

# **Untersuchungen zum Stopfen bei Hörnern**

Diplomarbeit aus musikalischer Akustik

durchgeführt von

**Stefan Wachter**

Institut für Wiener Klangstil  
der Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Vorstand: Univ.-Prof. Mag. Gregor Widholm

und

Institut für elektronische Musik und Akustik  
der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Univ.-Prof. DI Mag. Dr. techn. Robert Höldrich

Wien, im Oktober 2008

## Zusammenfassung

Die "Stopftechnik" bei Hörnern ist eine seit mehr als 250 Jahren angewandte Spieltechnik, um den Klang und die Intonation zu verändern. Je weiter die rechte Hand in den Schalltrichter eingeführt wird, desto tiefer wird der Ton. Ab einem bestimmten Punkt, wenn die Hand ca. 95% der Schalltrichteröffnung verschließt, springt die Intonation plötzlich um einen Halbton hinauf. Unter den Akustikern tobt aber noch immer der Streit, ob der Ton nun höher oder tiefer wird. In dieser Arbeit wird das offene und gestopfte Horn durch Eingangsimpedanz und Übertragungsfunktionsmessungen akustisch untersucht. Zudem werden die Druckknoten und Bäuche im Instrument mit der Simulationssoftware „Optimierer“ dargestellt. Mit diesen umfassenden Untersuchungen zum gestopften Horn werden die akustischen Vorgänge geklärt.

## Abstract

Muting techniques have been used for about 250 years to modify a horn's sound and intonation. The more the right hand is being fed into the bell the more the pitch drops. At a certain point, however, when the hand closes approximately 95 percent of the bell opening, the pitch produced is one semitone sharper than it would be for the open instrument. Acousticians still heavily discuss whether the pitch in fact gets higher or lower. In this thesis the open and stopped horn is acoustically analysed by means of input impedance and transfer function measurements. In addition, nodes and antinodes of the instrument are depicted by the simulation software "Optimiser". By comprehensive studies acoustic processes shall be revealed with regard to the stopped horn.

## **Danksagung**

Zu danken ist an erster Stelle Prof. Dr. Robert Höldrich vom Institut für elektronische Musik und Akustik an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz und Prof. Mag. Gregor Widholm vom Institut für Wiener Klangstil an der Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

Das Institut für Wiener Klangstil der Musikuniversität Wien, das seit vielen Jahren im Bereich der Instrumentenakustikforschung tätig ist, bot mir den institutionellen Rahmen und die technischen Mittel zur Durchführung der Messungen und Analysen. Großzügig unterstützt wurde ich dabei von meinem Betreuer Prof. Mag. Gregor Widholm. Für fachliche Hilfestellungen möchte ich DI (FH) Alexander Mayer, Prof. Dr. Wilfried Kausel und Dr. Sandra Carral danken.

Mein Dank gilt auch meinem ehemaligen Hornlehrer Mag. Peter Heckl und meinem derzeitigen Lehrer Prof. Günter Högner und seinem Assistenten Mag. Hermann Ebner, die mir Verständnis und manchmal auch Nachsicht für mein zweites Studium entgegen gebracht haben.

Bei Antonia Potyka Reiter, DI Gerda Strobl, Mag. DI Martin Piskernig und Mag. Heinrich Wachter möchte ich mich für das Korrekturlesen herzlich bedanken.

Ohne die großartige Unterstützung meiner Eltern und meiner Schwester Angela wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Stopfen bei Hörnern - Geschichtliche Aspekte der rechten Hand beim Hornspiel</b>    | <b>3</b>  |
| 2.1      | Naturhorn und die Stopftechnik.....                                                    | 4         |
| 2.2      | Neues Zeitalter - Ventilhörner und der Gebrauch von Dämpfern und der Stopftechnik..... | 9         |
| 2.3      | Dämpferarten .....                                                                     | 14        |
| 2.3.1    | Nicht transponierende Dämpfer .....                                                    | 14        |
| 2.3.2    | Transponierende Dämpfer.....                                                           | 15        |
| 2.4      | Notation von gedämpften und gestopften Noten .....                                     | 18        |
| <b>3</b> | <b>Physikalische Grundlagen</b>                                                        | <b>20</b> |
| 3.1      | Zylindrisches Rohr.....                                                                | 28        |
| 3.1.1    | Berechnung der Eingangsimpedanz .....                                                  | 28        |
| 3.1.2    | Druckverlauf im zylindrischen Rohr.....                                                | 30        |
| 3.1.3    | Übertragungsfunktion eines zylindrischen Rohres .....                                  | 32        |
| 3.1.4    | Thermische Verluste des zylindrischen Rohres .....                                     | 33        |
| 3.2      | Konisches Rohr.....                                                                    | 34        |
| 3.2.1    | Berechnung der Eingangsimpedanz .....                                                  | 35        |
| 3.2.2    | Druckverlauf eines konischen Rohres.....                                               | 36        |
| 3.2.3    | Übertragungsfunktion eines konischen Rohres.....                                       | 38        |
| 3.2.4    | Thermische Verluste eines konischen Rohres .....                                       | 39        |
| 3.3      | Kombination von zylindrischem und konischem Rohr .....                                 | 42        |
| 3.4      | Schalltrichter.....                                                                    | 43        |
| <b>4</b> | <b>Messungen am Instrument</b>                                                         | <b>46</b> |
| 4.1      | Messanordnung.....                                                                     | 46        |
| 4.1.1    | BIAS Messkopf.....                                                                     | 49        |
| 4.1.2    | Stopfdämpfer .....                                                                     | 52        |
| 4.1.3    | Instrument.....                                                                        | 54        |
| 4.2      | Eingangsimpedanz und Impulsantwort.....                                                | 56        |
| 4.2.1    | Das „offene Horn“ .....                                                                | 56        |
| 4.2.2    | Vergleich von F Horn zum B Horn .....                                                  | 59        |
| 4.2.3    | Horn ohne Schallbecher .....                                                           | 60        |
| 4.2.4    | Horn mit Stopfdämpfer .....                                                            | 62        |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.5 Vergleich Horn mit und ohne Stopfdämpfer .....                                  | 63         |
| 4.2.6 Vergleich F Horn mit Stopfdämpfer zu B Horn mit Stopfdämpfer .....              | 65         |
| 4.2.7 Vergleich Horn mit transponierendem und nicht transponierendem<br>Dämpfer ..... | 65         |
| 4.3 Messung der Übertragungsfunktion .....                                            | 67         |
| 4.3.1 Messkopf mit integriertem Mikrofon .....                                        | 67         |
| <b>5 Analyse der Messergebnisse</b> .....                                             | <b>72</b>  |
| 5.1 Eingangsimpedanz .....                                                            | 72         |
| <b>6 Simulation eines Hornes</b> .....                                                | <b>80</b>  |
| 6.1 Optimierung der Eingangsimpedanz .....                                            | 80         |
| 6.1.1 Horn ohne Hand .....                                                            | 82         |
| 6.1.2 Horn mit Stopfdämpfer .....                                                     | 83         |
| 6.1.3 Horn ohne Schallbecher .....                                                    | 84         |
| 6.2 Berechnung des Druckverlaufs im Instrument .....                                  | 86         |
| 6.2.1 Horn ohne Hand .....                                                            | 86         |
| 6.2.2 Horn mit Stopfdämpfer .....                                                     | 87         |
| 6.2.3 Horn ohne Schallbecher .....                                                    | 88         |
| 6.2.4 Stopfdämpfer .....                                                              | 89         |
| 6.3 Berechnung der Ausgangsimpedanz .....                                             | 89         |
| 6.3.1 Horn ohne Hand .....                                                            | 92         |
| 6.3.2 Horn mit Stopfdämpfer .....                                                     | 92         |
| 6.3.3 Horn ohne Schallbecher .....                                                    | 93         |
| <b>7 Phänomen Stopfen - Die Erkenntnisse</b> .....                                    | <b>94</b>  |
| 7.1 Modellbildung des gestopften Hornes .....                                         | 94         |
| 7.2 Resultate .....                                                                   | 111        |
| <b>8 Zusammenfassung - Ausblick</b> .....                                             | <b>120</b> |
| <b>9 Literaturverzeichnis</b> .....                                                   | <b>121</b> |
| <b>10 Abbildungsverzeichnis</b> .....                                                 | <b>126</b> |
| <b>11 Anhang</b> .....                                                                | <b>133</b> |
| 11.1 Messdaten Eingangsimpedanz .....                                                 | 133        |
| 11.2 Versuchsaufbauten zur Messung der Übertragungsfunktion .....                     | 139        |
| 11.2.1 Messung mit BIAS Messkopf .....                                                | 139        |
| 11.2.2 Messung mit Sirene .....                                                       | 141        |
| 11.2.3 BIAS Messung mit externem Messmikrofon .....                                   | 145        |
| 11.3 Lebenslauf .....                                                                 | 148        |

## 1 Einführung

Im Rahmen meines Studiums Elektrotechnik – Toningenieur an der Universität für Musik und darstellenden Kunst und der Technischen Universität Graz machte ich es mir zur Aufgabe ein Diplomarbeitsthema zu bearbeiten, welches einerseits die durch das Studium der Akustik gestellten Anforderungen erfüllt und andererseits auch meine persönliche Sphäre berührt. Da ich parallel zu Elektrotechnik – Toningenieur auch das Konzertfachstudium Horn an der gleichen Musikuniversität studiere, empfinde ich es als großes Glück, ein Thema bearbeiten zu dürfen, das mit „meinem“ Instrument Horn in Beziehung steht.

Einer der ersten, der sich wissenschaftlich mit Instrumentenakustik, im speziellen mit dem Horn beschäftigte, war Willi Aebi<sup>1</sup>, der in den 60iger Jahren des 20. Jahrhunderts erstmals die innere Akustik des Horns untersuchte. Weitere Forschungen über das Horn wurden von Gregor Widholm<sup>2</sup>, Institutsvorstand des Instituts für Wiener Klangstil, durchgeführt.

---

<sup>1</sup> Aebi, Willi: *Das Waldhorn und seine innere Akustik*, in: Schweizer Bauzeitung, 87. Jahrgang, Heft 38, Seite 1 - 9, 18. September 1969.

<sup>2</sup> Widholm, Gregor: *Akustik der Horninstrumente, Die Musik in Geschichte und Gegenwart, Allgemeine Enzyklopädie der Musik*, Band 4, Seite 395 – 414, Stuttgart 1996.

Über die physikalischen Vorgänge des gestopften Horns diskutierten Robert Pyle<sup>3</sup> und Willi Aebi<sup>4</sup> in der Fachzeitschrift „The Horn Call“. Für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus folgende Fragestellungen:

- Erhöht sich der Ton beim Stopfen?
- Durch welche Adaption kann der Effekt des Stopfens erreicht werden?
- Springt der Ton beim Stopfen?
- Was ereignet sich im gestopften Horn?

Diese Diplomarbeit soll die physikalischen Vorgänge im gestopften Horn untersuchen und die zuvor gestellten Fragen beantworten.

---

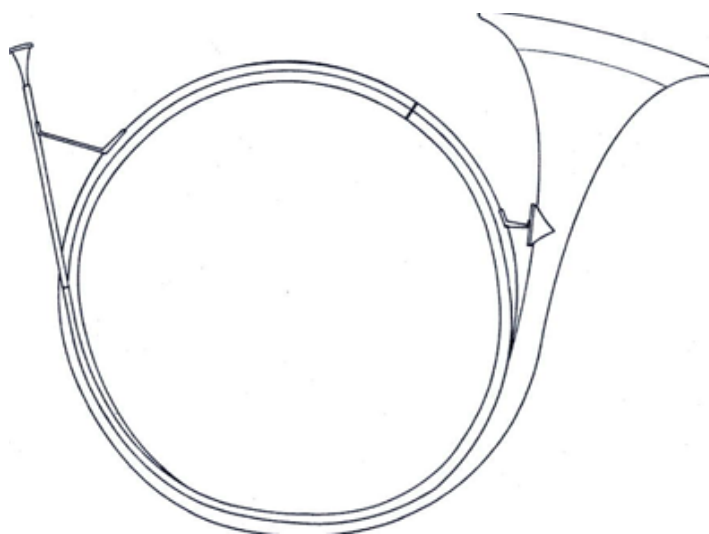
<sup>3</sup> Pyle, Robert: *Audiopyle, Factitious Tones and Hand-Stopping*, in: The Horn Call, Vol. 21, Nr. 1, Seite 36 – 43, Oktober 1990.

<sup>4</sup> Aebi, Willi: *Stopped Horn*, in: The Horn Call Vol. 6, No. 2, Seite 47 – 49, Mai 1976.

## 2 Stopfen bei Hörnern - Geschichtliche Aspekte der rechten Hand beim Hornspiel

Die Vorfahren des heute gebräuchlichen Instruments Horn stammen schon aus der Urzeit. Ca. 2000 vor Christus wurden Schneckenhörner aus Assyrien für diverse Kult-handlungen verwendet. Halbmondförmige gebogene Terrakotta – Hörner wurden um 700 vor Christus. von den Etruskern aus Griechenland nach Mittelitalien gebracht und später vom römischen Militär für Signalzwecke (Cornu) verwendet.<sup>5</sup>

Ende des 17. Jahrhunderts wurden unter König Ludwig XIV.<sup>6</sup> erstmals Hornisten beschäftigt, die auf einem Parforcehorn (Abbildung 1) spielten. Parallel zum Parforcehorn wurde auf dem Cor da caccia gespielt. Dieses Instrument ähnelte einer rund gebauten Trompete und wurde mit einem Kesselmundstück gespielt. Als Spieltechnik wurde die Clarinblasweise angewendet.



**Abbildung 1 :** Cor de chasse - trompe de chasse - Parforcehorn, ab 1680<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> Vgl: Holmes, Peter: *Frühgeschichte, Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, Allgemeine Enzyklopädie der Musik, Band 4, Seite 361 - 368, Stuttgart 1996

<sup>6</sup> König Ludwig XIV. (\* 5.9.1638 in Saint-Germain-en-Laye; † 1.9.1715 in Versailles).

<sup>7</sup> Schütz, Iris: *Jagdhorn, Wiener Horn, Doppelhorn – in der Geschichte des Wiener Waldhornvereins*, Diplomarbeit 1983, Seite 10, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.



Durch den böhmischen Grafen Franz Anton von Spork<sup>8</sup> erzielte das Horn einen großen Bekanntheitsgrad. Er lernte das Horn im Jahr 1680/81 in Frankreich kennen und entsandte Wenzel Sweda<sup>9</sup> und Peter Rölling<sup>10</sup> nach Frankreich, damit diese das Spielen auf dem Horn erlernten. Durch Graf Anton von Spork wurden vermutlich auch die ersten Hornisten fix angestellt und so dauerhaft ins Orchester integriert.<sup>11</sup>

## 2.1 Naturhorn und die Stopftechnik

Das Cor da caccia (für sehr hohe Lagen), bzw. Cor de chasse (für tiefere Lagen) wurde um 1700 von den Gebrüdern Johann Michael<sup>12</sup> und Johann Leichamschneider<sup>13</sup> gemeinsam mit anderen Instrumentenmachern zum Orchesterhorn umgebaut. Durch Verkleinerung des Kreisdurchmessers konnte das Horn nun beidhändig gehalten werden, jedoch lag die rechte Hand nicht in der Stürze, sondern fasste das Schallstück am Rande. In der Militärmusik Italiens wurde diese Handhaltung sogar bis Ende des 19. Jahrhunderts angewendet.

In den Jahren 1753/54 entwickelte Anton Joseph Hampel<sup>14</sup> in Dresden gemeinsam mit seinem Instrumentenbauer Johann Werner<sup>15</sup> aus dem Cor da caccia das Inventionshorn (Abbildung 2).

