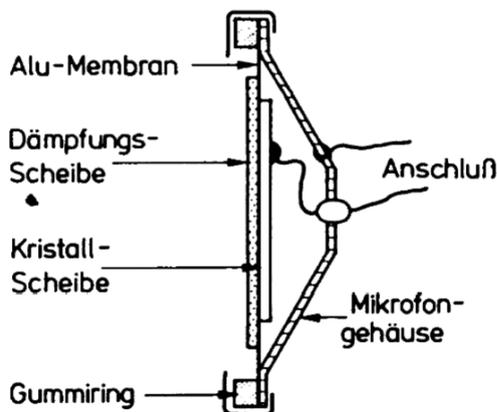


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des piezoelektrischen Wandlers [1, S.162]

In Abbildung 2.6 ist das Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Wandlers gezeigt. C_p stellt die Piezokapazität des Wandlers dar, da die Aluminiumscheibe mit der Kristallschicht des Wandlers einen Kondensator bilden. C , R und L stellen die über die FU-Analogie konvertierten mechanischen Größen des Wandlers, analog zum dynamischen Wandler, als elektrische Komponenten dar [1, S.162 - 165].

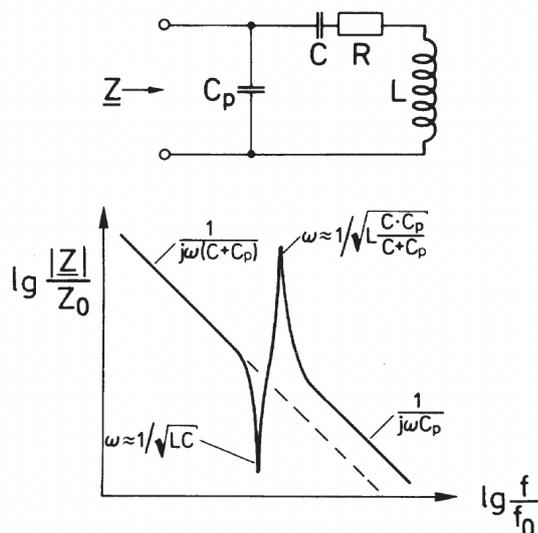


Abbildung 2.6: Ersatzschaltbild und Impedanzverlauf des piezoelektrischen Wandlers [1, S.165]

2.4 MEMS Schallwandler

Das Kürzel MEMS steht für „Micro-Electro-Mechanical-System“ und beschreibt sehr kleine Systeme, die sowohl elektrische als auch mechanische Komponenten haben und von der Halbleiterindustrie gefertigt werden. Es gibt verschiedene Arten von MEMS-Schallwandlern, die vier wichtigsten Arten von MEMS sind: elektrostatische, elektromagnetische, piezoelektrische und thermoakustische MEMS-Schallwandler [2, 3]. Normalerweise setzt sich ein MEMS-Lautsprecher aus einer Membran und einem Wandler, welcher die Membran ansteuert, zusammen [2].

2.4.1 MEMS mit elektrostatischer Schallerzeugung

Elektrostatische MEMS-Lautsprecher basieren auf dem grundlegenden elektrostatischen System eines Parallelplattenkondensators. Dabei wird eine elektrostatische Kraft zwischen zwei leitenden Elementen erzeugt, die durch ein dielektrisches Element getrennt sind. Bei MEMS besteht das Dielektrikum in der Regel aus Luft [4]. Eine mögliche Ausführung ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Hier ist eine starre untere Elektrode und eine obere Elektrode, welche nur an den zwei Enden fixiert ist und sich ansonsten frei bewegen kann, dargestellt.

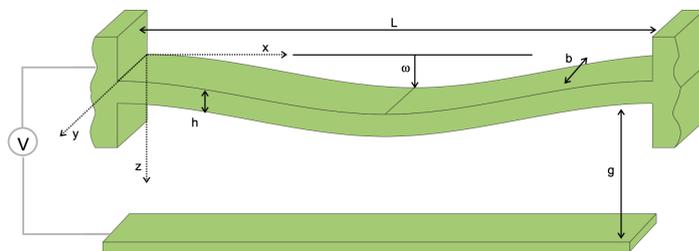


Abbildung 2.7: Elektrostatischer MEMS-Wandler auf Basis eines Parallelplattenkondensators [4]

Eine weitere verbreitete Form ist die Kombination aus mehreren Plattenkondensatoren, welche aus ineinander greifenden Kammstrukturen besteht. Eine Seite der Kammstruktur ist dabei federnd gelagert. Eine mögliche Struktur ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

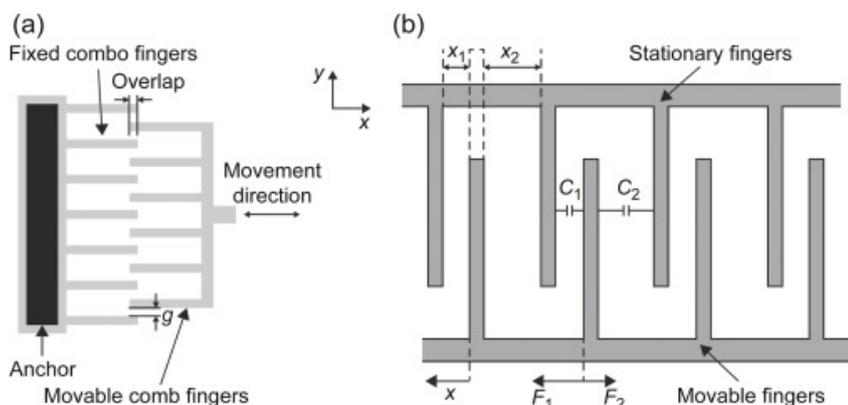


Abbildung 2.8: Elektrostatischer MEMS-Wandler bestehend aus Kammstrukturen [5]

MEMS-Lautsprecher basierend auf elektrostatischer Schallerzeugung haben die Vorteile, dass sie einfach in der Herstellung sind, einen hohen elektromechanischen Wirkungsgrad besitzen und einen relativ flachen Frequenzgang aufweisen. Aufgrund der geringen Auslenkung der Membran erzeugen sie jedoch einen niedrigen Schalldruckpegel [2].

2.4.2 MEMS mit elektrodynamischer Schallerzeugung

Elektrodynamische MEMS-Lautsprecher (auch als elektromagnetische MEMS-Lautsprecher bezeichnet) basieren auf einer Siliziumstruktur. Die Membran ist sehr leicht aber auch sehr steif und besteht üblicherweise aus Parylen, Polyimid oder Silizium. Der bewegliche Teil ist mit weichen Aufhängungsträgern befestigt, die eine große Auslenkung ermöglichen. Das Magnetfeld wird durch einen ringförmigen Permanentmagneten in Mikrobauweise erzeugt, der die kreisförmige Membran umgibt. Die Herstellung von Permanentmagneten in Mikrobauweise mit einer hohen Magnetfelddichte stellt jedoch eine Herausforderung dar. Deshalb wird die bewegliche planare Spule, welche auf der Oberseite der Membran befestigt ist, so nahe wie möglich am Magneten platziert, um die maximale Intensität des Magnetfeldes zu nutzen. Die elektrische Versorgung der Spule wird durch zwei Leiterbahnen sichergestellt, die an den Aufhängungsträgern befestigt sind. Durch eine elektrisch isolierende Schicht ist die Spule vor Kurzschlüssen geschützt. Die Verbindungen der Leiterbahnen mit den Spulenden sind durch zwei Durchkontaktierungen in der Isolierschicht gegeben [6]. Ein möglicher Aufbau eines elektrodynamischen MEMS-Wandlers ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

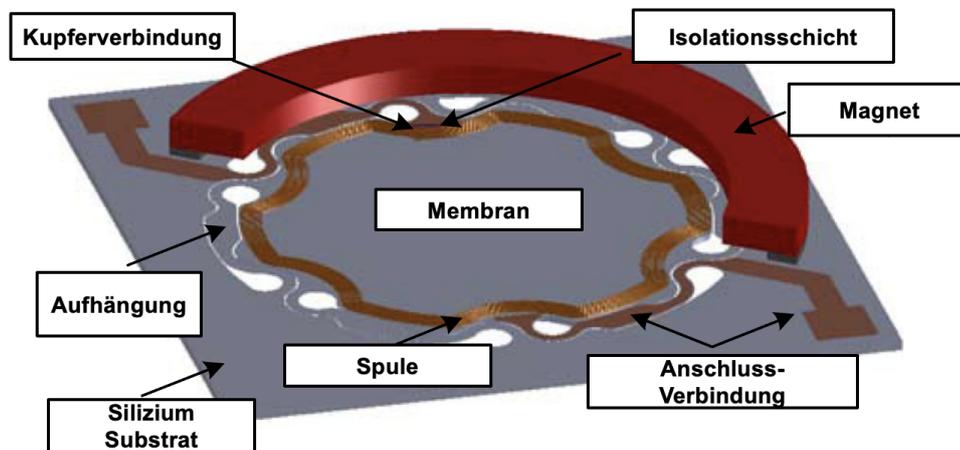


Abbildung 2.9: Elektrodynamischer MEMS-Wandler [6]

Elektrodynamische MEMS haben die Vorteile, dass sie eine hohe Leistungsdichte haben, eine niedrige Steuerspannung benötigen und einen linearen SPL-Verlauf aufweisen [6]. Außerdem haben sie eine kurze Ansprechzeit, eine große Membranauslenkung, sind jedoch relativ groß [3].

2.4.3 MEMS mit piezoelektrischer Schallerzeugung

Bei piezoelektrischen MEMS wird das piezoelektrische Material als gleichmäßige, flächige Beschichtung auf ein Substrat aufgetragen. Die gebräuchlichsten Substrate sind Siliziumsubstrate. Danach wird eine geeignete Isolierschicht aufgebracht, die als Schutzbarriere zwischen der Metallelektrode und dem Siliziumsubstrat dient. Als Nächstes wird das piezoelektrische Material aufgetragen [7]. Blei-Zirkonat-Titanat ist dabei das gebräuchlichste piezoelektrische Material [8]. Der Piezokristall ist ein Ionenkristall mit asymmetrischen Einheitszellen. Das Funktionsprinzip eines piezoelektrischen Aktors besteht darin, dass sich durch eine angelegte Spannung die Einheitszellen verformen und sich somit die Winkel zwischen den positiven und negativen Ionen ändern [8]. In Abbildung 2.10 ist ein möglicher Aufbau eines piezoelektrischen MEMS-Wandlers zu sehen. Hier ist eine Seite der Elektroden und der piezoelektrischen Beschichtung fixiert und die andere Seite kann sich beim Anlegen einer Spannung frei bewegen.

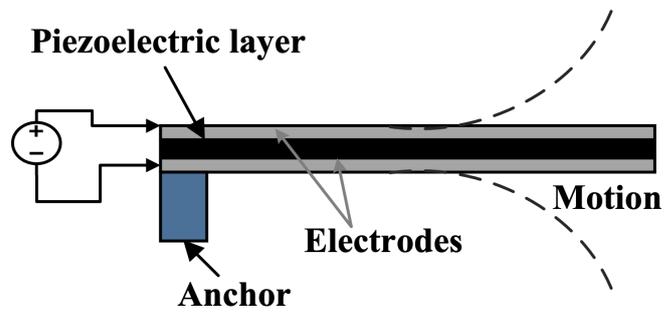


Abbildung 2.10: Mögliche Ausführung eines piezoelektrischen MEMS-Wandlers [3]

Piezoelektrische MEMS-Schallwandler haben einen geringen Stromverbrauch und eine schnelle Ansprechzeit. Allerdings weisen sie einen niedrigen Schalldruckpegel und eine hohe Temperaturempfindlichkeit auf. Außerdem besitzen sie einen nichtlinearen Frequenzgang, was ihren Anwendungsbereich eingrenzt [3].

2.4.4 MEMS mit thermoakustischer Schallerzeugung

Thermoakustische MEMS-Lautsprecher bestehen aus einem dünnen und großflächigen aktiven Film aus leitfähigem Material, der entweder auf einem elektrisch isolierenden Substrat aufgebracht oder von Luft umgeben ist [9].

Die gebräuchlichsten Materialien für den aktiven Film sind Kohlenstoffnanoröhren und Graphen. Diese Materialien zeichnen sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus [2].

Wenn ein Wechselstrom durch den dünnen Leiter fließt, entstehen durch den oszillierenden Strom Temperaturimpulse im Leiter. Diese Impulse führen an der Oberfläche zu periodischen Erwärmungen, was wiederum zu einer periodischen Ausdehnung des umgebenden Mediums führt. Dadurch dehnt sich das umgebende Medium aus und erzeugt ein akustisches Drucksignal (siehe Abbildung 2.11) [9, 10, 11].

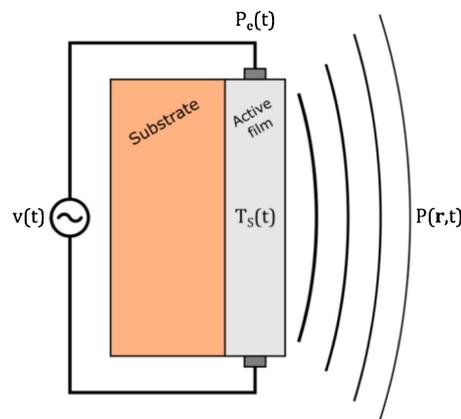


Abbildung 2.11: Thermoakustischer MEMS-Schallwandler [9]

Thermoakustische Lautsprecher aus Kohlenstoffnanoröhren oder Graphen haben die Vorteile, dass sie einen einfachen Aufbau besitzen, sehr leicht sind, einfach in der Herstellung sind und in variabler Form gefertigt werden können. Aktuelle thermoakustische Lautsprecher sind jedoch recht groß und haben einen hohen Stromverbrauch, um einen ausreichenden SPL zu erzeugen [2].

3

Messungen der Schallwandler

In diesem Kapitel werden die Schallwandler, welche gemessen wurden, vorgestellt. Es handelt sich dabei um dynamische, elektromagnetische und piezoelektrische Schallwandler. In Tabelle 3.1 sind alle erhaltenen Schallwandler inklusive deren Stückzahl ersichtlich.

| Schallwandler | Dynamisch | Elektromagnetisch | Piezoelektrisch | Stückzahl |
|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|-----------|
| Visaton K 28.40 | x | | | 1 |
| Visaton K 23 | x | | | 1 |
| Visaton K 70 | x | | | 1 |
| Visaton BF 37 | x | | | 1 |
| Visaton K 40 | x | | | 1 |
| TDK SDC1610M5 | | x | | 5 |
| DBX05LFX050N | | x | | 2 |
| RS PRO 12x12 | | | x | 5 |
| RS PRO 17 | | | x | 5 |
| RS PRO 13.8 | | | x | 5 |
| RS PRO 27 | | | x | 5 |
| CSPT12A03 | | | x | 4 |

Tabelle 3.1: DUT-Liste und Stückzahl

3.1 Messaufbau und Messprocedere

Alle Schallwandler wurden mit dem Klippel-System gemessen. Bei den Messungen der dynamischen Lautsprecher wurde das LPM-Modul (Linear Parameter Measurement Module) verwendet. Damit war es möglich, Strom, Spannung und Impedanz und mit dem Laser auch die Membranauslenkung zu bestimmen. Die dynamischen Lautsprecher wurden mit einer Haltevorrichtung eingespannt und der Laser eingestellt (siehe Abbildung 3.3). Das Anregungssignal des LPM-Moduls ist ein Multi-Sinus. Die elektromagnetischen und piezoelektrischen Wandler konnten nicht mit dem LPM-Modul gemessen werden. Daher wurden hier die Messungen mit dem TRF-Modul (Transfer Function Module) durchgeführt. Dieses Modul verwendet einen logarithmischen Sinus-Sweep als Anregungssignal. Für die elektromagnetischen und piezoelektrischen Wandler wurde der Strom- und Spannungsverlauf bei der Nennspannung sowie der Impedanzverlauf bei Minimal-, Nenn- und Maximalspannung laut Hersteller gemessen. Aus den Impedanzkurven wurde bei allen Wandlern die Resonanzfrequenz, bzw. die Resonanzfrequenzen ermittelt. Der Aufbau des Klippel-Systems ist in Abbildung 3.1 zu sehen und das Klippel-Messverfahren in Abbildung 3.2. Nachfolgend werden die Anschlüsse und Signalwege aufgelistet.

| | |
|-------------------------------|--|
| Anschluss (Verstärker) | führt nach |
| Stereo Input L | Klippel Out 1 |
| Spk A L + und - | Klippel Speaker 2 Anschlüsse 2+ und 2- |

| | |
|--|--------------------------------|
| Anschluss (Klippel Distortion Analyzer) | führt nach |
| Laser | Lasersteuerung |
| Out 1 | Verstärker Stereo Input L |
| Speaker 2 | Lautsprecher |
| Amp 1 & 2 Anschlüsse 2+ und 2- | Verstärker Speaker A L + und - |
| USB (Vorderseite) | Laptop |

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Anschluss (Lasersteuerung) | führt nach |
| Head | Lasermesskopf |
| nicht beschriftet | Klippel Laser Anschluss |

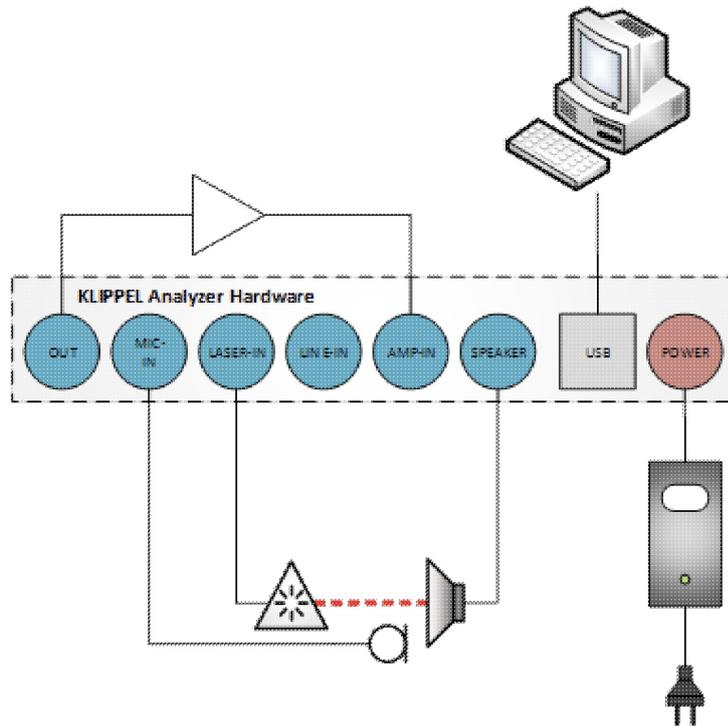


Abbildung 3.1: Klippel Messaufbau [12]

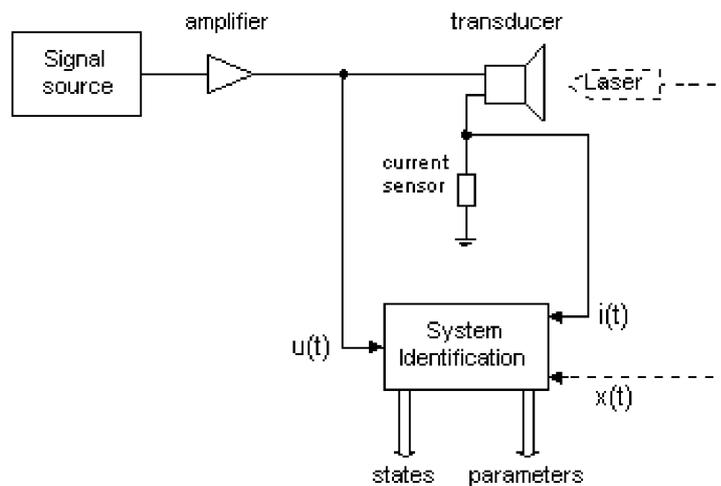


Abbildung 3.2: Klippel Messverfahren [12]



Abbildung 3.3: Messung eines dynamischen Miniaturlautsprechers

Um die Messungen der dynamischen Lautsprecher einheitlich durchzuführen, wurde als Leistungswert 0.1 W gewählt. Daraus ergibt sich für alle dynamischen Lautsprecher mit $8\ \Omega$ eine Spannung von 0.89 V . Der einzige Lautsprecher mit $4\ \Omega$ ist der BF 37, bei welchem daher 0.63 V angegeben wurden. Der Spannungswert wurde bei den elektromagnetischen und piezoelektrischen Buzzern je nach Herstellerangaben eingestellt.

3.2 Elektrodynamische Lautsprecher

Die gemessenen dynamischen Lautsprecher sind alle von der Firma Visaton und sind sehr unterschiedlich was ihre Größe und Resonanzfrequenz betrifft. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Lautsprecherdaten gezeigt.

| | K 28.40 | K 23 | K 70 | BF 37 | K 40 |
|---|----------------|----------------|-------------|-------------|------------|
| Nennbelastbarkeit [W] | 2 | 0.3 | 2 | 5 | 1 |
| Musikbelastbarkeit [W] | 3 | 0.5 | 3 | 8 | 2 |
| Nennimpedanz [Ohm] | 8 | 8 | 8 | 4 | 8 |
| Resonanzfrequenz [Hz] | 450 | 750 | 300 | 185 | 520 |
| Übertragungsbereich [Hz] | 230 - 20000 | 420 - 20000 | 170 - 20000 | 100 - 20000 | 350 - 6000 |
| Mittlerer Schalldruckpegel [dB (1W/1m)] | 79 | 87 (0.1W/0.1m) | 85 | 74 | 83 |
| Membranfläche [cm ²] | 6 | 3.14 | 25.52 | 6.2 | 7.07 |
| Maße [mm] | 40 x 28 x 11.7 | 23 x 5 | 70 x 21.7 | 37 x 23.8 | 40 x 4.3 |
| Gewicht [g] | 14 | 4 | 65 | 33 | 10 |

Tabelle 3.2: Daten der dynamischen Lautsprecher laut Datenblatt [13, 14, 15, 16, 17]

3.2.1 Visaton K 28.40

Aufbau

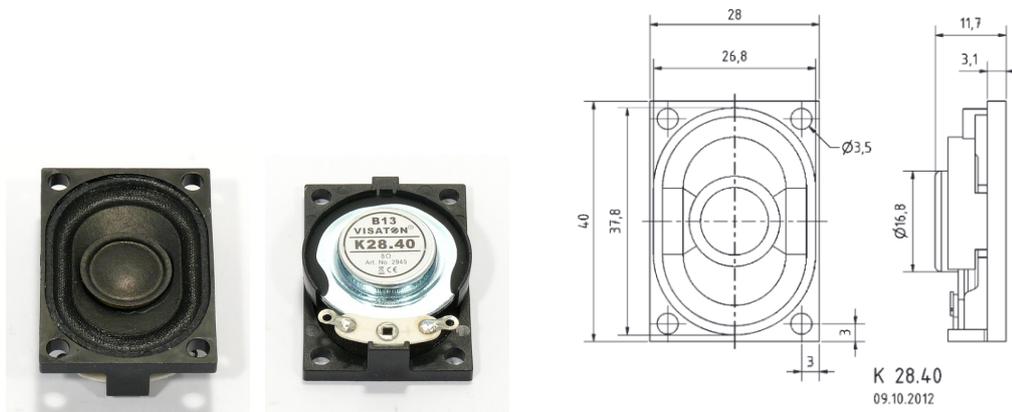


Abbildung 3.4: Visaton K 28.40 [13]

Datenblatt

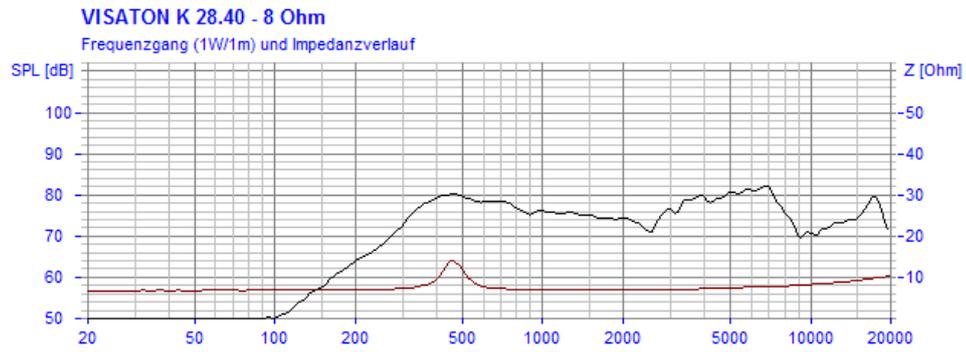


Abbildung 3.5: SPL- und Impedanzverlauf, Visaton K 28.40 [13]