---

<sup>8</sup> Graf Franz Anton von Spork (\* 9.3.1662 Lissa/Böhmen (Lysá nad Labem/CZ), † 30.3.1738 Lissa), Staatsmann und Kunstmäzen.

<sup>9</sup> Wenzel Sweda (\* 1638, † 1710), Jäger im Dienste von Graf Franz Anton von Spork.

<sup>10</sup> Peter Röllig (\* 1650, † 1723), Jäger im Dienste von Graf Franz Anton von Spork.

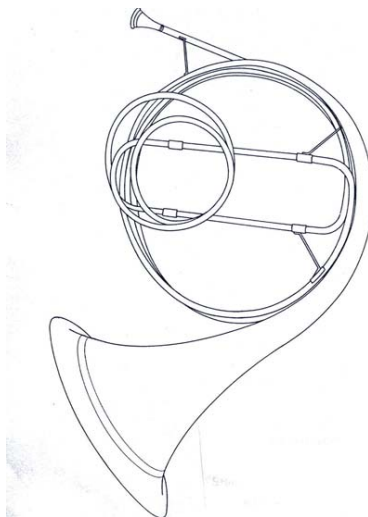
<sup>11</sup> Eine detaillierte Darstellung zur Geschichte des Horns und deren Spieltechnik findet sich bei Ahrens Christian, *Geschichte des Horns, seiner Spieltechnik und musikalische Nutzung, Die Musik in Geschichte und Gegenwart, Allgemeine Enzyklopädie der Musik*, Band 4, Spalte 382 ff, Stuttgart 1996.

<sup>12</sup> Johann Michael Leichamschneider (\* 26.8.1676 Osterberg/Schwaben, † 3.12.1751 Wien), Instrumentenmacher.

<sup>13</sup> Johann Leichamschneider (\* 26.6.1679 Osterberg/Schwaben, † 16.12.1742 Wien), Instrumentenmacher.

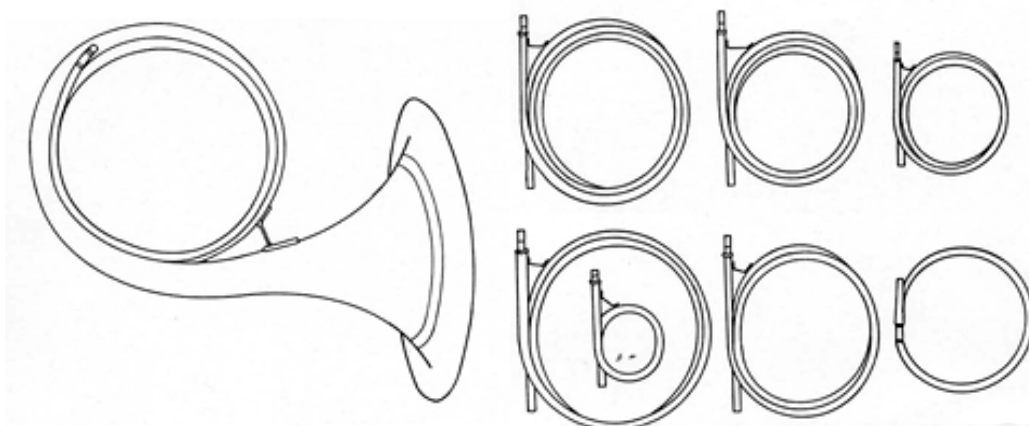
<sup>14</sup> Anton Joseph Hampel (\* um 1710 in Prag, † 30. März 1771 Dresden), deutscher Hornist.

<sup>15</sup> Johann Werner, Instrumentenbauer aus Dresden.



**Abbildung 2 :** Inventionshorn mit verschiedenen austauschbaren Stimmzügen, um 1800<sup>16</sup>

Mit dem Inventionshorn war es nun möglich durch das Aufsetzen von verschiedenen Stimmbögen in verschiedenen Tonarten zu spielen (Abbildung 3). Zum Wechseln des Bogens wird eine gewisse Zeit benötigt.



**Abbildung 3 :** Orchester-Waldhorn mit mehreren Inventionsbögen<sup>17</sup>

Die größte und revolutionärste Entwicklung von Hampel war die Stopftechnik. Parallel dazu entwickelte auch der Straßburger Jean Joseph Rodolphe<sup>18</sup> die Stopftechnik.

---

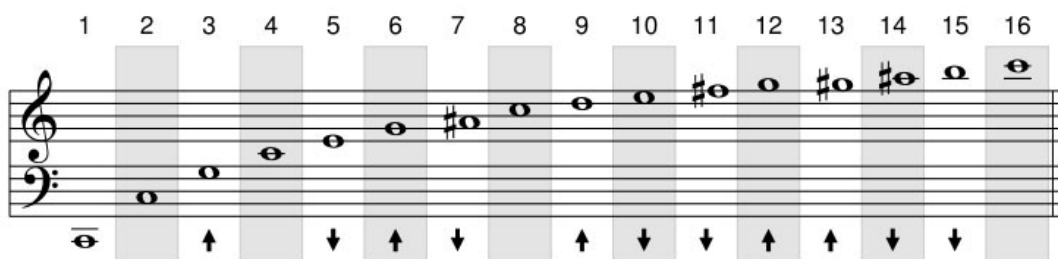
<sup>16</sup> Schütz, Iris: *Jagdhorn, Wiener Horn, Doppelhorn – in der Geschichte des Wiener Waldhornvereins*, Seite 21, Diplomarbeit 1983, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

<sup>17</sup> Schütz, Iris: *Jagdhorn, Wiener Horn, Doppelhorn – in der Geschichte des Wiener Waldhornvereins*, Seite 17, Diplomarbeit 1983, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

<sup>18</sup> Jean Joseph Rodolphe (\* 1730, † 1812), französischer Musiker (Studium der Komposition, Violine und Horn).

Zuvor wurde ausschließlich im Clarinregister<sup>19</sup> gespielt, da dort die Naturtöne eng beieinander liegen. Das Spielen im Clarinregister stellte an jeden ersten Hornisten extreme Anforderungen, da über weite Strecken um das g<sub>2</sub> (in F) gespielt wurde und der Tonumfang zwischen c<sub>2</sub> (in F) und g<sub>3</sub> (in F) lag.

Neben dem Spielen in Clarinregistern wurde nun auch das Spielen in tiefen Lagen (unter dem c<sub>2</sub> in F) mit Hilfe der Stopftechnik gebräuchlich. Da unter dem c<sub>2</sub> (in F) die Naturtöne (Abbildung 4) weiter auseinander liegen, konnte mit der Stopftechnik die große chromatische Lücke geschlossen werden.



**Abbildung 4 :** Naturtonreihe, 1. bis 16. Teilton

Durch die Stopftechnik veränderte sich auch die Handhaltung beim Horn. Die rechte Hand umfasste nicht mehr den Rand des Schalltrichters, sondern man legte die Hand innenseitig in den Schallbecher. Durch das Einführen der Hand in den Schallbecher verringert sich die Tonhöhe solange, bis die Öffnung zu 95% geschlossen wird, dann springt die Grundfrequenz ca. um einen Halbton in die Höhe. Durch diese neue Handhaltung und die Stopftechnik konnte das Horn erstmals in der Mittel- und Tiefenlage melodisch genutzt werden. Diese Technik wurde für den 2. Hornisten (Secondo Spieler bzw. Secundarius) zur Hauptaufgabe, der chromatische Passagen und atemberaubende Sprünge zu bewältigen hatte. In Abbildung 5 ist die Handhaltung der rechten Hand für das offene und gestopfte Horn dargestellt.

<sup>19</sup> Vgl.: Janetzky, Kurt: *Zur Problematik des Hornblasens in der Clarinlage, Aus der Werkstatt eines Hornisten*, Seite 87 – 92, Wien 1993.



**Abbildung 5:** Offen (links) und gestopft (rechts)<sup>20</sup>

Die Innovationen von Hampel aus Dresden waren nicht nur die Entwicklung und Vervollkommnung der Stopftechnik. Sie hatten auch Auswirkungen auf den Klang, welcher weicher, biegsamer, dynamisch flexibler und daher universell einsetzbar wurde.<sup>21</sup> Durch diesen Klang erreichte das Horn eine deutliche Abgrenzung zum Barockhorn und zur Trompete. In Sinfonien und Orchesterwerken wurden größtenteils Naturtöne geblasen. Als obere Grenze wurde meistens das  $b_2$  (in F) notiert und unterhalb des  $c_1$  (in F) standen durch die Naturtonskala nur zwei Töne zur Verfügung. Durch die Naturtonreihe des Horns, die im Umfang vom kleinen c bis  $g_2$  nur 12 Naturtöne besitzt, hatte die 2. Stimme nur die Möglichkeit in Terzlage bzw. in Quintlage zu spielen. Daher kommt auch der bekannte Begriff „Hornquinten“ (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Wolfgang Amadeus Mozart, Ausschnitt aus der G - Dur Sinfonie, Satz Scherzo/Trio KV 550, Horn 1 und 2

In der Kammermusik und in den Solokonzerten des 18. Jahrhunderts lag der Anteil der gestopften Töne zwischen 15 und 25% (Mittelwert bei 20%). Eine Ausnahme bildet zum Beispiel der erste Satz von Mozarts<sup>22</sup> Hornquintett KV 407. In diesem Satz liegt

<sup>20</sup> Fröhlich, Joseph: *Hornschnule*, Hamburg 1810.

<sup>21</sup> Ahrens, Christian: *Geschichte des Horns, seiner Spieltechnik und musikalische Nutzung, Die Musik in Geschichte und Gegenwart, Allgemeine Enzyklopädie der Musik*, Band 4, Spalte 382, Stuttgart 1996.

<sup>22</sup> Wolfgang Amadeus Mozart (\* 27.1.1756 in Salzburg, † 5.12.1791 in Wien), österreichischer Komponist.

der Anteil des Stopfens bei 10%. Im zweiten Satz hingegen liegt dieser Anteil bei 31%. In der Klassik werden meist ca. 66% bis 75% offen geblasen.<sup>23</sup>

Oft wurden gestopfte Töne benutzt um einen anderen Klangcharakter zu erreichen, wie zum Beispiel in Beethovens<sup>24</sup> 3. Sinfonie<sup>25</sup> in Es - Dur, Scherzo (Trio) oder in der 7. Sinfonie<sup>26</sup> in A - Dur, 3. Satz, 2. Horn die Wechselnote fis - g.

Um den Anteil der gestopften Töne so gering wie möglich zu halten, schrieben manche Komponisten für mehrere Hörner mit verschiedenen Inventionsbögen. In Abbildung 3 sind die verschiedenen Inventionsbögen dargestellt. In der Oper Don Carlo von Guiseppe Verdi<sup>27</sup> musste jede Stimme in der Horngruppe einen anderen Bogen verwenden. Für diese Oper musste das 1. Horn einen D- und das 2. Horn einen H- Inventionsbogen verwenden.

Dagegen das 3. Horn einen Es- und das 4. Horn einen A Basso- Inventionsbogen. Ausschnitt aus der Oper siehe in Abbildung 7.

---

<sup>23</sup> Ahrens, Christian: *Geschichte des Horns, seiner Spieltechnik und musikalische Nutzung Die Musik in Geschichte und Gegenwart, Allgemeine Enzyklopädie der Musik*, Band 4, Spalte 382, Stuttgart 1996.

<sup>24</sup> Ludwig van Beethoven (\* 1770 in Bonn, † 26.3.1827 in Wien), deutscher Komponist.

<sup>25</sup> Vgl. Beethoven, Ludwig van: *Sinfonie Nr. 3 op. 55 -Eroica-*, Hrsg. Igor Makevitsch, Frankfurt am Main 1872.

<sup>26</sup> Vgl. Beethoven, Ludwig van: *Sinfonie Nr. 7 op. 92*, Hrsg. Igor Makevitsch, Frankfurt am Main 1872.

<sup>27</sup> Guiseppe Verdi (\*10.10.1813 in Le Roncole bei Parma, † 27.1.1901 in Mailand), italienischer Komponist.



Abbildung 7 : Guiseppe Verdi, Ausschnitt aus Don Carlo, 1. Akt, Horn 1-4

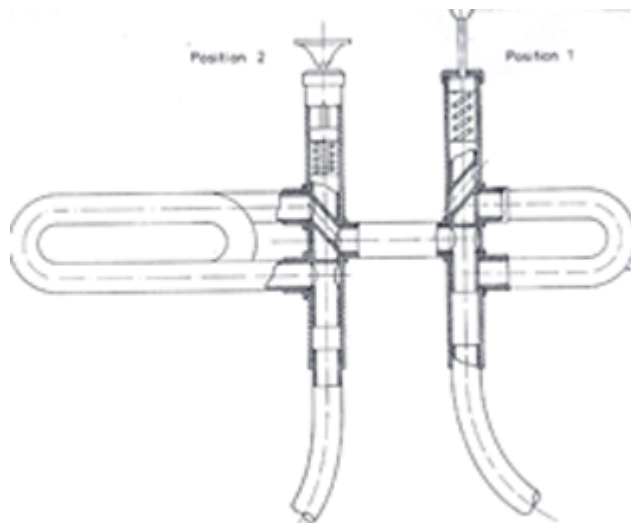
## 2.2 Neues Zeitalter - Ventilhörner und der Gebrauch von Dämpfern und der Stopftechnik

Im Jahr 1813 begann für die damaligen Hornisten ein neues Zeitalter. Parallel und unabhängig voneinander entwickelten Friedrich Blühmel<sup>28</sup> und Heinrich Stölzel<sup>29</sup>, beide aus Deutschland, die ersten Ventile. Blühmel erfand vorerst Ventile für Trompeten und Posaunen, Stölzel ein Horn mit 2 Ventilen. 1816 verkaufte Blühmel die Rechte an seiner Ventilkonstruktion an Stölzel und im Jahr 1818 reichten sie gemeinsam das Patent unter dem Namen „Stölzel & Blühmelsche Erfindung“ ein (Abbildung 8). 8 Jahre später

<sup>28</sup> Friedrich Blühmel (\* 1777 in Pless, Oberschlesien, † 1844), deutscher Hornist und Instrumentenbauer.

<sup>29</sup> Heinrich Stölzel (\* 7.9.1777 in Schneeberg (Erzgebirge), † 16.2.1844 in Berlin), deutscher Musiker (Horn, Trompete, Violine, Harfe).

vervollständigte Joseph Meifred<sup>30</sup> aus Paris die Ventilkonstruktion durch ein drittes Ventil. So konnte das Horn chromatisch gespielt werden.



**Abbildung 8:** Pumpventil von Stölzel, 1818<sup>31</sup>

Johann Tobias Uhlmann<sup>32</sup> aus Wien entwickelte um 1830 das Wiener Ventil, das mit gepaarten Kolben funktioniert. Diese Ventile (3 Stück) finden in den heutigen Wiener Hörnern Verwendung.

Das heute gespielte Horn<sup>33</sup> mit Drehventilen erfand der aus Wien stammende Joseph Felix Riedl<sup>34</sup>. Auf Basis dieser Erfindung baute der Erfurter Eduard Kruspe<sup>35</sup> 1899 das erste Doppelhorn in F/B, das in den heutigen Orchestern verwendet wird.

---

<sup>30</sup> Joseph Meifred (\*1791, †1867), französischer Hornist.

<sup>31</sup> Schütz, Iris: *Jagdhorn, Wiener Horn, Doppelhorn – in der Geschichte des Wiener Waldhornvereins*, Seite 31, Diplomarbeit 1983, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

<sup>32</sup> Johann Tobias Uhlmann (\* 8.6.1776 Kronach, Bayern/D, † 12.5.1838 Wien), Oboist und Instrumentenbauer.