Messergebnisse

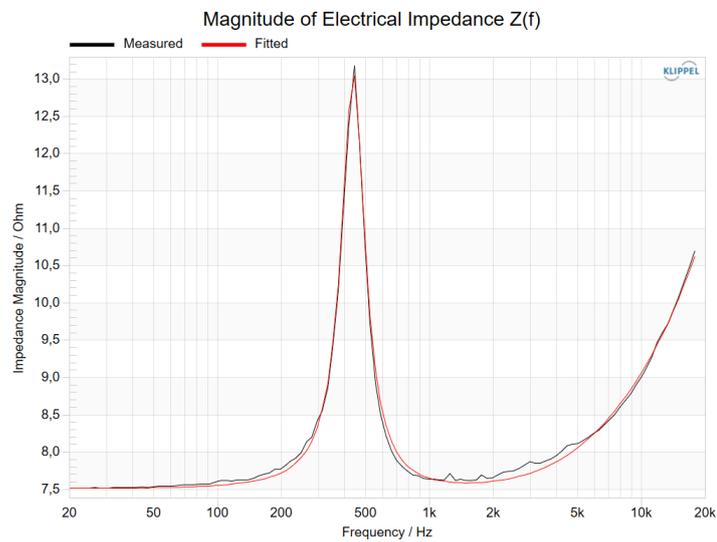


Abbildung 3.6: Impedanzverlauf, Visaton K 28.40

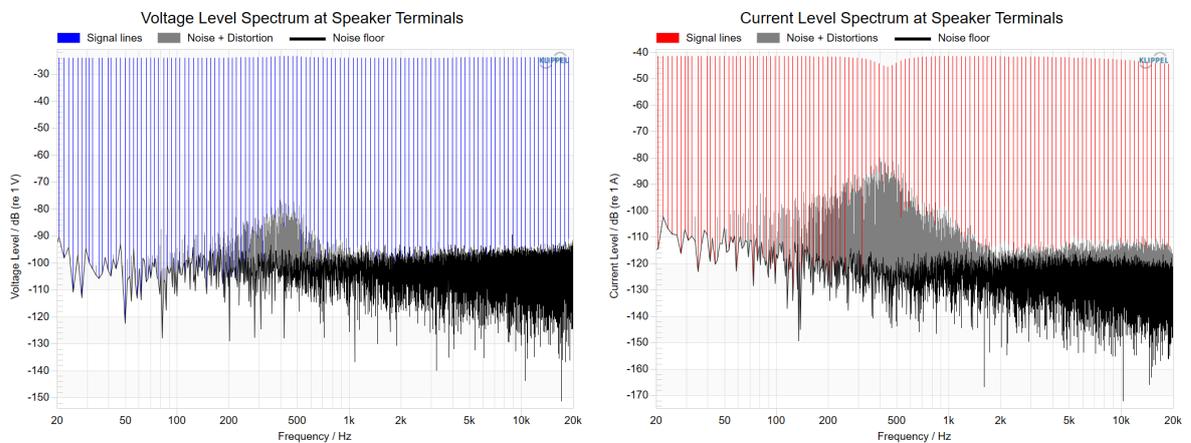


Abbildung 3.7: Spannungs- und Stromverlauf, Visaton K 28.40

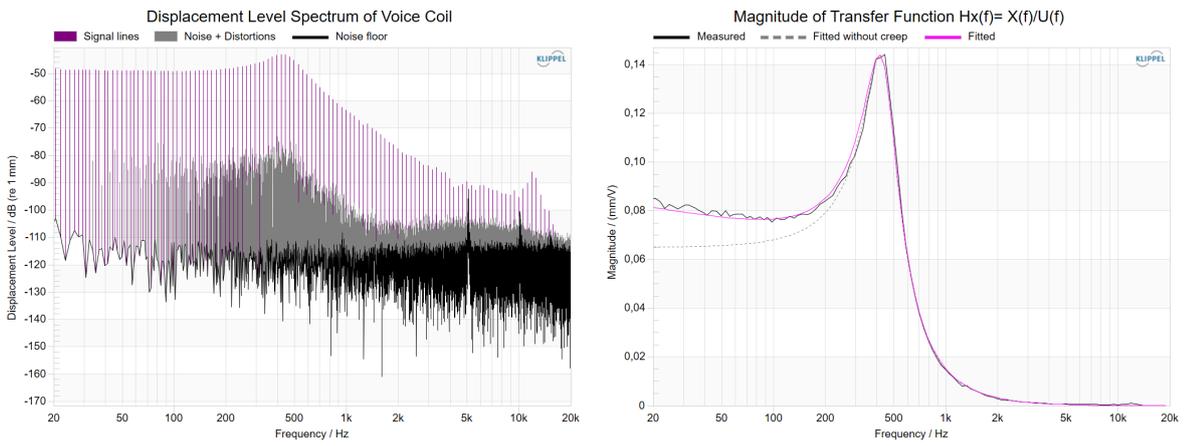


Abbildung 3.8: Membranauslenkung, Visaton K 28.40

3.2.2 Visaton K 23

Aufbau



Abbildung 3.9: Visaton K 23 [14]

Datenblatt

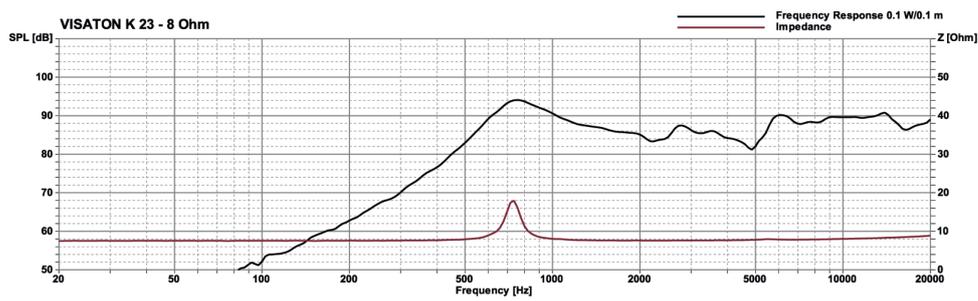


Abbildung 3.10: SPL- und Impedanzverlauf, Visaton K 23 [14]

Messergebnisse

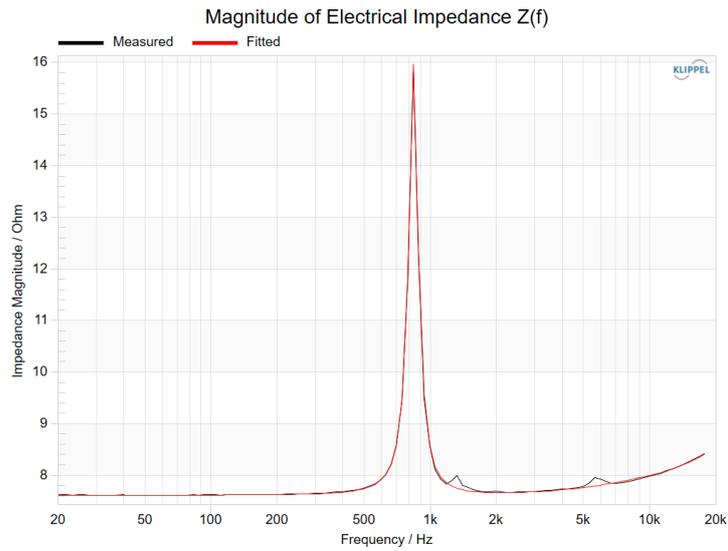


Abbildung 3.11: Impedanzverlauf, Visaton K 23

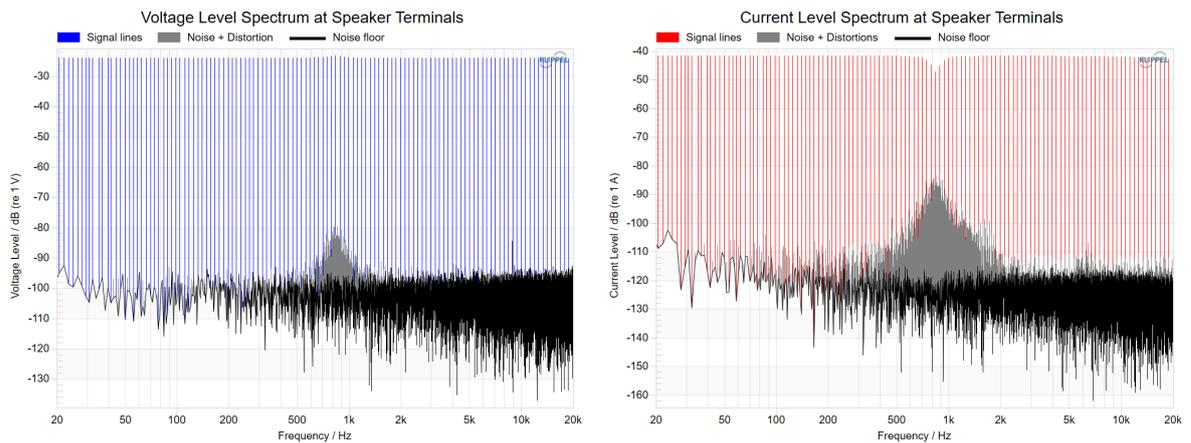


Abbildung 3.12: Spannungs- und Stromverlauf, Visaton K 23

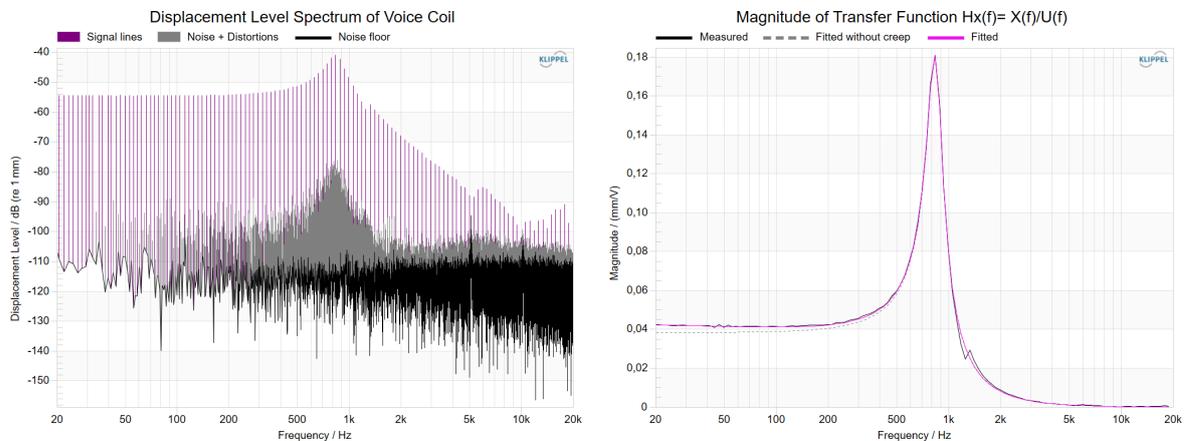


Abbildung 3.13: Membranauslenkung, Visaton K 23

3.2.3 Visaton K 70

Aufbau



Abbildung 3.14: Visaton K 70 [15]

Datenblatt

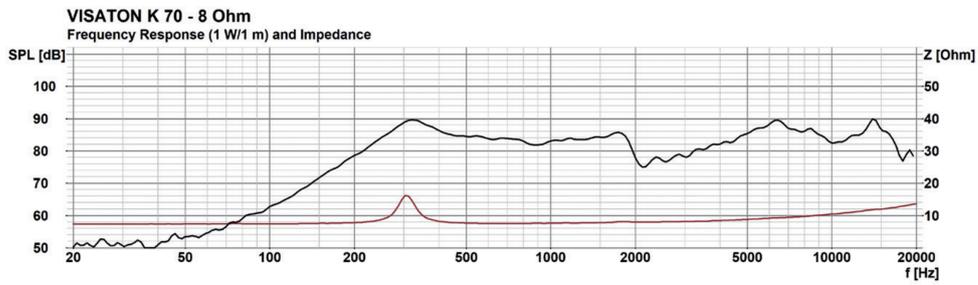


Abbildung 3.15: SPL- und Impedanzverlauf, Visaton K 70 [15]

Messergebnisse

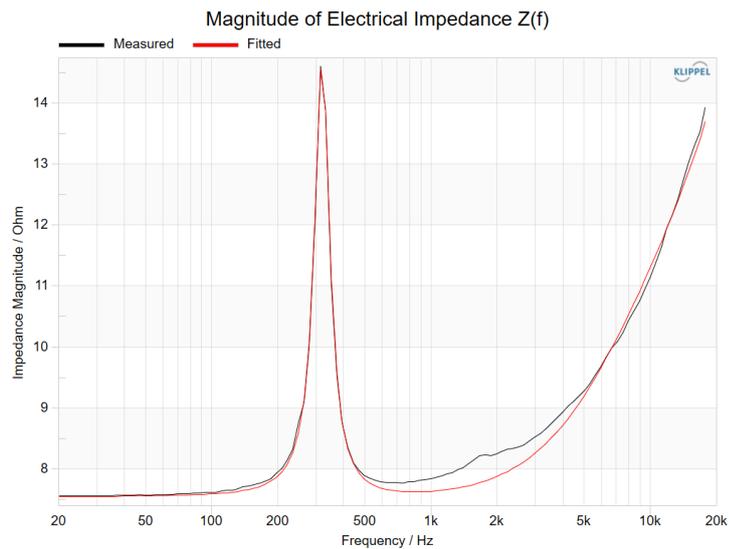


Abbildung 3.16: Impedanzverlauf, Visaton K 70

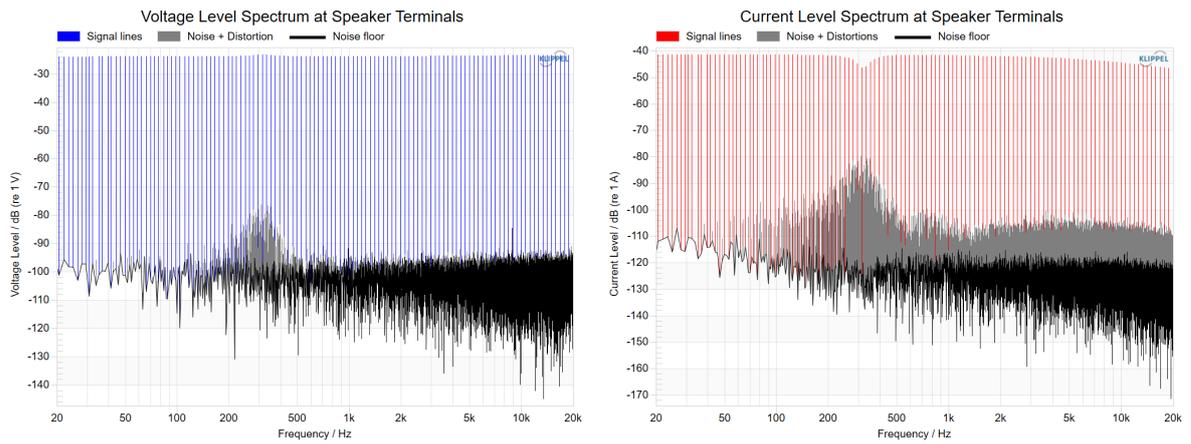


Abbildung 3.17: Spannungs- und Stromverlauf, Visaton K 70

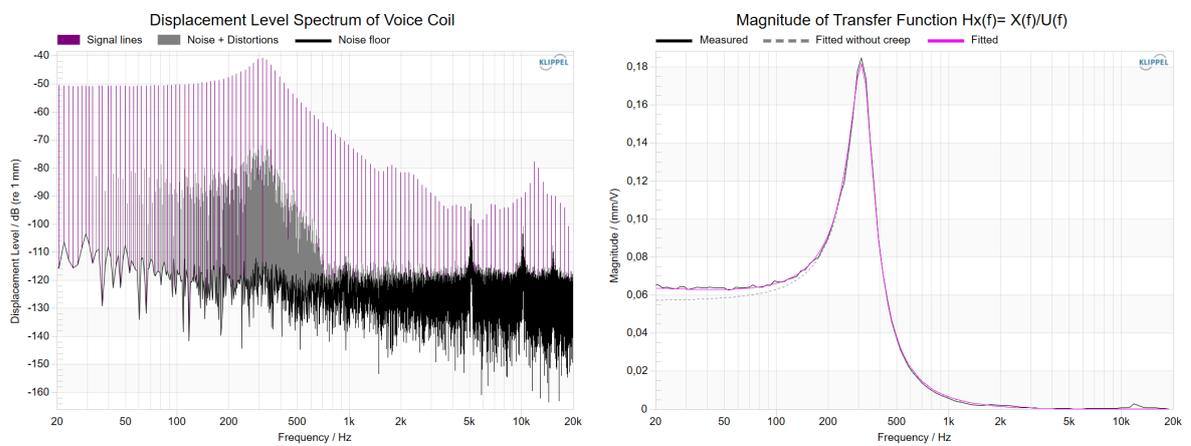


Abbildung 3.18: Membranauslenkung, Visaton K 70

3.2.4 Visaton BF 37 - 4 Ohm Version

Aufbau



Abbildung 3.19: Visaton BF 37 - 4 Ohm Version [16]

Datenblatt

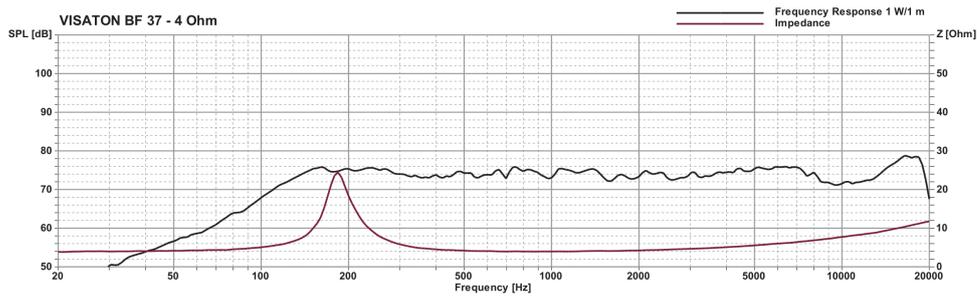


Abbildung 3.20: SPL- und Impedanzverlauf, Visaton BF 37 [16]

Messergebnisse

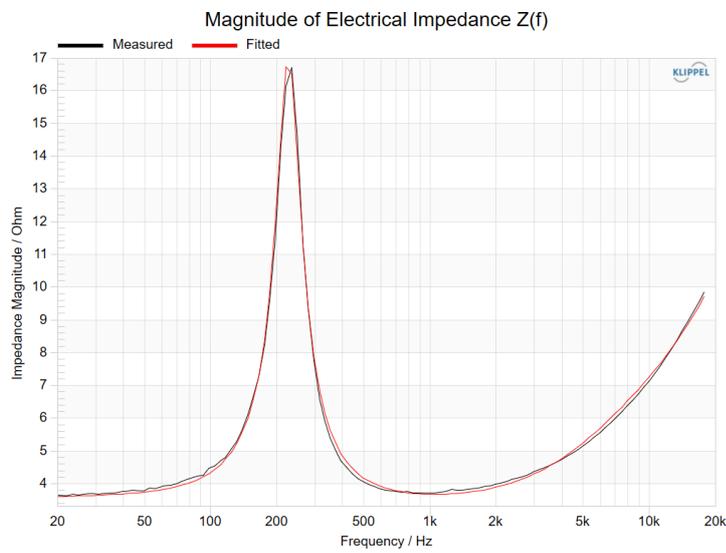


Abbildung 3.21: Impedanzverlauf, Visaton BF 37

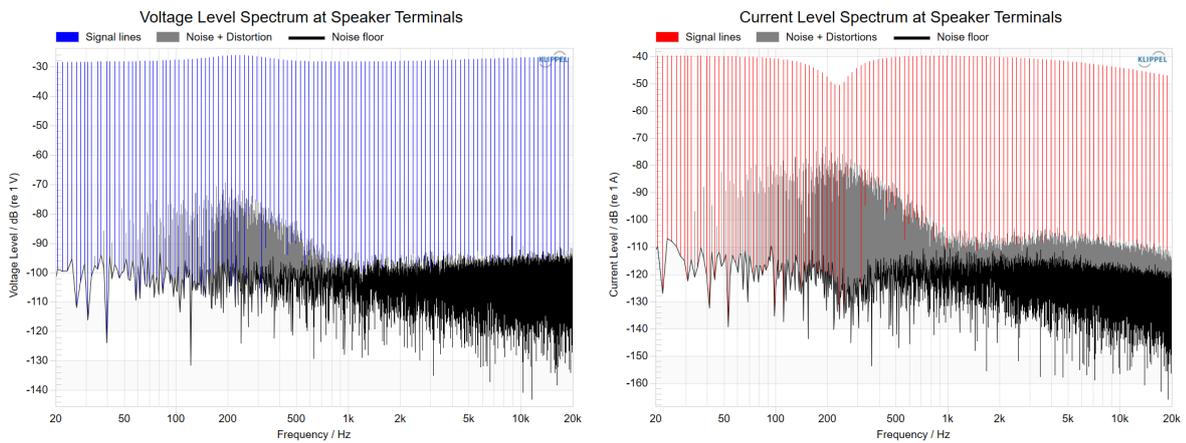


Abbildung 3.22: Spannungs- und Stromverlauf, Visaton BF 37

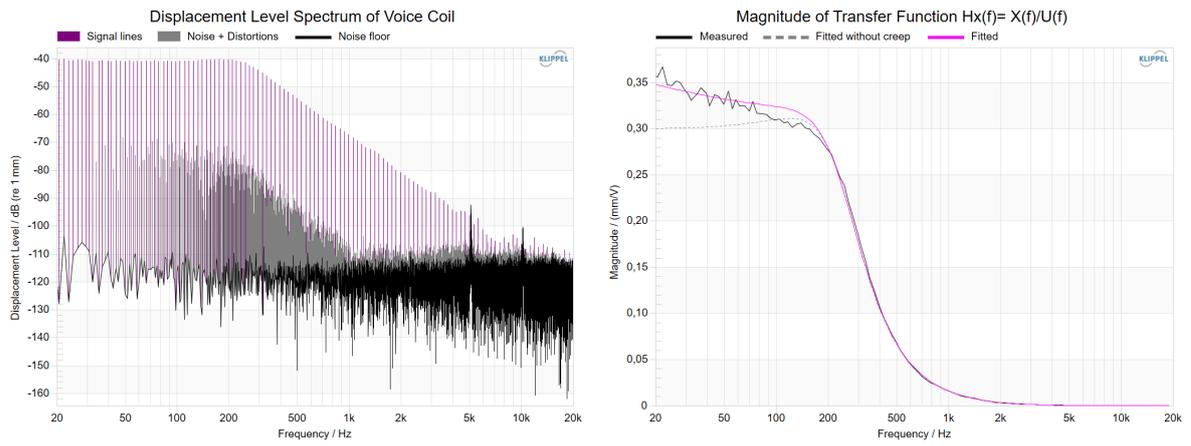


Abbildung 3.23: Membranauslenkung, Visaton BF 37

3.2.5 Visaton K 40

Aufbau



Abbildung 3.24: Visaton K 40 [17]

Datenblatt

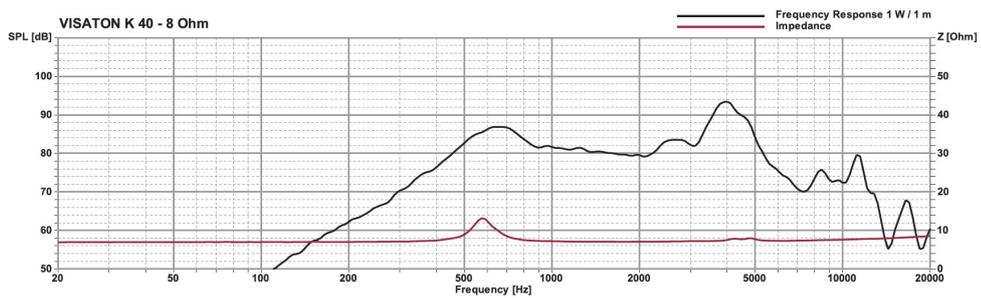


Abbildung 3.25: SPL- und Impedanzverlauf, Visaton K 40 [17]

Messergebnisse

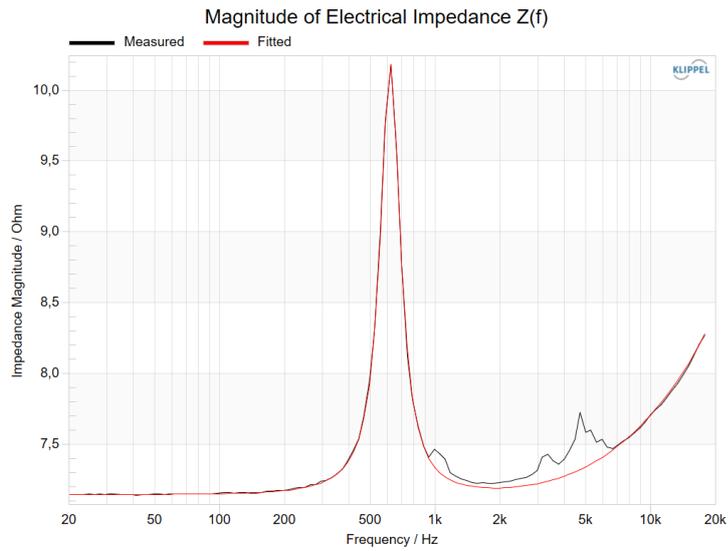


Abbildung 3.26: Impedanzverlauf, Visaton K40

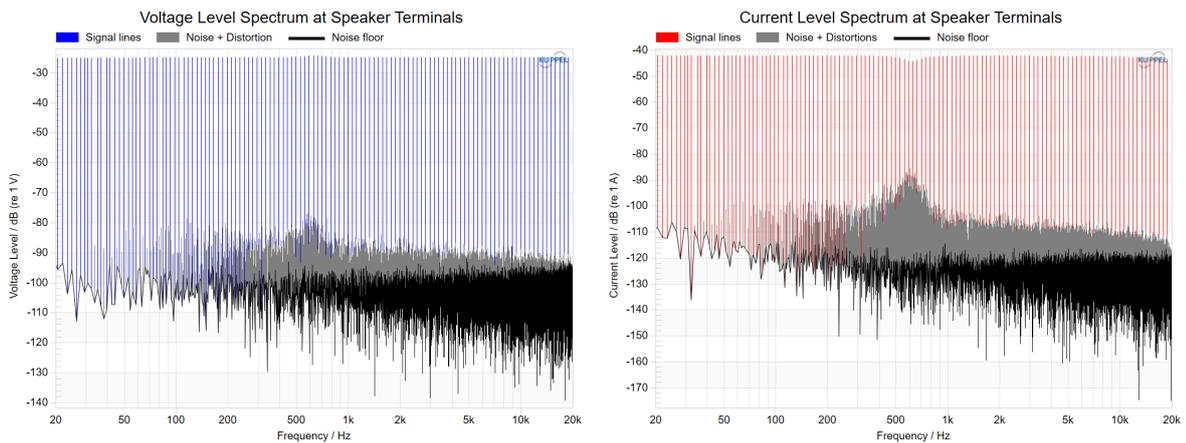


Abbildung 3.27: Spannungs- und Stromverlauf, Visaton K40

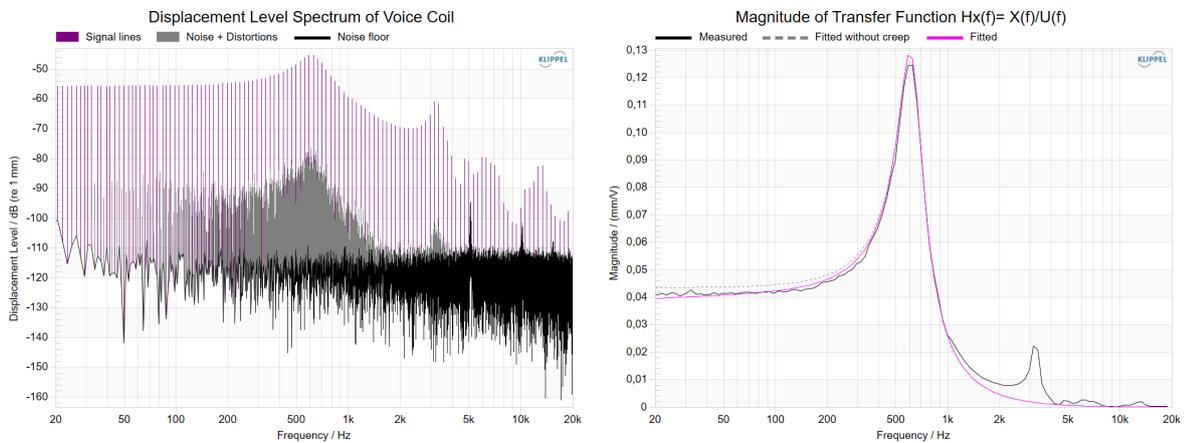


Abbildung 3.28: Membranauslenkung, Visaton K40

3.3 Elektromagnetische Buzzer

In diesem Kapitel werden die beiden elektromagnetischen Wandler vorgestellt. Einer ist ein DC-Wandler, welcher zusätzlich zum elektromagnetischen Wandler einen Oszillator eingebaut hat. In Tabelle 3.3 ist eine Übersicht der Daten aus dem Datenblatt für die elektromagnetischen Wandler zu sehen.