<sup>33</sup> Waldhorn mit Drehventile, nicht das Wienerhorn mit Pumpventile.

<sup>34</sup> Joseph Felix Riedl (\* ca. 1788 Graslitz/Böhmen (Kraslice/CZ), † 12.11.1837 Wien), Instrumentenbauer.

<sup>35</sup> Eduard Kruspe, Instrumentenmacher.

Die Einführung des Gebrauchs von Ventilhörnern gestaltete sich anfangs schwierig, da viele Komponisten und Musiker das Ventilhorn am Anfang nicht schätzten. Die größten Probleme für die Komponisten bzw. Musiker war die Veränderung der Klangcharakteristik vom Naturhorn zum Ventilhorn. Das Ventilhorn wurde im Gegensatz zum Naturhorn sehr selten gestopft, da durch Ventilkombinationen das Stopfen nicht mehr notwendig war. Zum Beispiel weigerten sich Carl Maria von Weber<sup>36</sup> und Johannes Brahms<sup>37</sup> Ventilhörner im Orchester zu verwenden. Erst seit Felix Mendelssohn Bartholdy<sup>38</sup> wurden die ersten Kompositionen für Ventilhorn geschrieben. Mischformen gab es auch zum Beispiel bei Richard Wagner<sup>39</sup>.

Er besetzte in den Opern „Rienzi“<sup>40</sup>, „Der Fliegende Holländer“<sup>41</sup>, „Tannhäuser“<sup>42</sup> zwei Naturhörner und zwei Ventilhörner. Ab „Lohengrin“<sup>43</sup> schrieb er nur noch für Ventilhörner.

Da sich viele Musiker anfangs nicht vom Naturhorn trennen wollten, benutzen sie das Ventilhorn weitestgehend wie ein Naturhorn. Das bedeutet, das Ventilhorn wurde mit der Stopftechnik gespielt und als Ersatz des Stimmbogenwechsels wurden die Ventile benutzt. Für den Wechsel von F nach Es beispielsweise, drückten die Musiker das erste Ventil (Ganzton), um so keinen anderen Stimmbogen auf das Instrument aufsetzen zu müssen.

---

<sup>36</sup> Carl Maria von Weber (\* 19.11.1786 in Eutin, Schleswig-Holstein, † 5.6.1826 in London), deutscher Komponist.

<sup>37</sup> Johannes Brahms (\* 7.5.1833 in Hamburg, † 3.4.1897 in Wien), deutscher Komponist.

<sup>38</sup> Felix Mendelssohn Bartholdy (\* 3.2.1809 in Hamburg, † 4.11.1847 in Leipzig), deutscher Komponist.

<sup>39</sup> Richard Wagner (\* 22.5.1813 in Leipzig, † 13.2.1883 in Venedig), deutscher Komponist.

<sup>40</sup> Vgl. Wagner, Richard: *Rienzi, der Letzte der Tribunen*, Große tragische Oper in fünf Akten, WWV 49 (1838 – 1840), Mainz.

<sup>41</sup> Vgl. Wagner, Richard: *Der fliegende Holländer*, Romantische Oper in drei Aufzügen - Urfassung 1841 (WWV 63), Hrsg. Isolde Vetter und Egon Voss, Bad Bramstedt.

<sup>42</sup> Vgl. Wagner, Richard: *Tannhäuser und der Sängerkrieg auf Wartburg*, Oper in 3 Akten WWV 70, Mainz 1875.

<sup>43</sup> Vgl. Wagner, Richard: *Lohengrin*, Oper in 3 Akten, WWV 75, Frankfurt am Main 1914.



Eines der ersten öffentlichen Konzerte mit Ventilhorn wurde von den Gebrüdern Carl Eduard und Joseph Rudolph Lewy<sup>44</sup> am 23. März 1843 im Gewandhaus zu Leipzig gespielt. Das zugehörige Konzertplakat siehe in Abbildung 9.

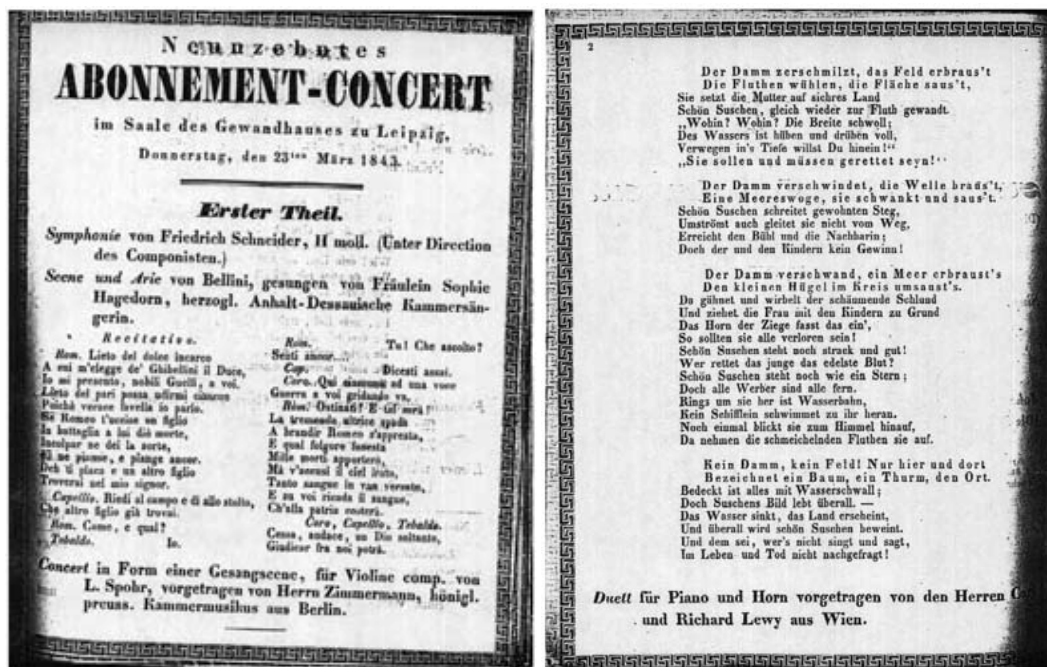


Abbildung 9 : Konzertplakat der Brüder Lewy<sup>45</sup>

Durch die neu erfundenen Ventilhörner hätte man davon ausgehen können, dass die Stopftechnik nun aussterben würde. Sie wurde aber weiter gepflegt, da die Komponisten den damit erreichten Klangeffekt wünschten. Richard Wagner schrieb als einer der ersten in seiner Oper „Tristan und Isolde“<sup>46</sup> gestopfte Noten für Ventilhörner.

<sup>44</sup> Joseph Rudolph Lewy (\*1802, † 1881), österreichischer Hornist.

<sup>45</sup> Konzertplakat: Robert Ostermayer Musikedition, aufgerufen am 10.3.2008  
<http://www.corno.de/leipzig/2331843.htm>.

<sup>46</sup> Vgl. Wagner, Richard: *Tristan und Isolde*, Oper in 3 Akten, WWV 90, Frankfurt am Main 1914.

Ein bekanntes Motiv, in dem der Effekt des Stopfens verwendet wird, ist in der 4. Sinfonie, 1. Satz von Gustav Mahler<sup>47</sup> zu hören (Abbildung 10).



**Abbildung 10** : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 4, 1. Satz, 1. Horn

Neben der Stopftechnik entwickelte Anton Joseph Hampel als einer der ersten einen Holzdämpfer<sup>48</sup>. Wolfgang Amadeus Mozart verlangte im Jahr 1780 für seine Oper „Idomeneo“ im Marsch Nr. 13 gedämpfte Hörner. Im Brief vom 29. November 1780 schrieb Mozart an seinen Vater:<sup>49</sup>

*„Nun brauche ich wegen des Marsches im 2 ten Acte, den man von der Ferne hört, solche Sordinen für die Trompeten und Hörner, die man hier nicht hat. Wollten Sie mir wohl im nächstem Postwagen von jedem Eines schicken, um sie hier nachmachen lassen zu können?“*

Als Antwort schrieb Leopold Mozart:<sup>50</sup>

*„Die 2 Trompetten Sordini werden mit dem Postwagen gewiß kommen. allein die Waldhorn Sordini gehören den 2 thurnergesellen, welche itzt nicht in Salzb: sondern bey dem gewöhnlichen Advent=blassen auf dem Lande sind, nun weis man nicht haben sie die Sordinen, da sie ihnen gehören, mit sich genommen, oder sind sie in ihrem Kasten eingesperrt, ich werde es künftige Wochen, da sie, aber nur auf einen Tag, hierherkommen, hören, ob ich sie haben kann oder nicht.[...] Die Hauptsache kommt ja ohnehin nur auf die Trompeten Sordinen an, das ist was fremdes und neues. die Waldhornisten haben zu allen zeiten schon solche piano gemacht und sich mit hineinstecken eines Schnupfduches geholfen, da es leichter ist bey der Tompeten Thunliih ist, weil sie den Kessel nahe bey der Hand haben, alle Waldhornisten wissen so einen piano vorthail.“*

<sup>47</sup> Gustav Mahler (\*7.7.1860 in Kalischt, Böhmen, † 18.5.1911 in Wien), österreichischer Komponist.

<sup>48</sup> Morley, R. Pegge: The French Horn, Seite 136, New York 1973.

<sup>49</sup> Mozart Briefe u. Aufzeichnungen, Band 6, Seite 35, Kassel 1962 – 75.

<sup>50</sup> Mozart Briefe u. Aufzeichnungen, Band 6, Seite 49, 50, Kassel 1962 – 75.

Neben Mozart verwendeten etwas später auch Beethoven in seiner 6. Sinfonie oder auch Carl Maria von Weber im Klarinettenkonzert (Solo der drei Hörner) gedämpfte Hörner (Abbildung 11).



Abbildung 11 : Carl Maria von Weber Ausschnitt aus dem 1. Klarinettenkonzert, Horn 1-3

Nach den Kompositionen von Beethoven wurden vermehrt Werke geschrieben, bei denen die Instrumentalisten (Hornisten) verschiedene Töne dämpfen oder stopfen mussten. Für die gedämpften Töne wird ein transponierender Dämpfer und für die gestopften Töne entweder die rechte Hand oder ein nicht transponierender Dämpfer verwendet.

## 2.3 Dämpferarten

### 2.3.1 Nicht transponierende Dämpfer

Die nicht transponierenden Dämpfer (Abbildung 12), werden auch Stopfdämpfer genannt. Sie erzielen die gleiche Tönhöhe wie das Stopfen mit der Hand. Der Vorteil dieser Dämpfer liegt in der tiefen Tonlage. Mit der Hand ist es sehr schwer möglich unter dem notierten c 1 (in F) zu stopfen. Hier bringt der Stopfdämpfer eine große Erleichterung. Für ungeübte Musiker, die Stopfen müssen, ist der Stopfdämpfer prinzipiell eine Erleichterung. Für geübte Musiker ist oberhalb des c1 in F ein Stopfdämpfer nicht notwendig.

Wenn das Horn mit der Hand gestopft oder mit Stopfdämpfer gespielt wird, erhöht sich die Tonhöhe um einen Halbton. Mit einem Hinuntertransponieren um einen Halbton kann die ursprüngliche Tonhöhe beibehalten werden. Gestopft wird üblicherweise auf der F Hornseite, weil erfahrungsgemäß gestopfte Töne auf dem B Horn meist schwer zu intonieren sind. Für diesen Fall gibt es bei einigen Hörnern ein zusätzliches Stopfventil, das die Intonation verbessert.



Abbildung 12 : Stopfdämpfer<sup>51</sup>

### 2.3.2 Transponierende Dämpfer

Transponierende Dämpfer, umgangssprachlich nur als „Dämpfer“ bezeichnet, werden sowohl auf dem F Horn als auch auf dem B Horn gespielt. Hier muss der Spieler nicht transponieren, da der Dämpfer diese Aufgabe schon erfüllt. Bei transponierenden Dämpfern gibt es unterschiedliche Bauarten, die sich in Material und Form unterscheiden. Prinzipiell werden Dämpfer aus Holz (Birkenfurnier) und aus Aluminium verwendet. Der Holzdämpfer aus Abbildung 13 wurde laut Firma Denis Wick<sup>52</sup> aus Birkenfurnier hergestellt und mit vulkanisierten Gewebefasern beschichtet. Die meisten Holzdämpfer sind mit einem Stimmbolzen stimmbar.

---

<sup>51</sup> Stopfdämpfer: aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.musiktirol.com/tom\\_crown\\_waldhorn\\_stopfdaempfer\\_messing\\_webshop\\_art\\_430028.html](http://www.musiktirol.com/tom_crown_waldhorn_stopfdaempfer_messing_webshop_art_430028.html).

<sup>52</sup> Denis Wick Dämpfer: aufgerufen am 10.7.2008  
[http://www.musikproduktiv.at/shop/Artikelliste.aspx?wg\\_gruppe\\_id=16850&ag\\_gruppe\\_id=16901&ob\\_gruppe\\_id=17153&sort=relevanz&marke\\_gruppe\\_id=11490](http://www.musikproduktiv.at/shop/Artikelliste.aspx?wg_gruppe_id=16850&ag_gruppe_id=16901&ob_gruppe_id=17153&sort=relevanz&marke_gruppe_id=11490).



**Abbildung 13** : Holzdämpfer 5554, Firma Denis Wick<sup>53</sup>

Neben dem Holzdämpfer wird der „Straight“ Horndämpfer aus Aluminium verwendet. Dieser hat aber keinen Stimmbolzen.



**Abbildung 14** : Straight Dämpfer 5524 , Firma Denis Wick<sup>54</sup>

Da das Musizieren bzw. Üben nicht überall möglich ist, wie zum Beispiel im Hotelzimmer, werden seit einigen Jahren so genannte Übedämpfer verwendet. Diese Dämpfer vermindern die Lautstärke. Beim Silent Brass Dämpfer ist ein Mikrofon integriert.

---

<sup>53</sup> Holzdämpfer: aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1.html](http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182_1.html).

<sup>54</sup> Straight Dämpfer: aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1.html](http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182_1.html).

Mit einem Verstärker und Kopfhörer kann das Gespielte abgehört werden und zusätzlich durch verschiedene Hallalgorithmen künstlich dazu generiert werden.



**Abbildung 15** : Übungsdämpfer 5530, Denis Wick<sup>55</sup>



**Abbildung 16** : Übungsdämpfer Silent Brass<sup>56</sup>

---

<sup>55</sup> Übungsdämpfer 5530: aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1-2.html](http://www.musicworldbrilon.de/Metallblasinstrumente/Daempfer---182_1-2.html).

<sup>56</sup> Übungsdämpfer Silent Brass: aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.woodwindandbrass.co.uk/acatalog/yamaha\\_sb3-9\\_frenchhorn.jpg](http://www.woodwindandbrass.co.uk/acatalog/yamaha_sb3-9_frenchhorn.jpg).

## 2.4 Notation von gedämpften und gestopften Noten

Noten, die gedämpft zu spielen sind, werden in der Musikkultur mit „gedämpft“, „mit Dämpfer“, „sordino“, oder „bouche“ bezeichnet. Das Ende der gedämpften Stelle wird mit „offen“, „Dämpfer ab“ oder „open“ gekennzeichnet (Abbildung 17).

The image shows a musical score for four horns (I-IV) from Gustav Mahler's Symphony No. 7, 2nd movement. The score is written for four staves. Horn I is marked 'I. in F mit Dämpfer' and 'Gehalten'. Horn II is marked 'II. in F mit Dämpfer'. Horn III is marked 'III. in F mit Dämpfer'. Horn IV is marked 'IV. in F mit Dämpfer'. The score includes measures 140, 144, 196, 223, and 225. Dynamic markings include p, f, ff, and sf. Instructions like 'Dämpfer ab' and 'I. in F offen' are present.