| | TDK SDC1610M5 | DBX05LFX050N |
|---------------------------------------|---------------|----------------|
| Resonanzfrequenz [Hz] | 1920 - 2880 | 2400 |
| Pegel in einem Abstand von 10 cm [dB] | min. 85 | min. 85 |
| Versorgungsspannung [V] | 4 - 8 DC | 3 - 8 AC (rms) |
| Nennspannung [V] | 5 DC | 5 AC (rms) |
| Versorgungsstrom [mA] | max. 30 | max. 40 |
| Maße [mm] | 16 x 10 | 12 x 9.5 |
| Membranfläche [mm ²] | 154 | 79 |
| Gewicht [g] | 5 | 2 |

Tabelle 3.3: Daten der elektromagnetischen Buzzer laut Datenblatt [18, 19]

3.3.1 TDK SDC1610M5

Hier handelt es sich um einen DC-Typ mit eingebautem Oszillator.

Aufbau

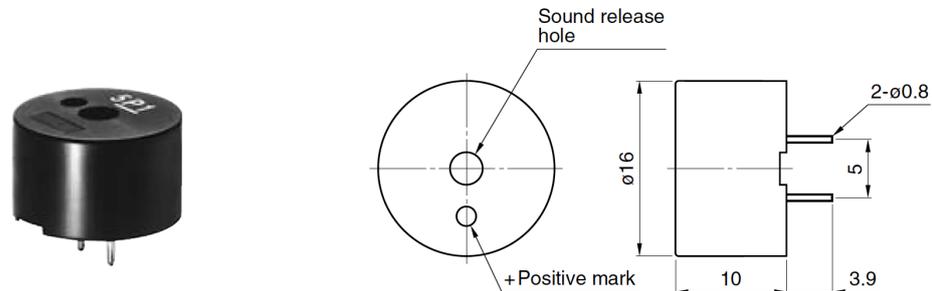


Abbildung 3.29: TDK SDC1610M5 [18]

Der Wandler wurde geöffnet, um die verbauten Teile zu analysieren. In Abbildungen 3.30 und 3.31 ist der geöffnete Wandler zerlegt in seine Einzelteile zu sehen. Links oben sind die Anschlüsse, sowie die Platine des Oszillators zu erkennen. Die runde Metallmembran ist senkrecht zu einer Spule platziert. Am äußeren Rand des Wandlers befindet sich ein Permanentmagnet.



Abbildung 3.30: TDK SDC1610M5 geöffnet



Abbildung 3.31: TDK SDC1610M5 geöffnet

3.3.2 DBX05LFX050N

Aufbau

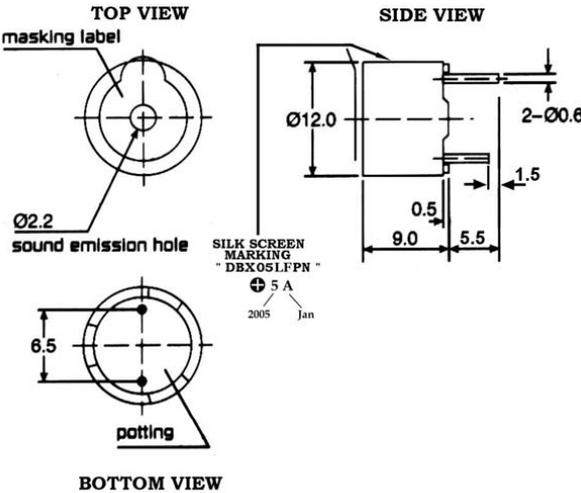


Abbildung 3.32: DBX05LFX050N [19]

Der geöffnete Schallwandler ist in Abbildung 3.33 zu sehen. Es ist eine runde Metallmembran ersichtlich, welche über einer Spule platziert ist.

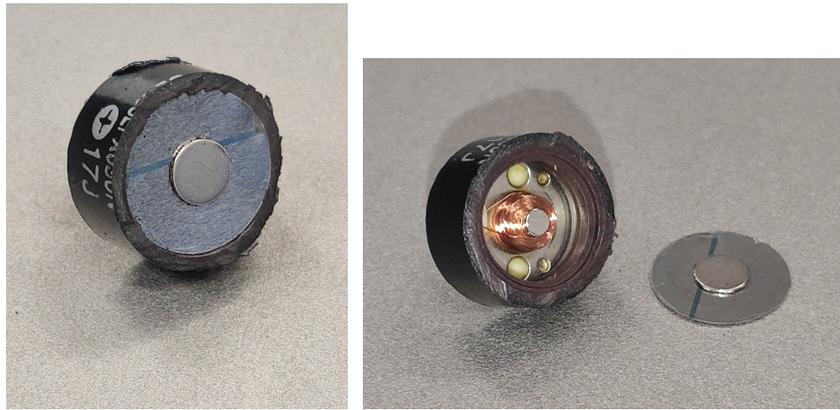


Abbildung 3.33: DBX05LFX050N geöffnet

Messergebnisse

Der DBX05LFX050N konnte mit dem LPM-Modul des Klippel-Systems nicht gemessen werden (siehe Fehlermeldung in Abbildung 3.34), daher konnte nur das TRF-Modul verwendet werden.

Protocol timeline

⚠ No proper current signal! The ratio signal to noise+distortion of the current signal is lower than 20 dB. [Help](#)

| | |
|------------|--|
| +00:00 | Start Measurement: 2023-03-08 15:23:27 UTC+1 Duration: +00:02.339 - OK |
| +00:00 | starting amplifier check |
| +00:00.328 | Determined Lines for Re measurement |
| | f1 23.4 Hz |
| | boost at f1 0.1 dB |
| | f2 46.9 Hz |
| | boost at f2 0.0 dB |
| +00:01.689 | Main Measurement |
| +00:02.339 | LPM Version: 212.332 |
| | 🔧 Hardware Configuration |
| | Measurement Device DA 0680 |
| | DAMeas Version 212.332 |
| | Sample Frequency 48000 |
| | Selected Sensors |
| +00:02.339 | End Measurement |

Abbildung 3.34: Fehlermeldung des Klippel-Systems

Der Impedanzverlauf des DBX05LFX050N für drei verschiedene Spannungen (Minimal-, Nenn-, und Maximalspannung laut Hersteller) ist in Abbildung 3.35 ersichtlich. Die gemessenen Resonanzfrequenzen sind spannungsabhängig in Tabelle 3.4 gezeigt.

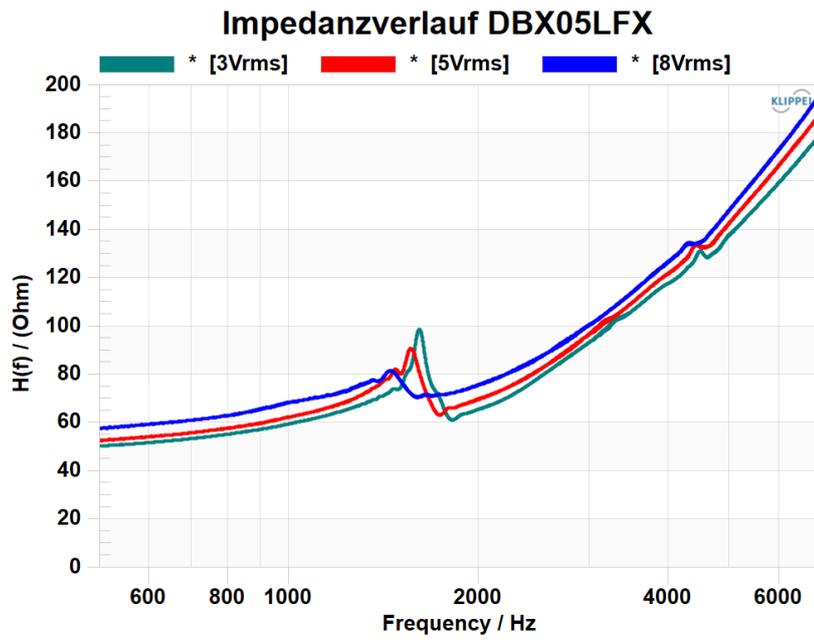


Abbildung 3.35: Impedanzverläufe, DBX05LFX050N

| DBX05LFX050N | Resonanzfrequenz [Hz] |
|--------------|-----------------------|
| 3 Vrms | 1614 |
| 5 Vrms | 1562 |
| 8 Vrms | 1454 |

Tabelle 3.4: Resonanzfrequenzen des DBX05LFX050N

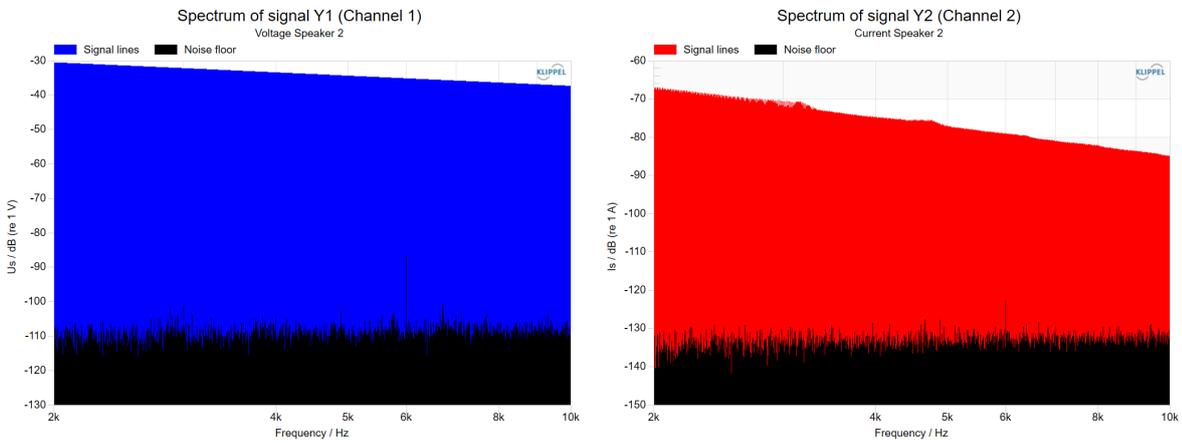


Abbildung 3.36: Spannungs- und Stromverlauf bei eingestellter Nennspannung (5 Vrms), DBX05LFX050N

3.4 Piezoelektrische Buzzer

Als dritte Schallwandlerart werden in Kühlgeräten neben dynamischen und elektromagnetischen Wandlern auch piezoelektrische Wandler verbaut. Dieses Kapitel zeigt die piezoelektrischen Buzzer, welche für die Analyse zur Verfügung gestellt wurden. Tabelle 3.5 zeigt die Daten der verschiedenen Buzzer im Überblick. Zu beachten ist, dass die Wandler sowohl in AC- als auch in DC-Ausführung vorliegen. Bei der DC-Ausführung ist vor die Piezoscheibe ein mit Gleichstrom betriebener Oszillator in eine elektronische Schaltung implementiert, deshalb war hier die Messung nicht möglich. Zu Erkenntnis-Zwecken wurden die Lautsprecher vorsichtig geöffnet, um den inneren Aufbau und die Verarbeitung besser ersichtlich zu machen.

| | 12x12 | 17 | 13.8 | 27 | CSPT |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versorgungsspannung min. [V] | 1 pp | 1 pp | 3 DC | - | 1 pp |
| Versorgungsspannung max. [V] | 25 pp | 30 pp | 16 DC | 30 pp | 20 pp |
| Nennspannung [V] | 3 pp | 5 pp | - | - | 3 pp |
| Versorgungsstrom [mA] | max. 1 | 1 | 7 | 7 | max. 1 |
| Resonanzfrequenz [Hz] | 4000 ± 500 | 4000 ± 500 | 4000 ± 500 | 4200 ± 500 | 4000 ± 500 |
| Piezokapazität [nF] | 15 | 15 | - | 20 | 15 |
| Pegel in einem Abstand von 10 cm [dB] | min. 75 | 78 | - | - | min. 75 |
| Membranfläche [mm ²] | 61 | 177 | 113 | 573 | 61 |
| Fläche der Piezoscheibe [mm ²] | 50 | 63 | 50 | 314 | 50 |
| Maße [mm] | 12 x 3 | 17 x 7 | 13.8 x 7.5 | 27 x 0.52 | 12 x 3 |
| Gewicht [g] | 0.4 | 1 | 1 | 2.7 | 0.8 |

Tabelle 3.5: Daten der piezoelektrischen Buzzer laut Datenblatt [20, 21, 22, 23, 24]

Eine Messung mit dem LPM-Modul war bei den piezoelektrischen Wandlern nicht möglich (siehe Fehlermeldung in Abbildung 3.34). Deshalb wurde das TRF-Modul herangezogen.