Abbildung 17 : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 7, 2. Satz, Horn 1-4

Gestopfte Noten werden entweder im Deutschen mit „gestopft“ bzw. im Englischen mit „mute“ bezeichnet. Das Ende der gestopften Stelle wird mit „offen“ bzw. „open“ gekennzeichnet (Abbildung 18).



**NEUNTE SYMPHONIE**

2. HORN IN F

Aufführungsrecht vorbehalten.  
Droits d'exécution réservés.

Gustav Mahler  
(1860-1911)

I.

Andante comodo

gestopft      offen (Echo)

1

espress.

11

18

2

sempre *mp*

1

espress.

*mp*      *mp*      *f* → *p*

**Abbildung 18** : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 9, 1. Satz, 2. Horn

Bei einzelnen gestopften Tönen wird ein „+“ über die Note gesetzt. Ein Kreis (°) über der Note sagt aus, dass die Note offen gespielt wird (Abbildung 19).

offen      gestopft

Corno IV in F

32

Moderato  
alla breve.

**Abbildung 19** : Alexander Porfirjewitsch Borodin, Ausschnitt aus den Plowitzer Tänze von Fürst Igor, 4. Horn

Bei Werken nach 1945 werden teilweise genau definierte Dämpfungstypen verlangt und im Notentext angebracht.



### 3 Physikalische Grundlagen

Das Horn gehört zur Gattung der Blechblasinstrumente. Ein Blechblasinstrument (Abbildung 20) besteht aus einem Mundstück zur Anregung, einer Kombination aus zylindrischen und konischen Rohrelementen und endet mit einem Exponentialtrichter.

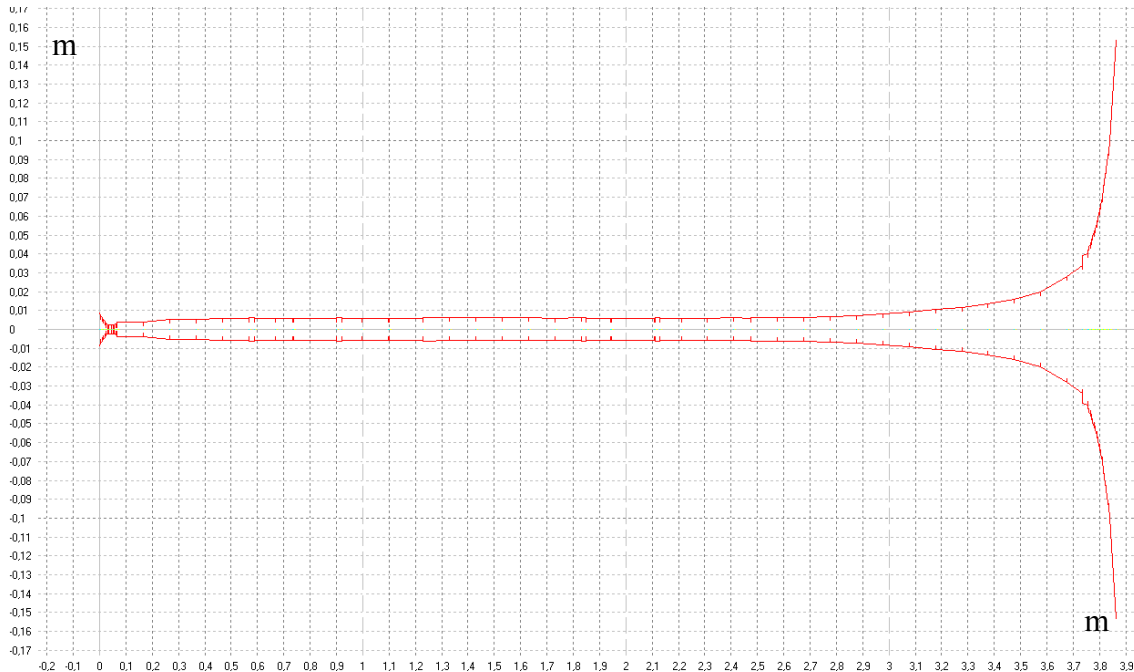
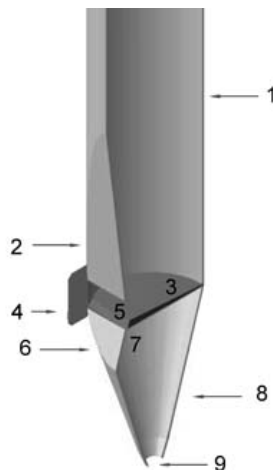


Abbildung 20 : F Horn mit Mundstück

Das Horn gehört zur Gruppe der Aerophone, in denen beim Spiel longitudinal schwingende Luftsäulen entstehen. Aerophone können allgemein entweder mit Lippen-, Zungen- oder Polsterpfeifen angeregt werden.

#### ***Lippenpfeife (Labialpfeife)***

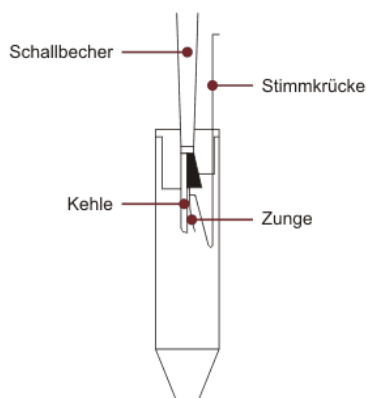
Die Lippenpfeife wird an einem offenen Ende durch Luftbewegung angeregt. Die Luft strömt durch den Pfeifenfuß aus der Kernspalte und trifft auf das Oberlabium. An dieser Schneide (Oberlabium) wird der Luftstrom abgelenkt und beginnt zu schwingen. Das zweite Ende der Lippenpfeife kann entweder offen (Querflöte, Blockflöte) oder geschlossen bzw. gedeckt (Panflöte) sein.



**Abbildung 21 :** Lippenpfeife, (1) Pfeifenkörper, (2) Oberlabium, (3) Kern, (4) Seitenbart, (5) Aufschnitt, (6) Unterlabium, (7) Kernspalte, (8) Pfeifenfuß, (9) Fußloch<sup>57</sup>

### ***Zungenpfeife (Lingualpfeife)***

Bei den Zungenpfeifen wird durch den Luftstrom die Zunge (Abbildung 22) in Schwingung gebracht und erzeugt Druckschwankungen am Ende der Luftsäule. Da die Zungenpfeifen nur ein akustisches offenes Ende besitzen, werden diese als gedeckte Pfeifen bezeichnet. Holzblasinstrumente mit einem oder doppeltem Rohrblatt werden mit der Zungenpfeife angeregt.



**Abbildung 22 :** Zungenpfeife<sup>58</sup>

<sup>57</sup> Labialpfeife: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/2/25/Schema\\_Labialpfeife-2.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/2/25/Schema_Labialpfeife-2.jpg).

<sup>58</sup> Lingualpfeife: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24. 6.2008  
[http://www.kollegiorgel.ch/lexikon\\_uebersicht.html?&tx\\_rhuglossary\\_pi1%5Bentry%5D=248&cHash=c a3288aea7](http://www.kollegiorgel.ch/lexikon_uebersicht.html?&tx_rhuglossary_pi1%5Bentry%5D=248&cHash=c a3288aea7).

## Polsterpfeife

Bei den Polsterpfeifen werden die menschlichen Lippen in Schwingungen versetzt, die zur Anregung von Druckschwankungen in der Luftsäule dienen. Der Luftstrom trifft auf die Lippen, die durch kontrollierte Lippenspannung des Bläasers Druckschwankungen am Mundstück bewirken (Funktionsprinzip in Abbildung 23). Die Lippen (Polster) stellen ein gedecktes Ende dar. Das zweite Ende ist hingegen immer offen. Alle Blechblasinstrumente, so auch das Horn, werden mit der Polsterpfeife angeregt und zählen zu den gedeckten Pfeifen.

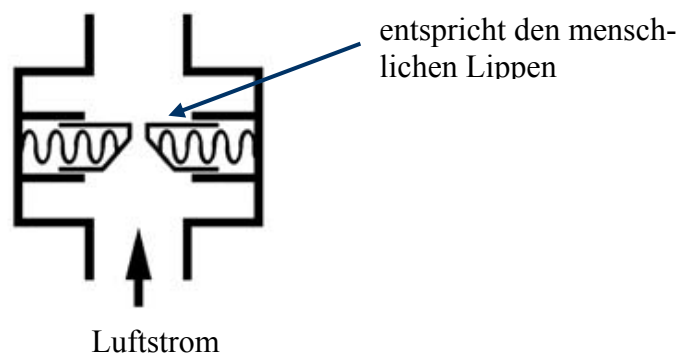


Abbildung 23 : Funktionsprinzip einer Polsterpfeife<sup>59</sup>

Aus akustischer Sicht kann das Horn in drei Teile aufgeteilt werden:

- Anregung (Polsterpfeife am Mundstück)
- Übertragungskanal (Luftsäule)
- Resonator (Schalltrichter)

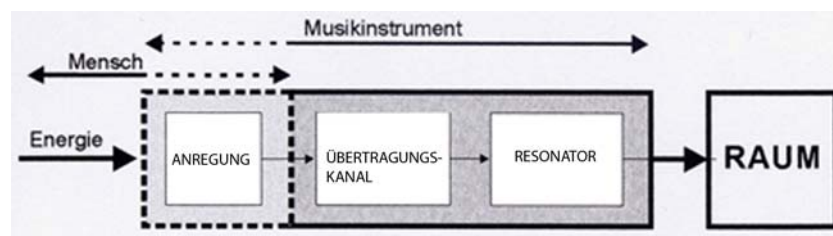


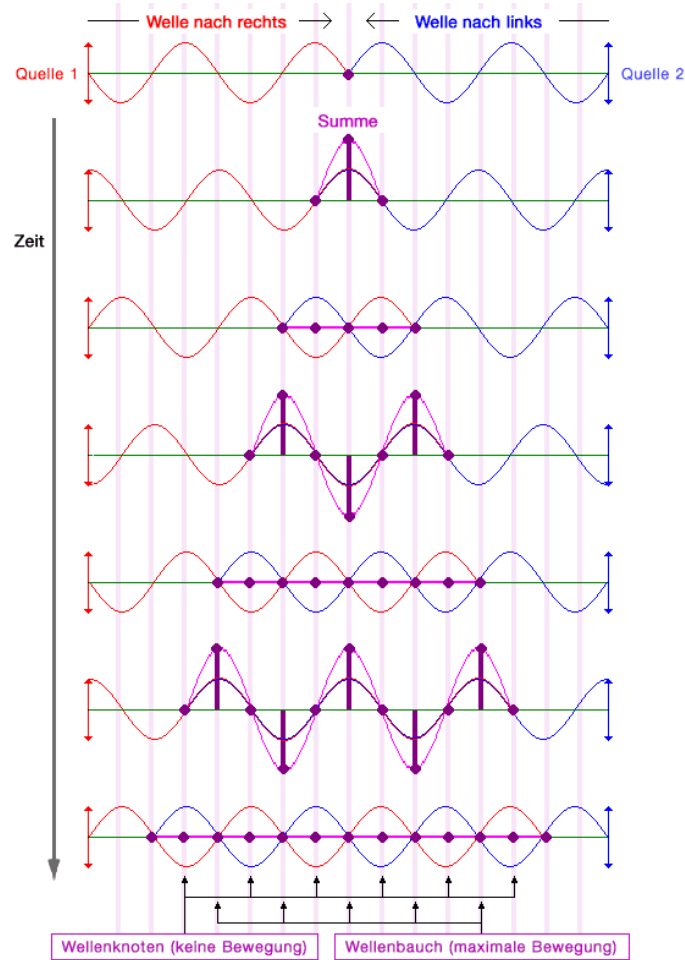
Abbildung 24 : Funktionsschema Musikinstrument

<sup>59</sup> Polsterpfeife: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Polsterpfeife.jpg>.

Im Übertragungskanal entsteht nach der Anregung, beim Horn mit einer Polsterpfeife, eine stehende Welle waagrecht zur Ausbreitungsrichtung. Der Resonator strahlt die erzeugte Welle in die Umwelt (Raum) ab.

### **Prinzip der stehenden Welle**

Im Instrument entsteht dann eine stehende Welle, wenn eine hinlaufende Welle mit der rücklaufenden (reflektierten) Welle gleicher Frequenz überlagert wird. Durch die stehende Welle ergeben sich ortsfeste Druckknoten und -bäuche im Rohr. Am Druckknoten ist die Druckschwankung konstant null. Beim Druckbauch hingegen oszilliert der Druck mit der Addition der rücklaufenden mit der hinlaufenden Druckamplitude (Welle). Dies ist in der Abbildung 25 zu sehen.



**Abbildung 25 : Stehende Welle bei geschlossenem Ende<sup>60</sup>**

<sup>60</sup> Stehende Welle: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Stehendewelle.PNG>.

Trifft eine Schallwelle auf eine unendlich große Wand, dann wird sie mit gleichem Vorzeichen für den Schalldruck reflektiert. Der Energieverlust ist sehr klein und entsteht durch die Reibung an der Wand. Bei einem Blechblasinstrument ist das zweite Ende (Trichter) des Rohres offen. Dadurch hat die reflektierte Welle zur hinlaufenden ein umgekehrtes Vorzeichen für den Druck und der Verlust durch die Abstrahlung ist wesentlich größer.

Schalldruck ( $p$ ) einer stehenden Welle (offenes Ende):

$$p(x,t) = p_h - p_r = (\hat{p}_h \cdot e^{-jkx} - \hat{p}_r \cdot e^{jkx}) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.1)$$

$$\text{Wellenzahl: } k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.2)$$

$c$  ... Schallgeschwindigkeit

$\lambda$  ... Wellenlänge

### **Stehwellenverhältnis**

Das Stehwellenverhältnis SWR (standing wave ratio) gibt den Grad der stehenden Welle in einem Rohr an.

$A$  ist die Amplitude der hinlaufenden Welle und  $B$  die Amplitude der rücklaufenden Welle.

$$A = |p_h| \quad B = |p_r| \quad (3.3)$$

$$\text{Stehwellenverhältnis: } SWR = \frac{A+B}{A-B} \quad (3.4)$$

$SWR = \infty$  totale Reflexion ( $A = B$ )

$SWR \ll \text{klein}$  sehr großer Energieverlust ( $B \ll A$ )

Um das Horn (gestopft bzw. offen) akustisch zu untersuchen, werden in Kapitel 4.2 Eingangsimpedanzmessungen durchgeführt. Für die zugehörige mathematische Analyse wird das Horn in zylindrische und konische Rohre getrennt betrachtet.

### **Akustische Impedanz**

Bei einer ebenen longitudinalen Welle ist die akustische Impedanz als Verhältnis von Schalldruck  $p$  zu Schallfluss  $q$  in Abhängigkeit von dem Ort  $x$  und der Zeit  $t$  definiert.

$$\text{Akustische Impedanz: } Z_a = \frac{p(x,t)}{q(x,t)} = \frac{\rho \cdot c}{S} \quad (3.5)$$

Als Dichte  $\rho$  ist die Masse  $M$  pro Volumen  $V$  definiert.

$$\text{Dichte: } \rho = \frac{M}{V} \quad (3.6)$$

Der Schallfluss  $q$  ist zudem das Produkt von Schallschnelle  $v$  und Normalfläche  $S$ .

$$\text{Schallfluss: } q = v \cdot S \quad (3.7)$$

Die Schallschnelle  $v$  beschreibt die Geschwindigkeit der Teilchenbewegung, zum Beispiel der Luftmoleküle. Im Gegensatz beschreibt die Schallgeschwindigkeit  $c$  wie schnell sich die Schallwelle in einem Medium ausbreitet. Die akustische Impedanz ist die Schallkennimpedanz, die an der Begrenzungsfläche  $S$  zum Einsatz kommt.

### **Thermische Verluste**

Durch das Durchströmen der Luft entstehen an der Rohrrinnenwand Reibungsverluste<sup>61</sup> und Wärmeverluste<sup>62</sup>. Die Gleichung für die Reibungsverluste und Wärmeverluste wurde von Fletcher – Rossing entnommen.<sup>63</sup>

Die Reibungsverluste  $x_r$  in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$  sind definiert als:

$$x_r(\omega) = \sqrt{\left(\frac{\omega \rho}{\eta}\right)} \cdot x \quad (3.8)$$

$x$  ... Rohrlänge

---

<sup>61</sup> Durch Teilchenbewegung der Luft an der Rohrrinnenwand entstehen Reibungsverluste.

<sup>62</sup> Durch Wärmeableitung entlang des Rohrs entstehen Wärmeverluste.

<sup>63</sup> Fletcher N.H., Rossing T.D: *The Physics of Musical Instruments*, Seite 194, New York 1998.

Die dynamische Viskosität ist ein vom Druck unabhängiger Verlustwert, der durch das Strömen der Teilchenbewegung durch das Rohr entsteht.

$$\eta = 1.8 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \right] \dots \text{dynamische Viskosität (Luft bei } 20^\circ\text{C)} \quad (3.9)$$

Die Wärmeverluste  $x_w$  wie auch die Reibungsverluste, in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$ , sind definiert als:

$$x_w(\omega) = \sqrt{\left( \frac{\omega \rho C_p}{\kappa} \right)} \cdot x \quad (3.10)$$

Bei den Wärmeverlusten ist anstatt der dynamischen Viskosität der Adiabatenexponent als Verlustwert angebracht. Der Adiabatenexponent ergibt sich aus der Differenz der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und der spezifischer Wärme bei konstantem Volumen.

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} > 1 \dots \text{Adiabatenexponent} \quad (3.11)$$

$C_p$  ...spezifische Wärme bei konstantem Druck

$C_v$  ...spezifische Wärme bei konstantem Volumen

Die Wärme- und Reibungsverluste sind direkt proportional zum Radius der zylindrischen Röhre.

H. Benade<sup>64</sup> stellt die Gleichung für die akustische Impedanz  $Z_a$  (3.12) und die Ausbreitungskonstante  $\Gamma(\omega)$  (3.13), die in der Übertragungsfunktion des Rohres Anwendung findet (siehe unten), in Abhängigkeit von den thermischen Verlusten auf.

---

<sup>64</sup> Benade, A.H.: *On the Propagation of Sound Waves in a Cylindrical Conduit*, in: Acoustical Society of America, Vol. 44, Nr. 2, Seite 619, April 1968.

Douglas H. Keefe entwickelte aus der Gleichung von Benade eine Reihe (gültig bis 6 kHz).<sup>65</sup>

Akustische Impedanz:

$$Z_a(\omega) = \frac{\rho c}{S} \left[ (1 + a_1 x_r^{-1} - a_3 x_r^{-3}) + j(a_1 x_r^{-1} + a_2 x_r^{-2} + a_3 x_r^{-3}) \right] \quad (3.12)$$

Ausbreitungskonstante:

$$\Gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j \left( \frac{\omega}{v(\omega)} \right) = \left( \frac{\omega}{c} \right) \left[ (b_1 x_r^{-1} + b_2 x_r^{-2} + b_3 x_r^{-3}) + j(1 + b_1 x_r^{-1} - b_3 x_r^{-3}) \right] \quad (3.13)$$

**Berechnung der Koeffizienten  $a$  und  $b$** <sup>66</sup>

$$\rho = 1.1789 \cdot (1 - 0.00335 \Delta \vartheta) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \dots \text{Luftdichte}$$

$$\eta = 1.846 \cdot 10^{-5} (1 + 0.0025 \Delta \vartheta) \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \dots \text{Viskosität}$$

$$\gamma = 1.4017 \cdot (1 - 0.00002 \Delta \vartheta) \quad \dots \text{Isentropenkoeffizient}$$

$$\nu = 0.8410 \cdot (1 - 0.00002 \Delta \vartheta) \quad \dots \text{Prandtl - Zahl}$$

$$c = 3.4723 \cdot 10^2 (1 - 0.00166 \Delta \vartheta) \frac{1}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \dots \text{Schallgeschwindigkeit}$$

Alle Werte sind mit einer Temperatur von  $\vartheta_0 = 26.85^\circ\text{C} (300^\circ\text{K})$  und einer Bandbreite von  $\pm 10^\circ\text{C}$  bewertet.

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [1 - \psi] \quad (3.14)$$

<sup>65</sup> Keefe, Douglas H.: *Acoustical wave propagation in cylindrical ducts: Transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions*, in: Acoustical Society of America, Vol. 75, Nr. 1, Seite 58 - 62, 1984.

<sup>66</sup> Walstjin van, Maarten: *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, Seite 25, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.



$$a_2 = \left[ 1 - \psi + \frac{\psi}{2\nu} + \frac{3\psi^2}{2} \right] \quad (3.15)$$

$$a_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{7}{8} - \psi + \frac{\psi}{2\nu} + \frac{\psi}{8\nu^2} + \frac{3\psi^2}{2} - \frac{3\psi^2}{2\nu} - \frac{5\psi^3}{2} \right] \quad (3.16)$$

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [1 + \psi] \quad (3.17)$$

$$b_2 = \left[ 1 + \psi - \frac{\psi}{2\nu} - \frac{\psi^2}{2} \right] \quad (3.18)$$

$$b_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{7}{8} + \psi - \frac{\psi}{2\nu} - \frac{\psi}{8\nu^2} - \frac{\psi^2}{2} + \frac{\psi^2}{2\nu} + \frac{\psi^3}{2} \right] \quad (3.19)$$

$$\psi = \frac{\gamma - 1}{\nu} \quad (3.20)$$

### 3.1 Zylindrisches Rohr

Das Horn, das aus zylindrischen und konischen Rohrelementen besteht, kann als ein reines zylindrisches Rohr betrachtet werden, wenn das Horn in viele kurze zylindrische approximierte Scheiben geschnitten betrachtet wird. Mit diesem Modell kann die Eingangsimpedanz des Horns vereinfacht berechnet werden, da von ebener Wellenausbreitung ausgegangen werden kann.

#### 3.1.1 Berechnung der Eingangsimpedanz

Druckgleichung einer stehenden Welle in einer offenen Pfeife lautet:

$$p(x, t) = p_h - p_r = (\hat{p}_h \cdot e^{-jkx} - \hat{p}_r \cdot e^{jkx}) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.21)$$

Für die hinlaufende Welle wird der Parameter A und für die rücklaufende Welle der Parameter B eingesetzt.

$$p(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} - Be^{j(\omega t + kx)} \quad (3.22)$$

Die Gleichung 3.22 in 3.5 eingesetzt ergibt den Schallfluss einer stehenden Welle in Abhängigkeit des Orts x und der Zeit t:

$$q(x, t) = \frac{S}{\rho c} (Ae^{j(\omega t - kx)} - Be^{j(\omega t + kx)}) \quad (3.23)$$

Die Schallkennimpedanz in Abhängigkeit von der Länge  $L$  der Röhre und der Zeit  $t$  ist gegeben durch:

$$Z_L = \frac{p(L, t)}{q(L, t)} \quad (3.24)$$

Die Schallkennimpedanz aus der akustischen Impedanz abgeleitet ergibt sich aus:

$$Z_L = Z_a \frac{Ae^{-jkL} + Be^{jkL}}{Ae^{-jkL} - Be^{jkL}} \quad (3.25)$$

Das Verhältnis aus hinlaufender und rücklaufender Welle ergibt sich aus der Gleichung (3.25):

$$\frac{B}{A} = e^{-2jkL} \frac{Z_L - Z_a}{Z_L + Z_a} \quad (3.26)$$

Eingangsimpedanz ist definiert als:

$$Z_0 = \frac{p(0, t)}{q(0, t)} \quad (3.27)$$

Kombination der Gleichungen 3.22, 3.23 und 3.27:

$$Z_0 = Z_a \frac{A + B}{A - B} = Z_a \frac{1 + \frac{B}{A}}{1 - \frac{B}{A}} \quad (3.28)$$

Durch einsetzen der Gleichung (3.26) in (3.28) erhält man die Eingangsimpedanz  $Z_0$  in Abhängigkeit von der Wellenzahl  $k$  und der Länge der Röhre  $L$ :

$$Z_0 = Z_a \frac{Z_L \cos(kL) + jZ_a \sin(kL)}{jZ_L \sin(kL) + Z_a \cos(kL)} \quad (3.29)$$

Um die Eingangsimpedanz am Beginn des Rohres zu betrachten, wird für  $Z_L$  Null eingesetzt:

$$Z_0 = jZ_a \tan(kL) \text{ für } (Z_L = 0) \quad (3.30)$$

### 3.1.2 Druckverlauf im zylindrischen Rohr

Durch die hergeleitete Eingangsimpedanzgleichung (3.30) kann der Druck am Beginn des Rohres betrachtet werden, da die akustische Impedanz vom Druck und dem Schallfluss abhängt.

$$Z_0 = jZ_a \tan(kL) \quad \text{Eingangsimpedanz}$$

$$Z_a = \frac{p(x,t)}{q(x,t)} \quad \text{akustische Impedanz}$$

#### ***Rohranfang offen (offene Pfeife)***

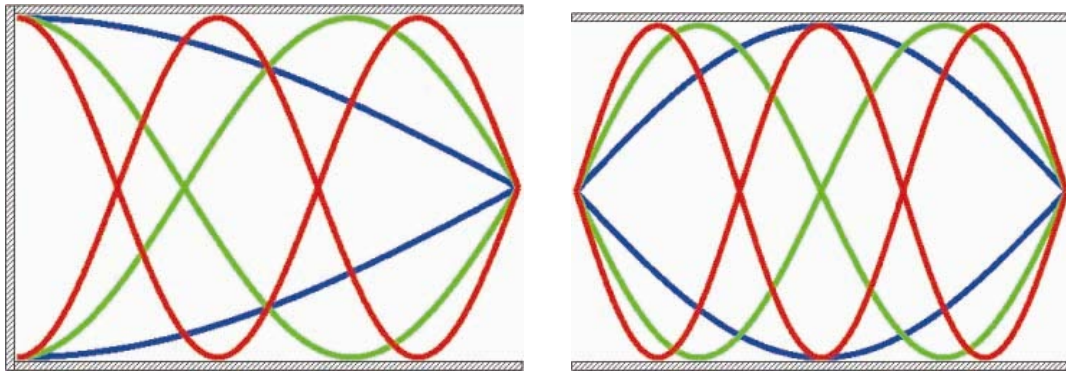
$$Z_0 = 0 \Rightarrow p = 0 \quad \text{bei } k = \pi, 2\pi, 3\pi \dots$$

#### ***Rohranfang geschlossen (gedeckte Pfeife)***

$$Z_0 = \infty \Rightarrow p = \infty \quad \text{bei } k = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

In der Abbildung 26 ist der Druckverlauf einer gedeckten (links) und offenen (rechts) Pfeife dargestellt. Die blaue Linie ist die Grundschiwingung, rot die erste und grün die zweite Oberschiwingung. Bei der gedeckten Pfeife besitzt die Grundschiwingung eine Wellenzahl von  $k = \frac{\pi}{2}$ , die nächste Schwiwingung eine Wellenzahl von  $k = \frac{3\pi}{2}$ . Das bedeutet, dass bei einer gedeckten Pfeife alle ungeradzahlihen Teiltöne ansprechen. Das Frequenzverhältnis lautet  $f_1 : f_2 : f_3 = 1 : 3 : 5$  usw.

Im Gegensatz zur offenen Pfeife sprechen hier alle ganzzahligen Teiltöne an. Das Frequenzverhältnis lautet hier  $f_1 : f_2 : f_3 = 1 : 2 : 3$  usw.

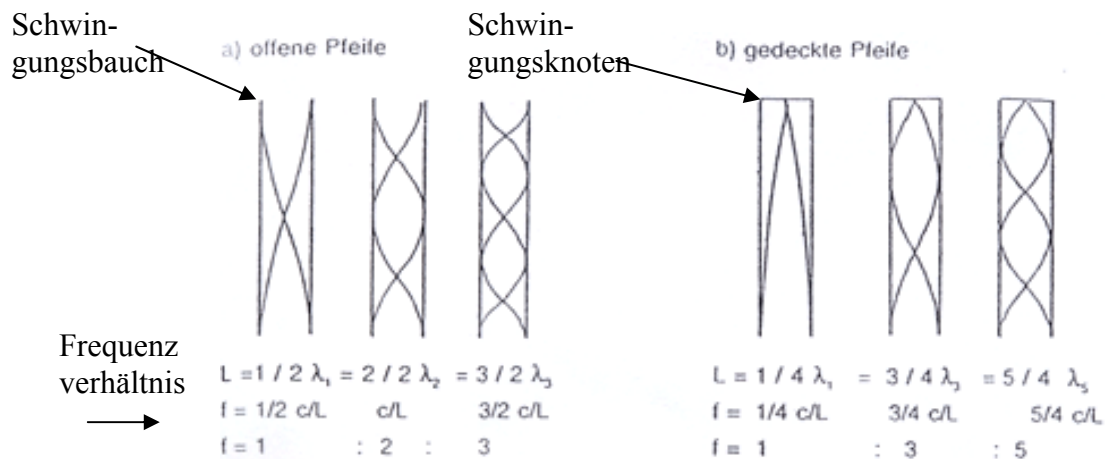


**Abbildung 26 :** Druckverlauf links geschlossene zyl. Rohr, rechts offenes zyl. Rohr<sup>67</sup>

Im zylindrischen Rohr ist die Wellenlänge  $\lambda$  entlang des Rohrs konstant. Da  $\chi$  konstant ist, können aus der Wellenlänge die Resonanzfrequenzen des Rohres rückgerechnet werden.  $f = \frac{c}{\lambda}$  (3.31)

Wenn ein Ende der Röhre geschlossen ist, ergibt sich am Pfeifenende ein Schwingungsknoten, da die Luftteilchen sich nicht bewegen können. Bei einer offenen Pfeife befindet sich hingegen ein Schwingungsbauch, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Außerdem ist sichtbar, dass der ersten Teilton bei einer offenen Pfeife eine Oktave (Frequenz 1:2), bei einer gedeckten Pfeife hingegen eine Durdezim (Oktave + Terz, Frequenz 1:3) ist.

<sup>67</sup> Carral, Sandra: *Relationship between the physical parameters of musical wind instruments and the psychoacoustic attributes of the produced sound*, Seite 12, PhD Dissertation 2005, University of Edinburgh.

Abbildung 27 : Schnelleverlauf offene – gedeckte Pfeife<sup>68</sup>

### 3.1.3 Übertragungsfunktion eines zylindrischen Rohres

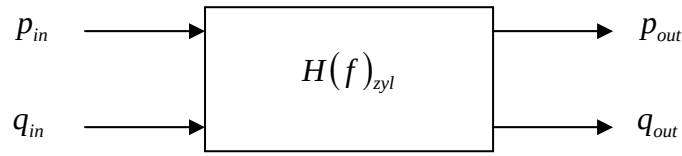
Die Übertragungsfunktion (Transferfunktion) wird als Ausgangssignal dividiert durch Eingangssignal beschrieben. Sie entspricht einer Vierpolgleichung (Matrix). In einem Rohr sind die dazugehörigen Ausgangs- und Eingangssignale Druck und Schallfluss.