3.4.1 RS PRO 12x12

Aufbau

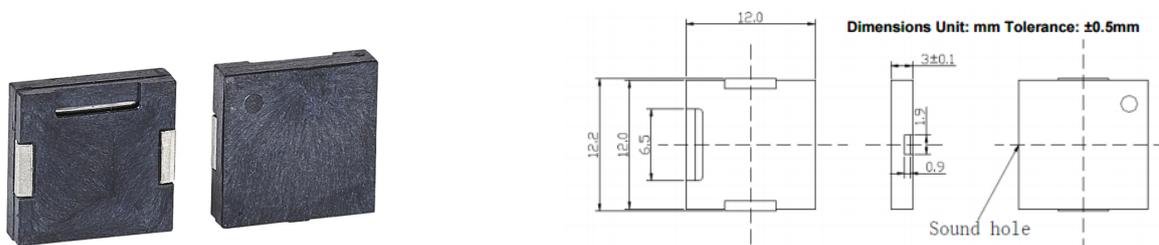


Abbildung 3.37: RS PRO 12x12 [20]



Abbildung 3.38: RS PRO 12x12 geöffnet

Im Datenblatt ist der RS PRO 12x12 als elektromagnetischer Wandler angegeben. Bei der Öffnung des Gehäuses stellte sich allerdings heraus, dass der Lautsprecher nach piezoelektrischem Prinzip aufgebaut ist. Er ist deshalb bei den piezoelektrischen Wandlern in dieser Arbeit gelistet.

Der im geöffneten Zustand gemessene Durchmesser des Metallplättchens beträgt 8.8 mm mit einer darauf haftenden Piezoscheibe mit 8 mm Durchmesser.

Messergebnisse

In Abbildung 3.39 sind die Serien- und Parallelresonanzfrequenz bei Minimal-, Nenn-, und Maximalspannung zu sehen. Sie sind separat in Tabelle 3.6 aufgelistet.

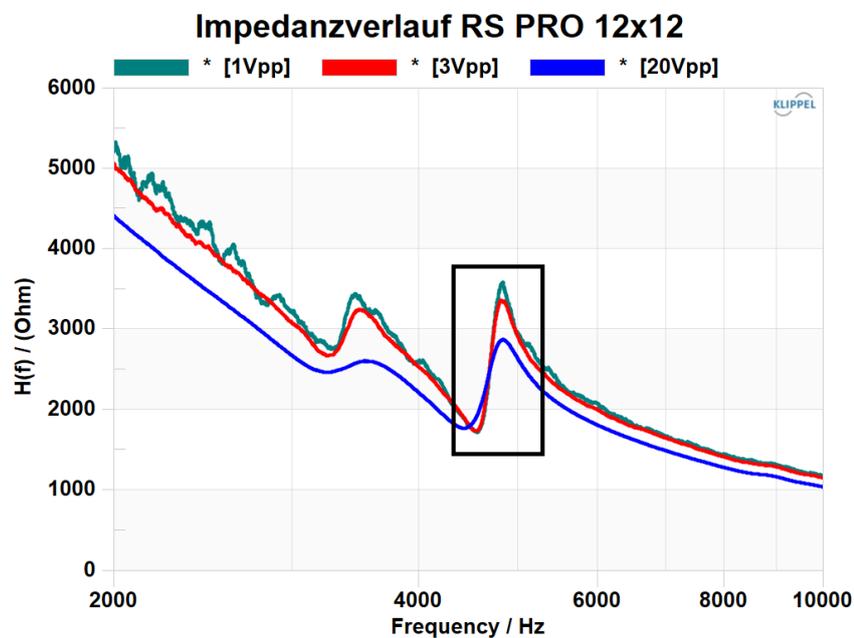
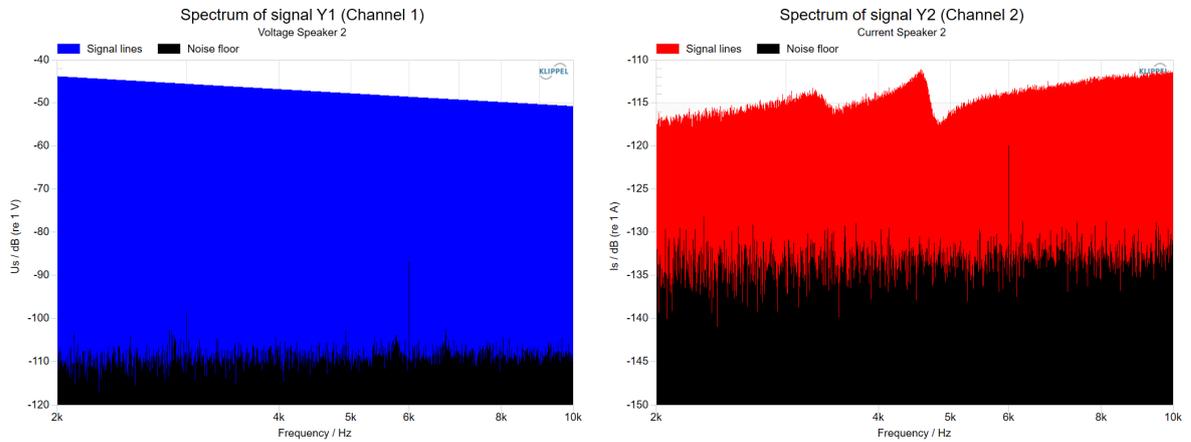


Abbildung 3.39: Impedanzverläufe, RS PRO 12x12

| RS PRO 12x12 | Serienresonanzfrequenz [Hz] | Parallelresonanzfrequenz [Hz] |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 V _{pp} | 4565 | 4842 |
| 3 V _{pp} | 4550 | 4816 |
| 20 V _{pp} | 4435 | 4843 |

Tabelle 3.6: Resonanzfrequenzen des RS PRO 12x12

Abbildung 3.40: Spannungs- und Stromverlauf bei eingestellter Nennspannung (3 V_{pp}), RS PRO 12x12

3.4.2 RS PRO 17

Aufbau



Abbildung 3.41: RS PRO 17 [21]

In Abbildung 3.42 ist der geöffnete Wandler zu sehen. Er besteht aus einem Kunststoffresonator, Anschlussklemmen und einer Piezoscheibe.



Abbildung 3.42: RS PRO 17 geöffnet

Messergebnisse

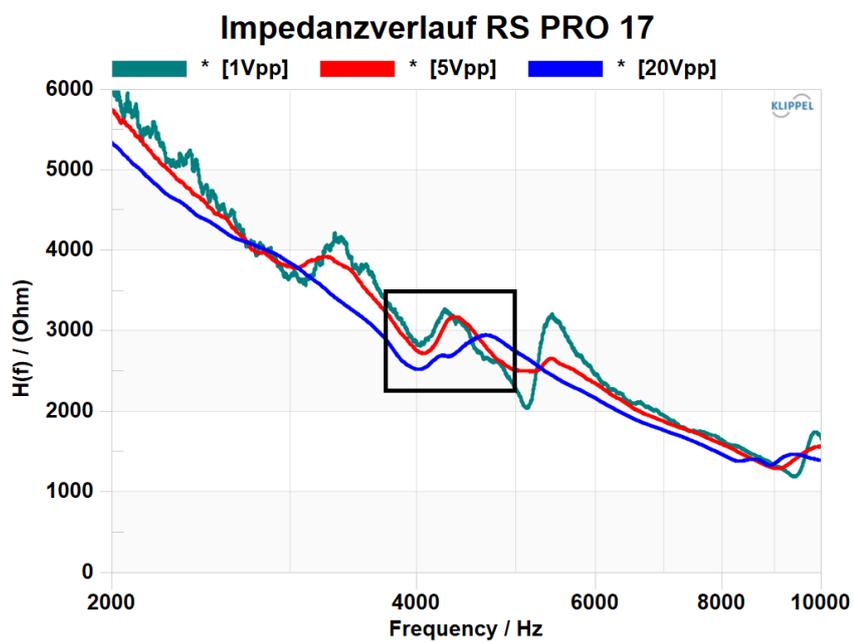


Abbildung 3.43: Impedanzverläufe, RS PRO 17

| RS PRO 17 | Serienresonanzfrequenz [Hz] | Parallelresonanzfrequenz [Hz] |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 Vpp | 4030 | 4244 |
| 5 Vpp | 4069 | 4343 |
| 20 Vpp | 4012 | 4663 |

Tabelle 3.7: Resonanzfrequenzen des RS PRO 17

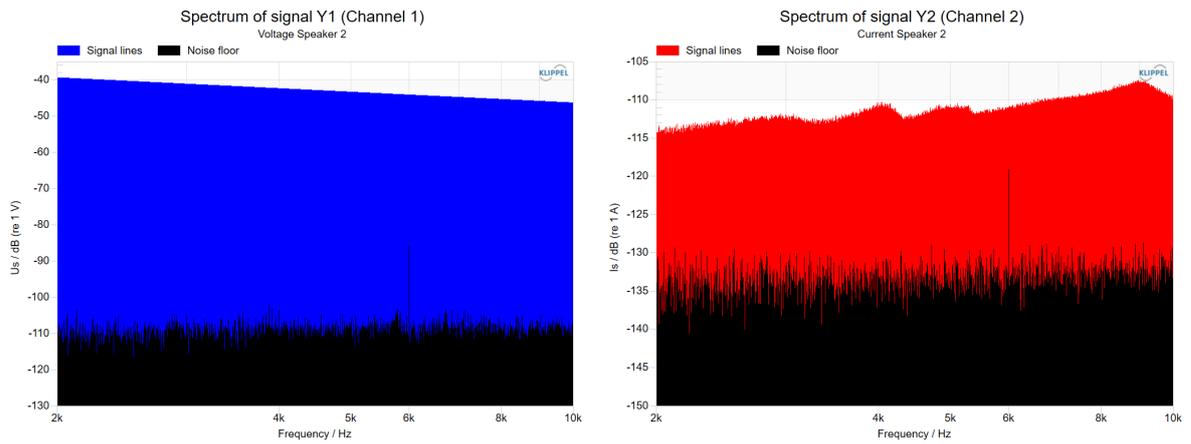


Abbildung 3.44: Spannungs- und Stromverlauf bei eingestellter Nennspannung (5 Vpp), RS PRO 17

3.4.3 RS PRO 13.8

Aufbau

Dieser Wandler konnte nicht vermessen werden, da er als Versorgungsspannung ein Gleichspannungssignal benötigt.



Abbildung 3.45: RS PRO 13.8 [22]

Abbildung 3.46 zeigt den geöffneten Wandler. Das Gehäuse wurde vorsichtig in der Mitte durchtrennt ohne die innen liegende Elektronik oder die Piezomembran zu beschädigen. Zu sehen sind die Verbindungsdrähte der Elektronik mit der Membran und die innen liegende Platine für den mit Gleichstrom betriebenen Oszillator.



Abbildung 3.46: RS PRO 13.8 geöffnet

3.4.4 RS PRO 27

Aufbau

Unter den diversen Wandlern ist dieser der einzige piezoelektrische Wandler, der ohne Gehäuse geliefert wurde.