A. H. Benade<sup>69</sup> entwickelte die Vierpolgleichungen für zylindrisches und konisches Rohr. Das in Kapitel 6 zur Anwendung kommende Software Programm „Optimierer“<sup>70</sup> arbeitet ebenfalls mit diesen Gleichungen, die in (3.34) bis (3.37) und (3.54) bis (3.57) angeführt werden.

<sup>68</sup> Ayers D. R., Eliason L. J., Mahgerefteh D.: *The conical bore in musical acoustics*, in: American Association of Physics Teachers, Vol 53, Seite 533, Juni 1985.

<sup>69</sup> Benade, A.H.: *Equivalent circuits for conical waveguides*, May 1988, Acoustical Society of America, Vol. 83, Nr. 5, Seite 1764 – 1769, Mai 1988.

<sup>70</sup> Optimierer: *Handbuch Optimierer*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2002.

**Abbildung 28 :** Übertragungsfunktion zylindrisches Rohr

$$H(f)_{zyl} = \begin{bmatrix} A_{zyl} & B_{zyl} \\ C_{zyl} & D_{zyl} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} p_{in} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{zyl} & B_{zyl} \\ C_{zyl} & D_{zyl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{out} \\ q_{out} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$A_{zyl} = \cos(kL) \quad (3.34)$$

$$B_{zyl} = jZ_a \sin(kL) \quad (3.35)$$

$$C_{zyl} = \frac{j}{Z_a} \sin(kL) \quad (3.36)$$

$$D_{zyl} = \cos(kL) \quad (3.37)$$

### 3.1.4 Thermische Verluste des zylindrischen Rohres

#### *Thermische Übertragungsfunktion*

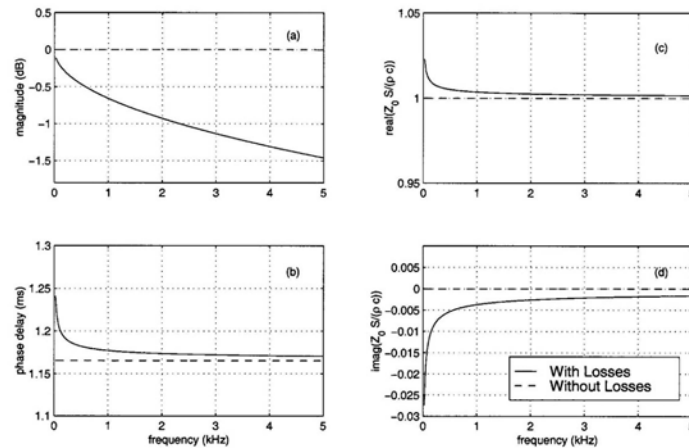
Mit der Berechnung der Ausbreitungskonstante nach Keefe<sup>71</sup> kann die Übertragungsfunktion für thermische Verluste berechnet werden.

$$H_t(\omega) = e^{-\Gamma L} \quad (3.38)$$

Die strichlierten Linien in Abbildung 29 stellen die Übertragungsfunktion und der Impedanzverlauf ohne Verluste, die durchgezogenen Linien mit Verlusten dar.

---

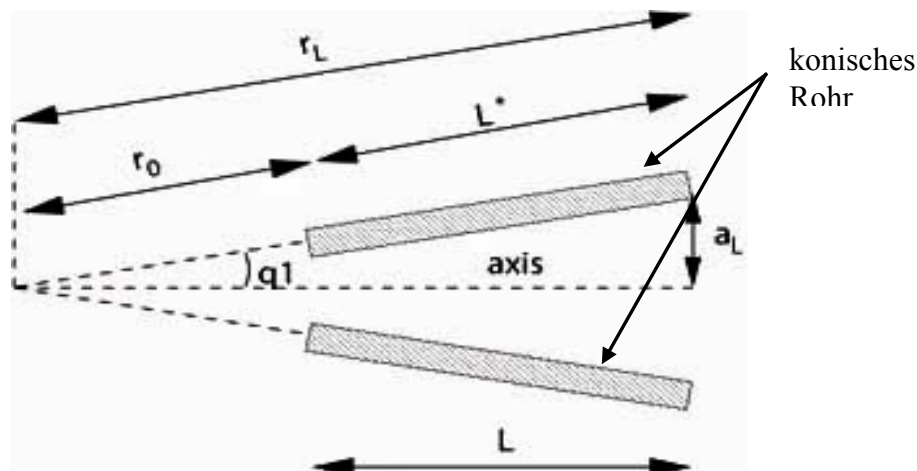
<sup>71</sup> Keefe, Douglas H.: *Acoustical wave propagation in cylindrical ducts: Transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions*, in: Acoustical Society of America, Vol. 75, Nr. 1, Seite 58 - 62, 1984.



**Abbildung 29 :** Thermische Verluste im zylindrischen Rohr, links Betrag (a) und Phasenverschiebung (b) der Übertragungsfunktion, rechts Realteil (c) und Imaginärteil (d) der Impedanz. Rohrlänge 0.4 m Rohrradius 0.5 cm<sup>72</sup>

### 3.2 Konisches Rohr

Zur Berechnung der Impedanz im konischen Rohr muss das Koordinatensystem von Zylinderkoordinaten auf Kugelkoordinaten gewechselt werden. Die Abbildung 30 zeigt die Abmessungen des konischen Rohres. Die Länge des Rohres wird mit  $L^*$ , der Radius mit  $r_L$  bezeichnet.



**Abbildung 30: Konisches Rohr**<sup>73</sup>

<sup>72</sup> Walstjin van, Maarten: *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, Seite 26, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.

<sup>73</sup> Carral, Sandra: *Relationship between the physical parameters of musical wind instruments and the psychoacoustic attributes of the produced sound*, Seite 12, PhD Dissertation 2005, University of Edinburgh.

### 3.2.1 Berechnung der Eingangsimpedanz

Zur Berechnung der Eingangsimpedanz wird zuerst die Druckgleichung einer stehenden Welle in einer offenen Pfeife in Kugelkoordinaten herangezogen.

$$p(r, t) = \frac{1}{r} (Ae^{j(\omega t - kr)} - Be^{j(\omega t + kr)}) \quad (3.39)$$

Der Schallfluss  $q$  wird in Verbindung mit der Dichte  $\rho$  und der sphärischen Wellenoberfläche  $S^*$  gebracht:

$$\frac{\rho}{S^*} \frac{\partial q}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.40)$$

Die Definition der sphärischen Wellenoberfläche wird im Artikel von Benade<sup>74</sup> genauer erklärt.

$$S^* = \pi a^2 F(q_l) \quad (3.41)$$

$$F(q_l) = 2 \left[ \frac{1 - \cos(q_l)}{\sin^2(q_l)} \right] \quad (3.42)$$

Analog wie in Kapitel 3.1 wird die Eingangsimpedanz berechnet.

Schallfluss einer stehenden Welle im konischen Rohr:

$$q(r, t) = \frac{S^*}{\rho c r} \left[ A \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{j(\omega t - kr)} - B \left( 1 - \frac{1}{jkr} \right) e^{j(\omega t + kr)} \right] \quad (3.43)$$

Aus der Schallflussgleichung wird die Impedanz in hinlaufende und rücklaufende Welle unterteilt:

$$Z_a^+(r) = \frac{p(r, t)}{q(r, t)} = \frac{\rho c}{S^*} \frac{jkr}{jkr + 1} \dots \text{akustische Impedanz für die hinlaufende Welle} \quad (3.44)$$

---

<sup>74</sup> Benade, A.H.: *Equivalent circuits for conical waveguides*, May 1988, Acoustical Society of America, Vol. 83, Nr. 5, Seite 1764 – 1769, Mai 1988.



$$Z_a^-(r) = \frac{p(r,t)}{q(r,t)} = \frac{\rho c}{S^*} \frac{jkr}{jkr-1} \dots \text{akustische Impedanz für die rücklaufende Welle} \quad (3.45)$$

Die Länge des konischen Rohres wird mit  $L^*$  bezeichnet.

$$L^* = r_L - r_0 \quad (3.46)$$

$$Z_{L^*} = \frac{p(L^*, t)}{q(L^*, t)} = \frac{Ae^{-jkl^*} + Be^{jkl^*}}{A \frac{e^{jkl^*}}{Z_a^+(L^*)} - B \frac{e^{jkl^*}}{Z_a^-(L^*)}} \quad (3.47)$$

$$\frac{B}{A} = \left[ \frac{Z_a^-(L^*)}{Z_a^+(L^*)} \right] \left[ \frac{Z_{L^*} - Z_a^+(L^*)}{Z_{L^*} + Z_a^-(L^*)} \right] e^{-2jkl^*} \quad (3.48)$$

**Eingangsimpedanz:**

$$Z_0 = \frac{p(r_0, t)}{q(r_0, t)} = \frac{e^{-2jkr_0} + \frac{B}{A}}{\frac{e^{-2jkr_0}}{Z_a^+(r_0)} - \frac{B}{A}} \quad (3.49)$$

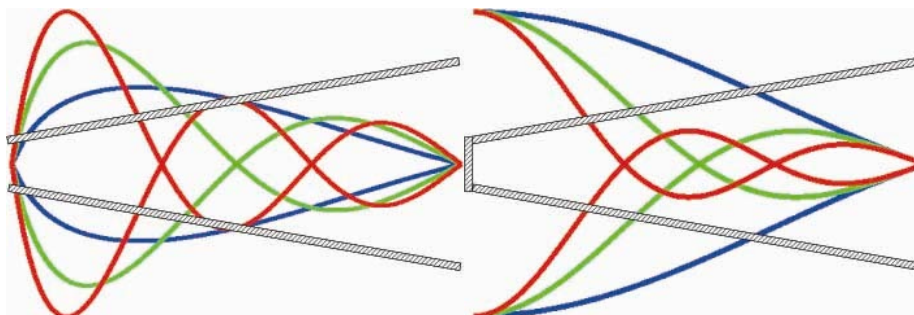
Für A und B wird wieder die hinlaufende und rücklaufende Welle eingesetzt:

$$Z_0 = \frac{p(r_0, t)}{q(r_0, t)} = \frac{e^{-2jkr_0} + \frac{|p_r|}{|p_h|}}{\frac{e^{-2jkr_0}}{Z_a^+(r_0)} - \frac{|p_r|}{|p_h|}} \quad (3.50)$$

### 3.2.2 Druckverlauf eines konischen Rohres

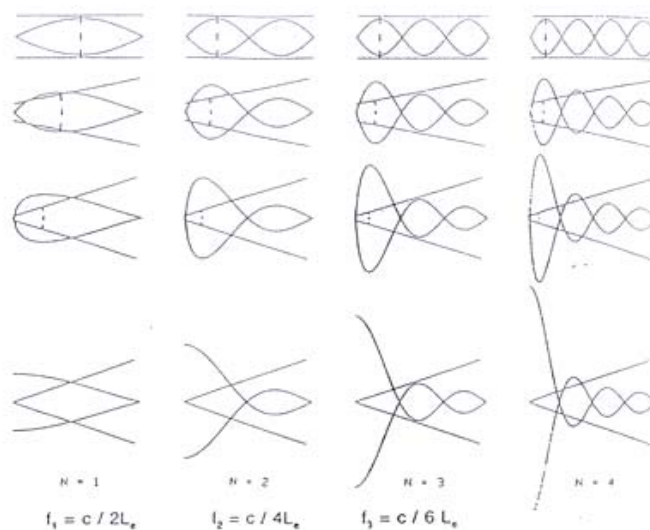
Die Wellenlänge entlang des Konus ist im Gegensatz zum zylindrischen Rohr nicht konstant. Daher ist es nicht möglich, durch eine Rückrechnung der Wellenlänge auf die gültige Frequenz zu kommen.

Wie auch beim zylindrischen Rohr ist in Abbildung 31 die blaue Linie die Grundschwingung, die grüne die erste Oberschwingung und die rote die zweite Oberschwingung.



**Abbildung 31** : Druckverlauf Links offenes konisches Rohr, rechts geschlossenes konisches Rohr<sup>75</sup>

Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, wird die Sinusschwingung im zylindrischen Rohr durch Veränderung der Rohrform zum konischen verzerrter. Ist ein Ende abgeschlossen, springt der Druck an dieser Stelle auf das Maximum und wir erhalten einen Druckbauch.



**Abbildung 32** : Übergang vom zylindrischen zu konischen Rohr<sup>76</sup>

<sup>75</sup> Carral, Sandra: *Relationship between the physical parameters of musical wind instruments and the psychoacoustic attributes of the produced sound*, Seite 15, PhD Dissertation 2005, University of Edinburgh.

<sup>76</sup> Ayers D. R., Eliason L. J., Mahgerefteh D.: *The conical bore in musical acoustics*, in: American Association of Physics Teachers, Vol 53, Seite 533, Juni 1985.

### 3.2.3 Übertragungsfunktion eines konischen Rohres<sup>77</sup>

Wie bei der Vierpolgleichung des zylindrischen Rohres kann auch das konische Rohr mit einer Vierpolgleichung beschrieben werden. Durch diese Vierpolgleichung ergibt sich die Übertragungsfunktion eines konischen Rohres. Auch diese Gleichungen verwendete das Software Programm „Optimierer“.

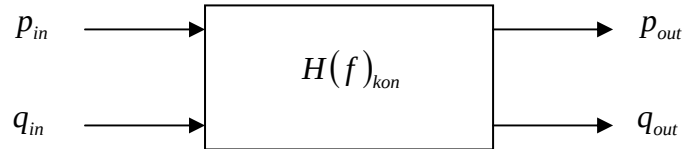


Abbildung 33 : Übertragungsfunktion konisches Rohr

$$H(f)_{kon} = \begin{bmatrix} A_{kon} & B_{kon} \\ C_{kon} & D_{kon} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$\begin{bmatrix} p_{in} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{kon} & B_{kon} \\ C_{kon} & D_{kon} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{out} \\ q_{out} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$Z_a^* = \frac{\rho c}{S^*} \dots \text{akustische Impedanz eines konischen Rohres} \quad (3.53)$$

$$A_{kon} = \frac{r_L}{r_0} \cos(kL^*) - \frac{1}{kr_0} \sin(kL^*) \quad (3.53)$$

$$B_{kon} = \frac{r_L}{r_0} jZ_a^* \sin(kL^*) \quad (3.55)$$

$$C_{kon} = \frac{j}{Z_a^*} \left\{ \left[ \frac{r_L}{r_0} + \left( \frac{1}{kr_0} \right)^2 \right] \sin(kL^*) - \frac{L^*}{r_0} \frac{1}{kr_0} \cos(kL^*) \right\} \quad (3.56)$$

$$D_{kon} = \frac{r_0}{r_L} \left[ \cos(kL^*) + \frac{1}{kr_0} \sin(kL^*) \right] \quad (3.57)$$

<sup>77</sup> Benade, A.H.: *Equivalent circuits for conical waveguides*, May 1988, Acoustical Society of America, Vol. 83, Nr. 5, Seite 1764 – 1769, Mai 1988.

### 3.2.4 Thermische Verluste eines konischen Rohres

Thermische Verluste im konischen Rohr können auf zwei verschiedene Arten berechnet werden. Zum einen mit der integrierenden Methode und zum anderen mit einem „mean radius method“ Scheibenmodell.

Bei konischen Rohren sind die Verluste proportional zum Abstand  $r_0$  (Abbildung 30). Im Vergleich dazu sind sie beim zylindrischen Rohr proportional zum Radius.