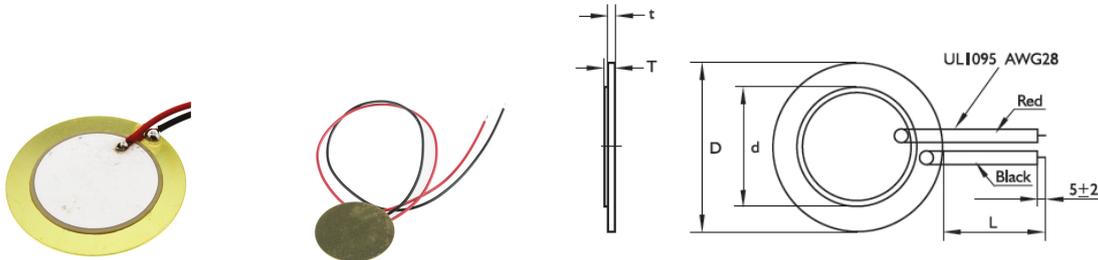


Abbildung 3.47: RS PRO 27 [23]

Messergebnisse

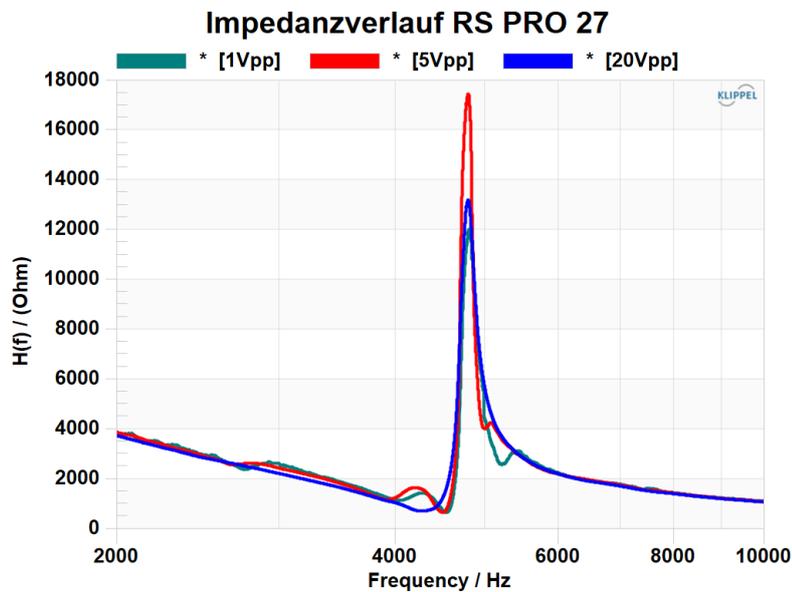


Abbildung 3.48: Impedanzverläufe, RS PRO 27

| RS PRO 27 | Serienresonanzfrequenz [Hz] | Parallelresonanzfrequenz [Hz] |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 Vpp | 4562 | 4809 |
| 5 Vpp | 4502 | 4796 |
| 20 Vpp | 4325 | 4799 |

Tabelle 3.8: Resonanzfrequenzen des RS PRO 27

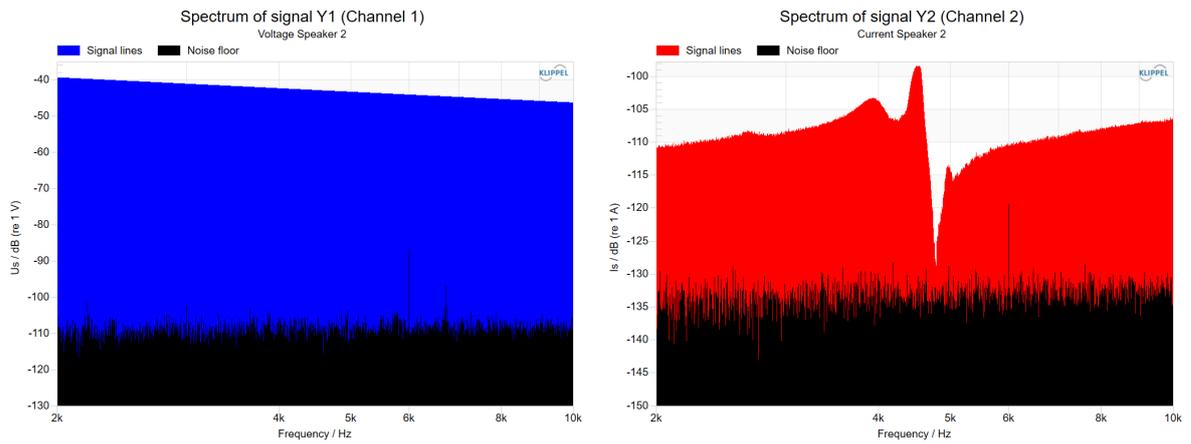


Abbildung 3.49: Spannungs- und Stromverlauf bei eingestellter Nennspannung (5 Vpp), RS PRO 27

3.4.5 CSPT12A03

Aufbau

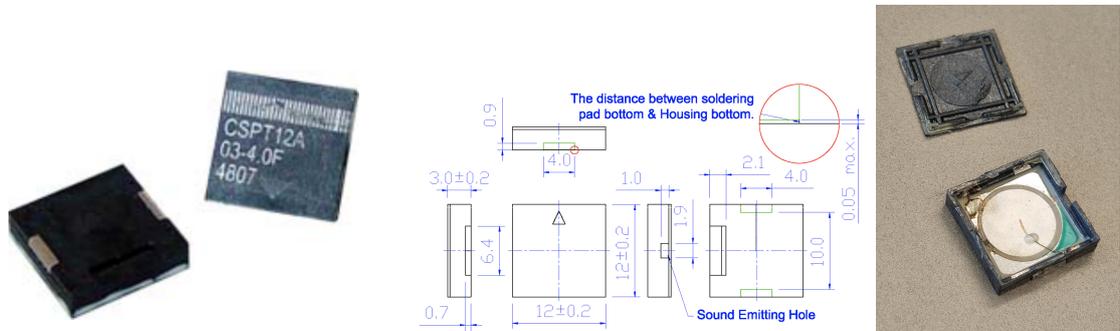


Abbildung 3.50: CSPT12A03 [24] bzw. geöffnet

In Abbildung 3.50 ist das geöffnete rechteckige Gehäuse des Lautsprechers sichtbar. Im Inneren sieht man die auf einer rechteckigen Metallmembran angebrachte runde Piezoscheibe. Die äußeren Anschlusskontakte sind über Lötverbindungen mit einem feinen Draht mit den jeweiligen Komponenten im Inneren des Lautsprechers verbunden. Ein kleiner rechteckiger Schallauslass des Wandlers ist rechts im Bild zu sehen.

Messergebnisse

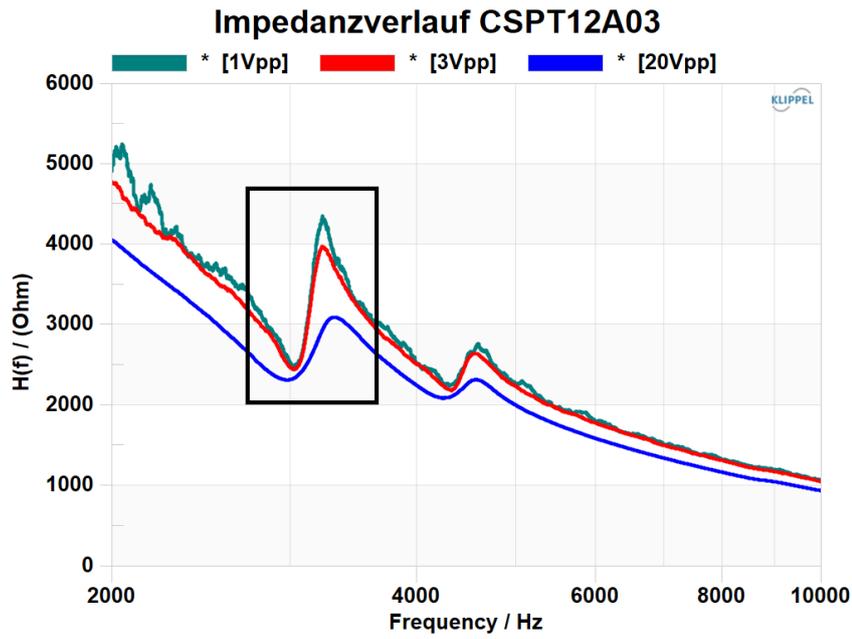


Abbildung 3.51: Impedanzverläufe des CSPT12A03

| CSPT12A03 | Serienresonanzfrequenz [Hz] | Parallelresonanzfrequenz [Hz] |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 Vpp | 3022 | 3230 |
| 3 Vpp | 3022 | 3227 |
| 20 Vpp | 2977 | 3317 |

Tabelle 3.9: Resonanzfrequenzen des CSPT12A03

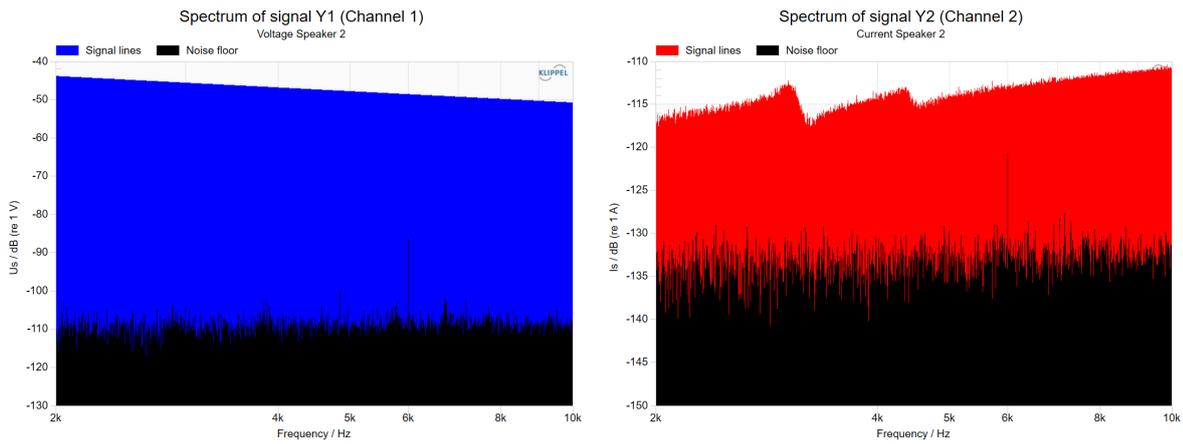


Abbildung 3.52: Spannungs- und Stromverlauf bei eingestellter Nennspannung (3 Vpp), CSPT12A03

4

Diskussion der Messergebnisse

4.1 Elektrodynamische Lautsprecher

Die dynamischen Lautsprecher wurden mit dem LPM-Modul des Klippel-Systems gemessen. Somit konnten Strom-, Spannungs- und Impedanzverlauf über der Frequenz und mit dem Laser die Membranauslenkung frequenzabhängig bestimmt werden. Die Messergebnisse der dynamischen Lautsprecher sind zueinander sehr ähnlich.

4.1.1 Strom-, Spannungs- und Impedanzverlauf

Die Spannung des Anregungssignals wurde am Klippel-System eingestellt und hat einen annähernd konstanten Verlauf über der Frequenz. Der Stromverlauf hat wegen dem Impedanzmaximum bei der Resonanzfrequenz einen Einbruch an dieser Stelle. Bei höheren Frequenzen nimmt der Stromverlauf aufgrund der zunehmenden elektrischen Impedanz der Spule leicht ab. Bei der Impedanzmessung ist ein deutlicher Peak bei Resonanz erkennbar. Bei höheren Frequenzen wirkt der dynamische Lautsprecher induktiv, somit steigt die Impedanz bei höheren Frequenzen (für genauere Erklärung siehe Kapitel 2). Die Impedanz über der Frequenz wird aus den Strom- und Spannungswerten nach dem ohm'schen Gesetz berechnet. In Abbildung 3.7 sind der Spannungs- und Stromverlauf des K 28.40 zu sehen. Es wurde ein Messpunkt nahe der Resonanzfrequenz gewählt. Am Messpunkt (469 Hz) wurde ein Strompegel von -44.9 dBA und ein Spannungspegel von -23.2 dBV gemessen. Diese Werte wurden wie folgt umgerechnet:

$$I = 10^{\frac{-44.9 \text{ dBA}}{20}} = 5.7 \text{ mA}$$

$$U = 10^{\frac{-23.2 \text{ dBV}}{20}} = 69.4 \text{ mV}$$

Danach wurde das ohm'sche Gesetz zur Berechnung der Impedanz verwendet:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{69.4 \text{ mV}}{5.7 \text{ mA}} = 12.2 \Omega$$

Dieser Impedanzwert wurde mit dem Wert des gemessenen Impedanzverlaufs bei 469 Hz in Abbildung 3.6 verglichen. Der gemessene Impedanzwert ist hier 12.2 Ω .

4.1.2 Membranauslenkung

Um ausreichend große Schalldruckpegel im tieffrequenten Bereich zu erreichen, sind sowohl große Membranen als auch große Membranauslenkungen nötig. Für die Membranauslenkung und die damit direkt im Zusammenhang stehende abgestrahlte Wirkleistung relevante Parameter sind die Steifigkeit der Membranaufhängung, die Masse und die Größe der Membran. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Steifigkeit der Membranaufhängung am relevantesten für die abgestrahlte Wirkleistung. Wenn die Frequenz des Signals die Resonanzfrequenz überschreitet, dominiert die Masse, da die Massenträgheit der Membran die Membranauslenkung begrenzt [1, S.201-202]. Generell pendelt die Energie bei Resonanz des Systems ideal zwischen der mechanischen Feder der Aufhängung und der beschleunigten Masse hin und her, was die großen Membranauslenkungen bei der Resonanzfrequenz erklärt.