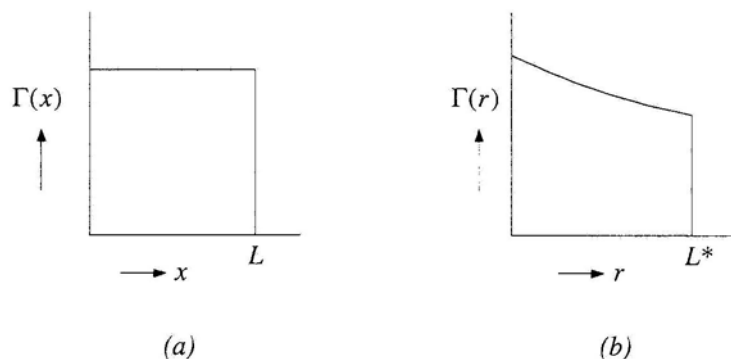
#### 3.2.4.1 Integrierende Methode

$$a_r(r_0) = \sin(\Theta) \cdot \sqrt{\frac{2(1 - \cos \Theta)}{\sin^2 \Theta}} \cdot \left( \frac{\omega \rho}{\eta} \right) \cdot r_0 = \sqrt{2 \left( \frac{\omega \rho}{\eta} \right) \left( 1 - \frac{L}{L^*} \right)} \cdot r_0 \quad (3.58)$$

#### Thermische Übertragungsfunktion

$$H_t(\omega) = e^{-G} \quad (3.59)$$

G... Übertragungsexponent



**Abbildung 34 :** Ausbreitungskonstante  $\Gamma$  für zylindrisches Rohr (a) und konisches Rohr (b)<sup>78</sup>

Der Übertragungsexponent für ein zylindrisches Rohr ist das Produkt von Ausbreitungskonstante und Länge des Rohres ( $G = \Gamma \cdot L$ ). Beim konischen Rohr muss über die Länge  $L^*$  integriert werden.

<sup>78</sup> Walstjin van, Maarten: *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, Seite 27, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.

$$G = \int_{r=r_0}^{r_L} \Gamma(r) dr = \left( \frac{\omega}{c} \right) \cdot [I_a + jI_p] \quad \dots \text{Übertragungsexponent} \quad (3.60)$$

Die Dämpfungsintegral- und Phasenintegralgleichungen wurden von van Walstijn entnommen.<sup>79</sup>

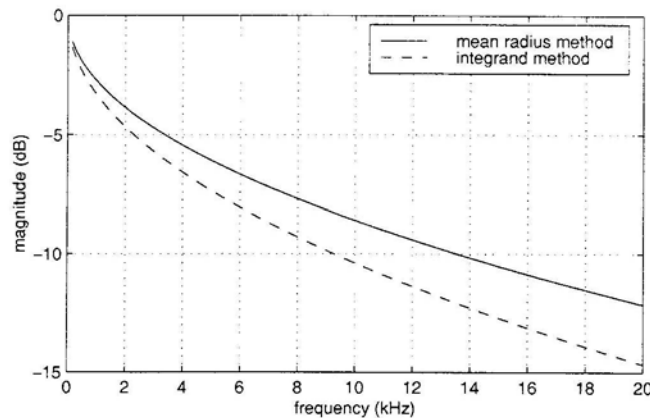
### Dämpfungsintegral

$$I_a = \left( \frac{c}{\omega} \right) \int_{r=r_0}^{r_L} \alpha(r) dr = \left( \frac{b_1}{c_a} \right) \log \left( \frac{r_L}{r_0} \right) + \left( \frac{b_2}{c_a^2} \right) (r_0^{-1} - r_L^{-1}) + \left( \frac{b_3}{2c_a^3} \right) (r_0^{-2} - r_L^{-2}) \quad (3.61)$$

### Phasenintegral

$$I_p = c \int_{r=r_0}^{r_L} v^{-1}(r) dr = (r_0 - r_L) + \left( \frac{b_1}{c_a} \right) \log \left( \frac{r_L}{r_0} \right) - \left( \frac{b_3}{2c_a^3} \right) (r_0^{-2} - r_L^{-2}) \quad (3.62)$$

Die Koeffizienten  $b_i$  werden im Kapitel 3.1.4 berechnet.



**Abbildung 35 :** Thermische Verluste (Betrag der Übertragungsfunktion) im konischen Rohr  $L^* = 2m$ ,  $r_0 = 2mm$   $r_L = 10mm$ , Vergleich zwischen mean radius method und integrand method<sup>80</sup>

<sup>79</sup> Walstijn van, Maarten: *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, Seite 27, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.

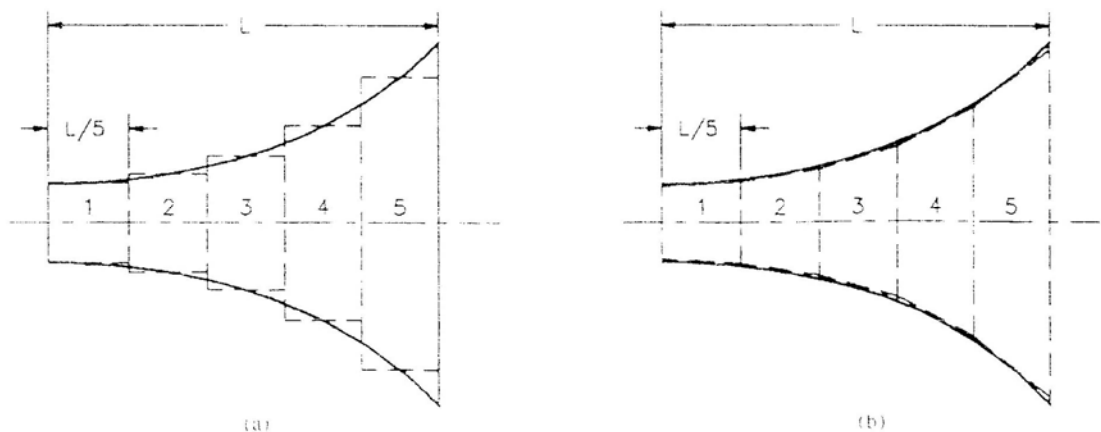
<sup>80</sup> Walstijn van, Maarten: *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, Seite 28, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.

### 3.2.4.2 Scheibenmodell (Mean radius method)

Beim konischen Rohr wird der Mittelwert des Durchmessers zwischen kleiner und großer Öffnung des Rohres ermittelt. Mit dem berechneten Durchmesser wird das Rohr als zylindrisches Rohr betrachtet. Ist der Unterschied zwischen kleiner und großer Öffnung klein, kann das Ergebnis mit der „mean radius method“ sehr gut an die integrierte Methode angeglichen werden.

Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, wird der Unterschied zwischen der „mean radius method“ und der „integrand method“ erst bei höheren Frequenzen deutlicher. Da in der musikalischen Akustik speziell beim Horn der interessante Frequenzbereich bis ca. 2 kHz liegt, ist der Unterschied zwischen beiden Methoden vernachlässigbar.

Für zylindrische Rohre ist die Berechnung der Übertragungsfunktion für thermische Verluste einfacher zu lösen, da nicht über die Übertragungsfunktionsexponenten integriert werden muss. Bei verschieden großem Durchmesser (Konus) wird die Berechnung sehr aufwändig. Eine gute Lösung, um diese Berechnung zu überbrücken, ist das Aneinanderbringen von dünnen zylindrischen Rohrscheiben (mit der „mean radius method“) an die Mensur des Instruments (Abbildung 36 (a)).



**Abbildung 36 :** Scheibenmodell an einem Schallbecher, mit zylindrischen Rohrelementen (a) und konischen Rohrelementen (b)<sup>81</sup>

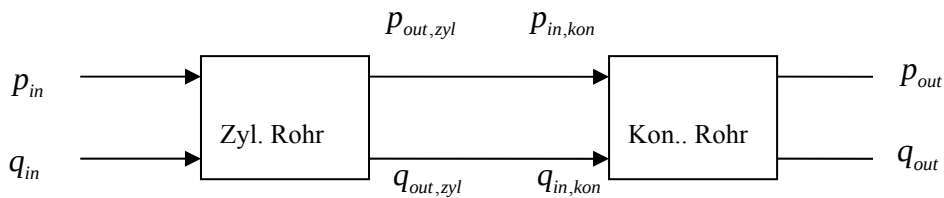
<sup>81</sup> Mapes-Riordan, Dan: *Horn Modeling with Conical and Cylindrical Transmission – Line Elements*, in: Audio Eng. Soc. Vol 41, No.6, Seite 472, Juni 1993.

Das Scheibenmodell mit zylindrischen Rohrelementen wurde für die Simulation des Schallbechers mit dem Programm Optimierer (Kapitel 6) verwendet. Neben dem Scheibenmodell mit zylindrischen Rohrelementen gibt es auch die Möglichkeit, mit konischen Rohrelementen den Trichter oder andere große Durchmesserunterschiede, wie zum Beispiel beim Stopfdämpfer, zu berechnen.

### 3.3 Kombination von zylindrischem und konischem Rohr

Bei einer gedeckten zylindrischen Pfeife sprechen nur ungeradzahlige Teiltöne beim Überblasen an. Durch das Verformen der zylindrischen Röhre, durch das Einbringen von konischen Rohrelementen, werden die Sinusschwingungen im Rohr so gestaucht oder gestreckt, dass die Obertöne ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz ergeben. Mit Hilfe des Schalltrichters werden die Druckwellen weiter zu einem ganzzahligen Frequenzverhältnis verschoben.

Durch die Vierpolgleichungen können zylindrische und konische Röhre miteinander kombiniert werden, um eine neue Matrix der Übertragungsfunktion



**Abbildung 37 :** Übertragungsfunktion zylindrisches und konisches Rohr

$$p_{out,zyl} = p_{in,kon}$$

$$q_{out,zyl} = q_{in,kon}$$

$$\begin{bmatrix} p_{in} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{out} \\ q_{out} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{zyl} & B_{zyl} \\ C_{zyl} & D_{zyl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{kon} & B_{kon} \\ C_{kon} & D_{kon} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$A_{zyl} = \cos(kL) \quad A_{kon} = \frac{r_L}{r_0} \cos(kL^*) - \frac{1}{kr_0} \sin(kL^*) \quad (3.66)$$

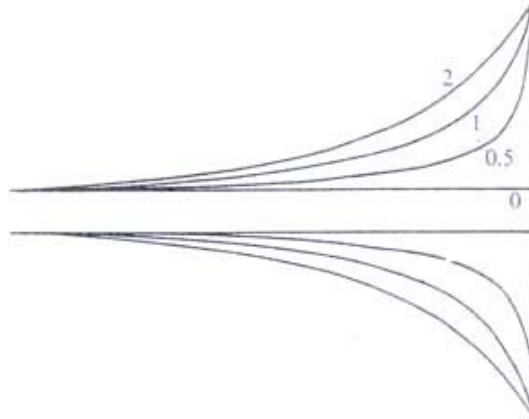
$$B_{zyl} = jZ_a \sin(kL) \quad B_{kon} = \frac{r_L}{r_0} jZ_a^* \sin(kL^*) \quad (3.67)$$

$$C_{zyl} = \frac{j}{Z_a} \sin(kL) \quad C_{kon} = \frac{j}{Z_a^*} \left\{ \left[ \frac{r_L}{r_0} + \left( \frac{1}{kr_0} \right)^2 \right] \sin(kL^*) - \frac{L^*}{r_0} \frac{1}{kr_0} \cos(kL^*) \right\} \quad (3.68)$$

$$D_{zyl} = \cos(kL) \quad D_{kon} = \frac{r_0}{r_L} \left[ \cos(kL^*) + \frac{1}{kr_0} \sin(kL^*) \right] \quad (3.69)$$

### 3.4 Schalltrichter

Mit dem Schalltrichter (Schallbecher) wird das Horn nach einer Kombination von zylindrischen und konischen Rohrelementen abgeschlossen. Die Form des Trichters gleicht einer Hyperbelfunktion 2. Ordnung (Abbildung 38).



**Abbildung 38** : Besselhorn 0 bis 2. Ordnung<sup>82</sup>

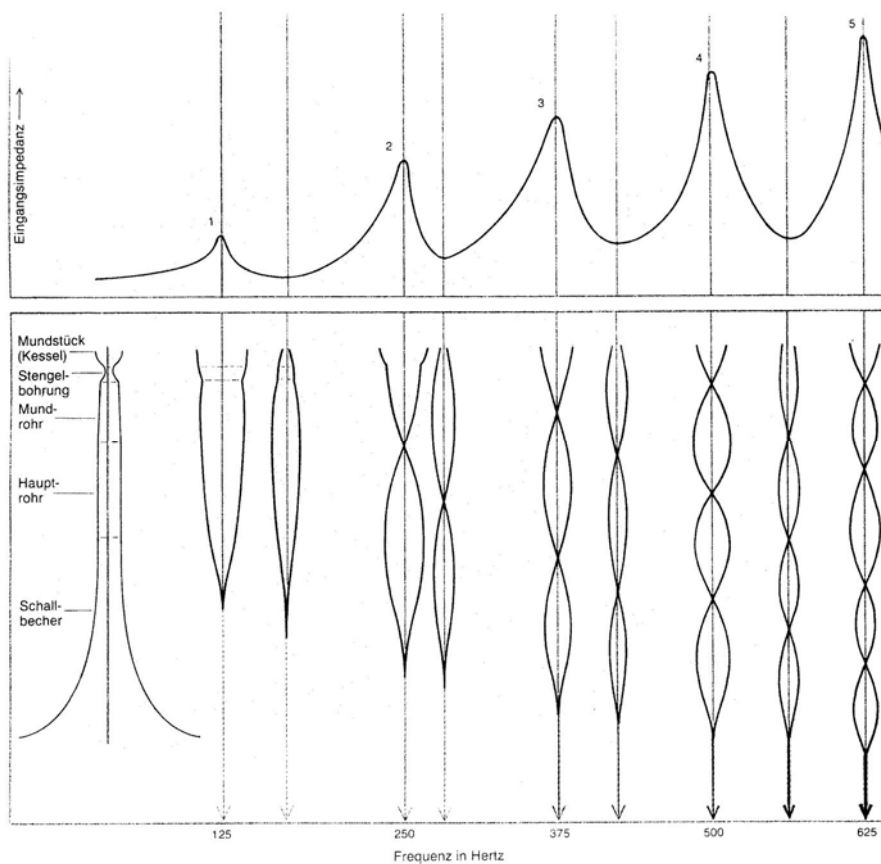
Der Schalltrichter hat die Aufgabe, genügend Energie im Horn zu speichern und zu reflektieren, damit sich die stehende Welle bei der gewünschten Frequenz ausbildet. Im

<sup>82</sup> Fletcher N.H., Rossing T.D.: *The Physics of Musical Instruments*, Seite 432, New York 1998.



Vergleich dazu hat ein Lautsprechertrichter die Aufgabe, möglichst viel Energie abzustrahlen.

In der Abbildung 39 ist der Schwingungsverlauf an den ortsfesten Amplitudenmaxima und -minima des Impedanzverlaufs ersichtlich.

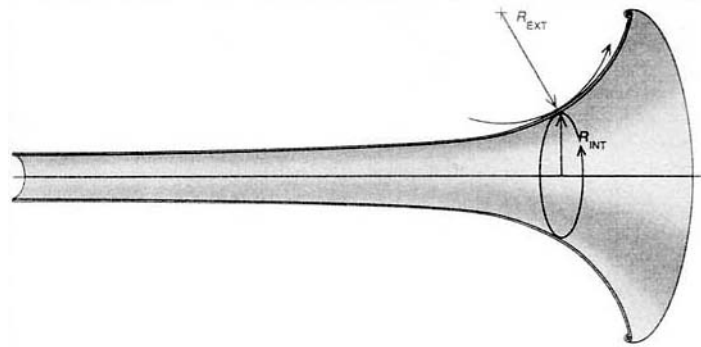


**Abbildung 39 :** Impedanzverlauf im Horn (oben) - stehende Welle in der Luftsäule (unten)<sup>83</sup>

Der Schallbecher verlängert die Wellenlänge bei hohen Frequenzen stärker als bei tieferen, dadurch werden die Frequenzverhältnisse ganzzahlig „zurechtgebogen“.