Zusätzlich zur Membranauslenkung wurde den Messergebnissen die Membranauslenkung pro Spannung hinzugefügt. Diese Diagramme (jeweils rechts von der absoluten Membranauslenkung) zeigen das Verhältnis der Schwingspulenverschiebung $X(f)$ zu der angelegten Spannung $U(f)$ über der Frequenz [12]. Da die Spannungsquelle reale Eigenschaften aufweist, ist der gemessene Spannungsverlauf über der Frequenz nicht konstant und es sind leichte Abweichungen vom eingestellten Wert zu sehen.

In Abbildung 3.7 und 3.8 sind der Spannungs- sowie der Membranauslenkungsverlauf über der Frequenz des K 28.40 zu sehen. Die abgelesenen Werte der Spannung und der Membranauslenkung bei 469 Hz betragen -23.2 dBV und -43.9 dBmm. Der Wert der Membranauslenkung wurde in mm umgerechnet:

$$X = 10^{\frac{-43.9 \text{ dBmm}}{20}} = 0.0064 \text{ mm}$$

Aus dem umgerechneten Spannungs- und Membranauslenkungswert wurde die Membranauslenkung pro Spannung berechnet:

$$\frac{X}{U} = \frac{0.0064 \text{ mm}}{0.069 \text{ V}} = 0.092 \text{ mm/V}$$

Der gemessene Wert bei 469 Hz beträgt 0.130 mm/V und weicht etwas vom berechneten Wert ab.

Im Gegensatz zu den anderen dynamischen Lautsprechern zeigt der BF 37 einen leicht abweichenden Verlauf der Membranauslenkung in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei diesem Lautsprecher ist keine Überhöhung der Membranauslenkung bei der Resonanzfrequenz sichtbar. Da der BF 37 ein Breitbandlautsprecher mit guter Tieftonwiedergabe ist, ist er so konstruiert, dass bei tiefen Frequenzen durch großen Hub ein hoher Schalldruckpegel erreicht werden kann. Das wurde durch eine hohe Gesamtmasse des schwingenden Systems realisiert. Die bewegte Masse des BF 37 beträgt 1 g, im Vergleich dazu sind die Massen des K 40 und K 70 mit 0.1 g und 0.8 g geringer, obwohl die Membranfläche des BF 37 kleiner ist.

Es wurde versucht, die Membranauslenkungsverläufe über der Frequenz der dynamischen Lautsprecher durch Filter zu beschreiben. Die Membranauslenkung des BF 37 über der Frequenz weist eindeutiges Tiefpassverhalten auf (siehe Abbildung 3.23). Der Verlauf hat einen Abfall von 40 dB/Dekade und entspricht deshalb einem Tiefpass 2. Ordnung. Die anderen Lautsprecher haben ebenfalls den Verlauf eines Tiefpasses 2. Ordnung aber mit einer Überhöhung bei der Resonanzfrequenz.

4.1.3 Resonanzfrequenz

Aus den Impedanzkurven konnte die Resonanzfrequenz bestimmt werden. Die gemessenen Resonanzfrequenzen wurden mit den Resonanzfrequenzen aus dem Datenblatt verglichen und sind in Tabelle 4.1 ersichtlich. Beim K 28.40 passt die gemessene Resonanzfrequenz sehr gut mit der im Datenblatt angegebenen Resonanzfrequenz überein. Bei den anderen Lautsprechern ist die gemessene Resonanzfrequenz teilweise deutlich höher. Ein Grund dafür kann sein, dass die Lautsprecher neu sind und ohne Einspielzeit noch eine etwas steifere Membranaufhängung besitzen.

| | K 28.40 | K 23 | K 70 | BF 37 | K 40 |
|--------------------------------------|---------|------|------|-------|------|
| Resonanzfrequenz [Hz] | | | | | |
| laut Datenblatt [13, 14, 15, 16, 17] | 450 | 750 | 300 | 185 | 520 |
| Resonanzfrequenz [Hz] gemessen | 452 | 836 | 338 | 255 | 612 |

Tabelle 4.1: Vergleich der im Datenblatt angegebenen und den gemessenen Resonanzfrequenzen der dynamischen Lautsprecher

4.1.4 Erklärung der Begriffe “Nennbelastbarkeit“ und “Musikbelastbarkeit“

Laut dem Hersteller *Visaton* ist die Nennbelastbarkeit wie folgt definiert:

„Die Nennbelastbarkeit des Lautsprechers, gemessen in W (Watt), gibt an, welche elektrische Leistung der Lautsprecher im Dauerbetrieb aufnehmen kann.“

Dabei wird die Nennbelastbarkeit durch ein definiertes Rauschsignal, welches eine höhere Leistung bei tiefen Frequenzen aufweist, ermittelt [25].

Die Musikbelastbarkeit wird von *Visaton* wie folgt angegeben:

„Die Musikbelastbarkeit in Watt ist diejenige kurzfristige (max. 2 Sek) Impulsbelastbarkeit, die keine Beschädigung des Lautsprechers hervorruft und die Wiedergabequalität nicht hörbar beeinflusst.“ [26]

Laut der Norm 60268-5 muss die Nenn-Rauschleistung, die maximale Kurzzeit-Eingangsleistung und die maximale Langzeit-Eingangsleistung angegeben werden.

„Die nach U_n^2/R berechnete elektrische Leistung muss angegeben werden. Dabei ist U_n die Nenn-Rauschspannung und R die Nennimpedanz.“

Dabei darf die Nenn-Rauschleistung auch als “Nennbelastbarkeit“ angegeben werden.

Bei der maximalen Kurzzeit-Eingangsleistung und der maximalen Langzeit-Eingangsleistung wird die Berechnung der Leistung statt der Nenn-Rauschspannung mit der maximalen Kurzzeit-Eingangsspannung und der maximalen Langzeit-Eingangsspannung durchgeführt.

Die Nenn-Rauschspannung beschreibt die maximale Rauschspannung im Nenn-Frequenzbereich, welche dem Lautsprecher während eines kontinuierlichen Betriebs über einen Zeitraum von 100 Stunden keinen Schaden zufügt. Die maximale Kurzzeit-Eingangsspannung definiert die oberste Grenze der Rauschspannung, die der Lautsprecher über einen Zeitraum von 1 Sekunde hinweg tolerieren kann, ohne dabei Schaden zu erleiden. Dabei werden die Tests 60-mal in Abständen von 1 Minute durchgeführt. Hingegen definiert die maximale Langzeit-Eingangsspannung die oberste Grenze der Rauschspannung, die der Lautsprecher über eine Zeitspanne von 1 Minute hinweg verkraften kann ohne dabei Schaden zu nehmen. Für diese Tests erfolgen zehn Durchführungen in Intervallen von 2 Minuten [27].

Somit stellt die vom Hersteller *Visaton* angegebene Musikbelastbarkeit die in der Norm EN 60268-5 definierte Kurzzeit-Eingangsleistung dar.

4.2 Elektromagnetische Buzzer

Eine LPM-Messung der elektromagnetischen Wandler war nicht möglich, somit wurde eine TRF-Messung durchgeführt. Hier wurde die Impedanz bei drei verschiedenen Versorgungsspannungen gemessen. Die drei verschiedenen Spannungen sind jene vom Hersteller angegebene Minimal- und Maximalspannung, sowie die Nennspannung. Der DBX05LFX050N zeigt im Impedanzverlauf induktives Verhalten, das heißt, dass die Impedanz mit steigender Frequenz zunimmt. Die Resonanzspitzen sind sehr klein und daher nicht leicht erkennbar. Die gemessene Resonanz bei Nennspannung liegt deutlich niedriger als die Resonanzfrequenz, welche im Datenblatt angegeben ist (siehe Tabelle 4.2). Der Strom- und Spannungsverlauf des DBX05LFX050N wurden bei der Nennspannung (5 Vrms) gemessen. Der Spannungs- sowie Stromverlauf sinken mit steigender Frequenz. Jedoch hat der Stromverlauf einen größeren Abfall über der Frequenz (induktives Verhalten). Der DC-Wandler TDK SDC1610M5 wurde nicht separiert vom Oszillator gemessen.

| | TDK SDC1610M5 | DBX05LFX050N |
|--|---------------|--------------|
| Resonanzfrequenz [Hz] laut Datenblatt [18, 19] | 1920 - 2880 | 2400 |
| Resonanzfrequenz [Hz] gemessen | - | 1562 |

Tabelle 4.2: Resonanzfrequenzen der elektromagnetischen Buzzer

4.3 Piezoelektrische Buzzer

Auch die piezoelektrischen Wandler konnten nicht mit dem LPM-Modul von Klippel gemessen werden. Deshalb wurde bei allen wechselstrombetriebenen Buzzern mit dem TRF-Modul der Impedanzverlauf bei Minimalspannung, Nennspannung und Maximalspannung bestimmt sowie der Spannungs- und Stromverlauf bei der Nennspannung. Die Spannungsverläufe sind sehr ähnlich zueinander. Sie haben einen leichten Abfall über der Frequenz. Die Stromverläufe hingegen weisen durch das kapazitive Verhalten einen Anstieg über der Frequenz auf.

Der DC-Buzzer, welcher mit Gleichstrom gespeist werden musste und sein eigenes Signal mittels verbautem Oszillator generiert, wurde nicht vermessen.

Die Resonanzfrequenzen der Wandler befanden sich, bis auf eine etwas niedrigere gemessene Resonanzfrequenz des CSPT12A03, immer im Bereich der vom Hersteller angegebenen Daten. Alle Impedanzkurven weisen kapazitives Verhalten auf. Die Impedanzkurven über der Frequenz der piezoelektrischen Buzzer weisen einen sehr unterschiedlichen Verlauf auf. Zusätzlich ist oft nicht eindeutig zu erkennen, wo sich die Serien- und Parallelresonanzfrequenzen befinden. Außer beim RS PRO 27, welcher in Abbildung 3.48 eine deutliche Resonanzspitze bei ca. 4800 Hz aufweist. Bei der Nennspannung von 5 V ist sie am deutlichsten ausgeprägt. Allein mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild des realen piezoelektrischen Wandlers (siehe Abbildung 2.6) ist es nicht möglich den Impedanzverlauf des RS PRO 27 zu beschreiben, da die Höhe und Güte der Spitzen der Serien- und Parallelresonanz bei Veränderung eines Bauteils immer gleich beeinflusst werden. Fügt man aber z.B. einen Widerstand parallel zu C ein, kann damit die Serienresonanz geschwächt werden, sodass die Spitze der Parallelresonanz deutlicher ausgeprägt ist. Durch Verkleinerung des Widerstandes R des Serienschwingkreises ist es zusätzlich möglich die Höhe der Impedanz bei Resonanz und die Güte zu vergrößern.

Bei Öffnung der Gehäuse kam es zu interessanten Ergebnissen. Es stellte sich heraus, dass der im Datenblatt als elektromagnetischer Buzzer angegebene RS PRO 12x12 eigentlich nach dem Piezo-Prinzip aufgebaut ist. Auch der zu höheren Frequenzen hin fallende Impedanzverlauf spricht für ein kapazitives Verhalten des Wandlers, wie es bei Piezos üblich ist. Etwaige Vorschalt Elemente oder Elektronik konnten im Gehäuse nicht entdeckt werden. Es scheint sich um eine falsche Beschreibung seitens des Herstellers zu handeln.

| | 12x12 | 17 | 13.8 | 27 | CSPT |
|--|--------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Resonanzfrequenz [Hz] laut Datenblatt [20, 21, 22, 23, 24] | 4000 ± 500 | 4000 ± 500 | 4000 ± 500 | 4200 ± 500 | 4000 ± 500 |
| Serienresonanzfrequenz [Hz] gemessen | 4550 | 4069 | - | 4502 | 3022 |
| Parallelresonanzfrequenz [Hz] gemessen | 4816 | 4343 | - | 4796 | 3227 |

Tabelle 4.3: Gemessene Daten der piezoelektrischen Buzzer

5

Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die Wandlerprinzipien von elektrodynamischen, elektromagnetischen und piezoelektrischen Schallwandlern theoretisch beleuchtet. Die verschiedenen Miniaturlautsprecher, die auf diesen Prinzipien basieren und uns zur Verfügung gestellt wurden, wurden dabei ausschließlich mit dem Klippel-System vermessen. Für die Messungen der elektrodynamischen Lautsprecher wurde das LPM-Modul (Linear Parameter Measurement Module) von Klippel verwendet. Bei den elektromagnetischen und piezoelektrischen Buzzern beschränkten sich die Messungen aufgrund von wiederholten Messproblemen schlussendlich auf die Strom- und Spannungsmessung und der dadurch resultierenden Impedanzmessung, welche mit dem TRF-Modul (Transfer Function Module) von Klippel durchgeführt wurden. Es wäre zwar möglich gewesen, weitere alternative Messmethoden zu suchen, doch hätte dies den zeitlichen Rahmen der Arbeit gesprengt. Durch das Zerlegen der Schallwandler konnten ihr Aufbau und ihre Funktionsweise besser verstanden werden.

Weitere Schritte für zukünftige Arbeiten wären die Bestimmung bzw. Überprüfung der akustischen Parameter der Schallwandler, um sie hinsichtlich ihres SPL-Verlaufs miteinander vergleichen zu können. Auch eine subjektive Bewertung und Vergleich der Klangqualität könnte im Rahmen einer psychoakustischen Versuchsreihe durchgeführt werden.