Der Schalltrichter kann mit der Webster Gleichung (auch Horngleichung für einparametrische Wellen genannt) beschrieben werden.

<sup>83</sup> Winkler, Klaus: *Physik der Musikinstrumente*, Seite 45, Heidelberg 1988.



**Abbildung 40 :** Horngleichungen des Schallbechers<sup>84</sup>

Die Websterfunktion berechnet sich aus dem Reziprok des Vektorprodukts von  $R_{INT}$  zu  $R_{EXT}$ .

$$U \cong \frac{1}{R_{INT} \times R_{EXT}} \quad (3.70)$$

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist durch die Websterfunktion nicht mehr einfach umgekehrt proportional zur Frequenz  $f$ , sondern von der akustischen Länge  $\sqrt{f^2 - U\left(\frac{c}{2\pi}\right)^2}$  abhängig. Je kleiner die Websterfunktion, desto größer wird die Wellenlänge.

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{f^2 - U\left(\frac{c}{2\pi}\right)^2}} \quad (3.71)$$

<sup>84</sup> Winkler, Klaus: *Physik der Musikinstrumente*, Seite 46, Heidelberg 1988.

## 4 Messungen am Instrument

Für die Messungen am offenen sowie am gestopften Horn wurden verschiedene Messanordnungen angewendet. In diesem Kapitel werden nun die (akustische) Eingangsimpedanz und die Übertragungsfunktion des gestopften und offenen Hornes betrachtet, um das Instrument akustisch zu untersuchen.

### 4.1 Messanordnung

Für die akustische Betrachtung des Hornes (offen und gestopft) werden für die Eingangsimpedanz und für die Übertragungsfunktion (Transferfunktion) zwei unterschiedliche Messaufbauten benötigt.

#### *Eingangsimpedanz*

Die (akustische) Eingangsimpedanz ist als das Verhältnis von Schalldruck zu Schallfluss am Mundstück des zu untersuchenden Instruments definiert.

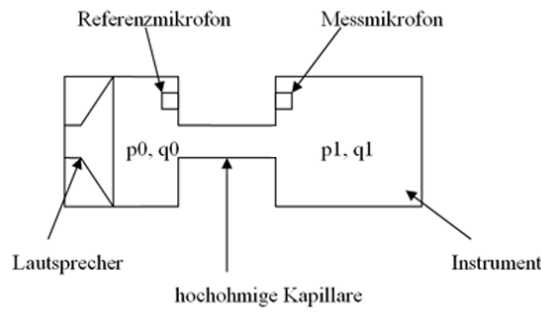
$$Z_a = \frac{p(x,t)}{q(x,t)} \quad (4.1)$$

Die Eingangsimpedanz beschreibt die Reaktion des Instruments (Aufbau einer Druckwelle) auf die Anregung durch den Bläser (Schallfluss ins Mundstück).<sup>85</sup>

Um nun die Eingangsimpedanz zu erhalten, müssen die Parameter Schalldruck und Schallfluss bestimmt werden. Den Druck am Mundstück kann man durch ein geeignetes Mikrofon am zu untersuchenden Instrument messen. Die Schallflussmessung ist auf direktem Wege schwer realisierbar. Es hat sich bewährt die Schallflussmessung mit der Methode der „Druckmessungen mit hochohmigem akustischen Widerstand“ zu verwenden. Als akustischer Widerstand kann eine Kapillare verwendet werden.

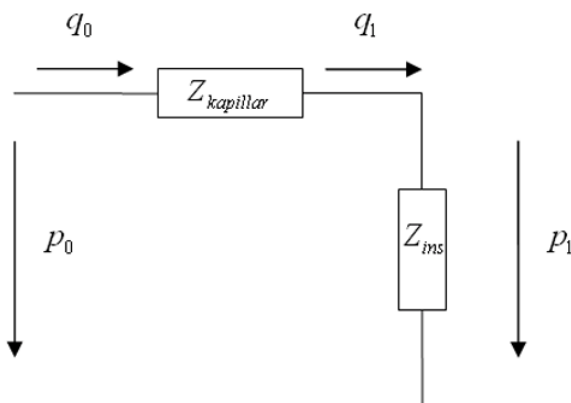
---

<sup>85</sup> Anglmayer, Paul: *Messung der akustischen Eingangsimpedanz von Blechblasinstrumenten*, Seite 4, Diplomarbeit 2001, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.



**Abbildung 41:** Funktionsprinzip Eingangsimpedanzmessung mittels hochohmiger Quelle

Aus dem akustischen Funktionsprinzip in Abbildung 41 kann das elektrische Ersatzschaltbild in Abbildung 42 abgeleitet werden. Die Kapillare ( $Z_{kapillar}$ ) wird im Vergleich zum komplexen Widerstand des Instruments  $Z_{ins}$  als ein sehr hochohmiger komplexer Widerstand angenommen. Der Schalldruck  $p_0$  wird am Referenzmikrofon und der Schalldruck  $p_1$  am Messmikrofon gemessen.



**Abbildung 42 :** Ersatzschaltbild Eingangsimpedanzmessung

Der Schallfluss in der Akustik üblicherweise der Stromstärke in der Elektrotechnik. Im Ersatzschaltbild (Abbildung 42) kann daher  $q_1$  mit  $q_0$  gleichgesetzt werden. Der Schalldruck am Instrument wird durch die elektrische Spannungsteilerregel definiert:

$$p_1 = p_0 \cdot \frac{Z_{ins}}{Z_{kapillar} + Z_{ins}} \quad (4.2)$$

Da  $Z_{\text{kapillar}} \gg Z_{\text{ins}}$  ist, kann im Nenner  $Z_{\text{ins}}$  vernachlässigt werden und aus dem Spannungsteiler ergibt sich:

$$Z_{\text{ins}} = Z_{\text{kapillar}} \frac{p_1}{p_0} \quad (4.3)$$

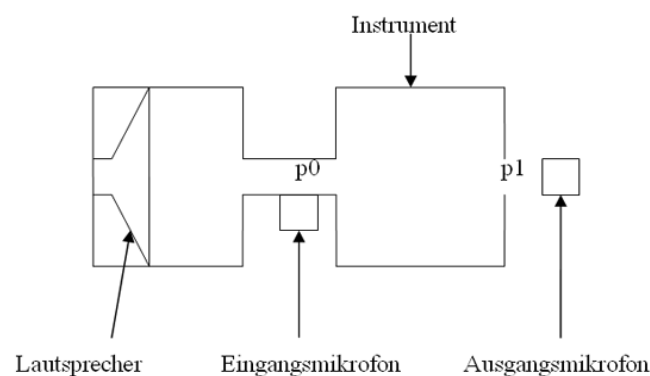
Da die Kapillare ( $Z_{\text{kapillar}}$ ) ein frequenzabhängiger Widerstand ist, muss  $Z_{\text{kapillar}}$  für einen definierten Frequenzbereich kalibriert werden. Dieses Funktionsprinzip wird im BIAS Messkopf<sup>86</sup> (Kapitel 4.1.1) verwendet.

### **Schalldruck - Übertragungsfunktion**

Die Messung der Übertragungsfunktion erfolgt dadurch, dass der Druck am Mundstück und am Ende des Instruments gemessen wird. Aus den gemessenen Druckpegeln wird die Übertragungsfunktion berechnet.

Die Übertragungsfunktion ist definiert:

$$H(f) = \frac{p_{1(f)}}{p_{0(f)}} = \frac{\text{Ausgangsdruck}}{\text{Eingangsdruck}} \quad (4.4)$$



**Abbildung 43 :** Funktionsprinzip Übertragungsfunktionsmessung

<sup>86</sup> BIAS: *Brass Instrument Analysis System Handbuch*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.

Die Übertragungsfunktion beschreibt das Verhältnis von Ausgangsdruck (Anpassung zum Raum) und Eingangsdruck (Druck am Mundstück).

#### 4.1.1 BIAS Messkopf

Am Institut für Wiener Klangstil an der Universität für Musik und darstellende Kunst Wien wurde seit dem Jahr 1982 das **Brass Instrument Analysis System** (BIAS<sup>87</sup>) entwickelt. Es handelt sich dabei um ein aus Hardware und Softwarekomponenten bestehendes System zur Messung von Eingangsimpedanzen. Diese wird zur Diagnose und Weiterentwicklung von Blechblasinstrumenten verwendet.



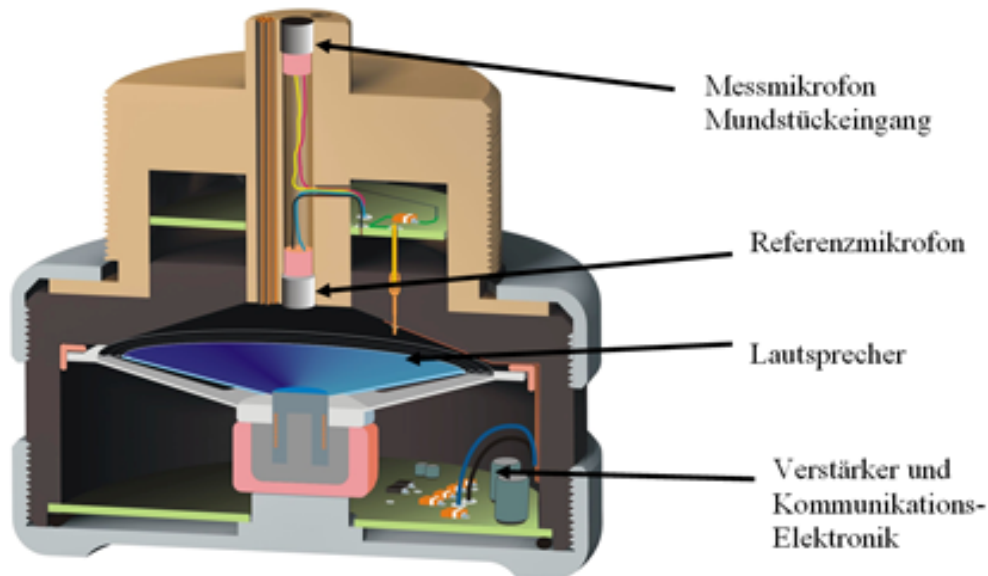
Abbildung 44 : BIAS Messkopf

Die Untersuchung wird durchgeführt indem das Instrument mit einem Chirp Signal (2 Sekunden) angeregt wird. Das Erregersignal wird nun vom Referenzmikrofon (Abbildung 45) aufgezeichnet und in der Messsoftware über ein Rechteckfenster gelegt. Dieses Signal wird mit 12 kHz abgetastet und mit einer Diskreten Fourier Transformation (DFT) in den Frequenzbereich transformiert.

Im Messkopf (Abbildung 45) befinden sich zwei Mikrofone. Das Referenzmikrofon ist direkt über dem Lautsprecher angebracht und misst den Druck am Lautsprecher, das Messmikrofon misst den Schalldruck am Mundstück des Instruments.

---

<sup>87</sup> BIAS: *Brass Instrument Analysis System Handbuch*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.



**Abbildung 45 :** Messkopf Innenleben

In der Abbildung 46 ist der Messaufbau einer Eingangsimpedanzmessung mit dem BIAS Messkopf abgebildet.



**Abbildung 46 :** Messaufbau BIAS

Aus der Eingangsimpedanz berechnet die Software mittels einer Inversen - Fourier - Transformation (IFT) die Impulsantwort der Eingangsimpedanz. Die Daten der Eingangsimpedanz, die im Frequenzbereich liegen, werden dazu in den Zeitbereich transformiert.

Die Eingangsimpedanz wird ab 20 Hz gemessen, da im unteren Frequenzbereich Blechblasinstrumente nicht angeregt werden. Die Messsignale werden dazu von 0 bis 20 Hz genullt. Damit können Resonanzen zwischen 0 bis 20 Hz nicht in die Berechnung der Impulsantwort einfließen.

Die Impulsantwort, auch Gewichtsfunktion genannt, ist die im Zeitbereich entstehende Antwort eines Dirac Impulses. Wird ein Impuls ins Instrument geschickt und die Geometrie der Mensur ändert sich plötzlich deutlich (wie zum Beispiel das Ende des Trichters), ergibt sich eine Reflexionsspitze an dieser Stelle. Die Impulsantwort wird zum Beispiel für das Erkennen von Störstellen im Instrument verwendet. Ist die Spitze am Schalltrichter deutlich kleiner als gewohnt, können die Störstellen wie eine undichte Stelle im Instrument sein.

Die Höhe der Impulsantwort ist umgekehrt proportional mit der Größe der Abstrahlung der Schallenergie vom Instrument. Wie in Abbildung 47 zu sehen ist, kann man aus der zeitlichen Distanz zwischen dem eingebrachten Erregerimpuls und der Reflexion die effektive Länge des Instruments ersehen.

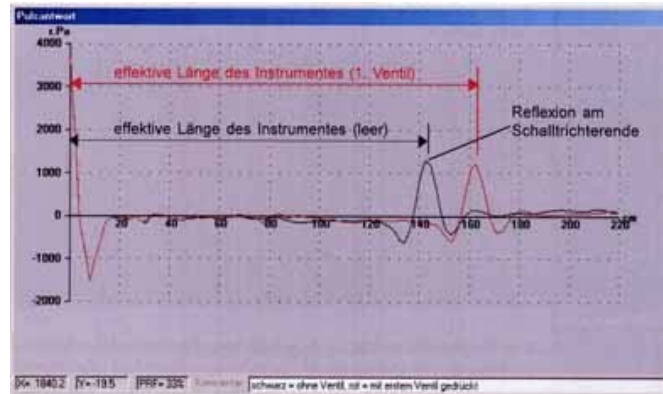


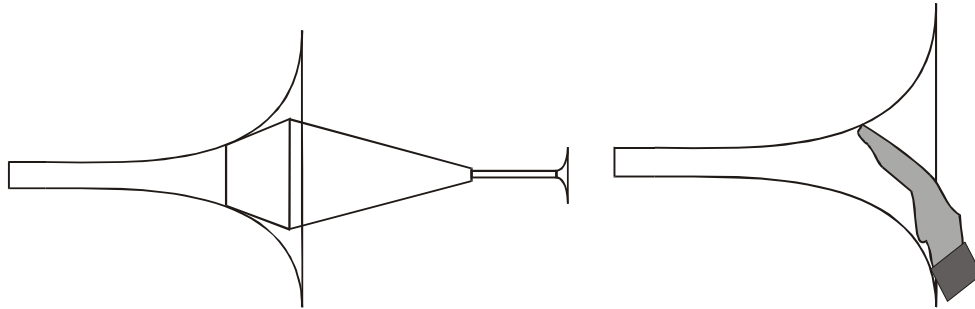
Abbildung 47 : Beispiel einer Impulsantwort<sup>88</sup>

<sup>88</sup> BIAS: *Brass Instrument Analysis System Handbuch*, Seite 90, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.



### 4.1.2 Stopfdämpfer

Alle Messungen am gestopften Horn wurden mit Hilfe eines Stopfdämpfers durchgeführt.<sup>89</sup> Der Stopfdämpfer besitzt eine rotationssymmetrische Struktur und ruft beim Stopfen einen nahezu gleichen Effekt wie die Hand hervor.



**Abbildung 48 :** Horn mit Stopfdämpfer und Horn mit Hand gestopft

Zudem ist im tiefen Frequenzbereich der Stopfdämpfer der Hand überlegen, da die Hand die Schallbecheröffnung zu wenig abdichtet, um den Effekt des Stopfens zu ermöglichen.



**Abbildung 49 :** Stopfdämpfer<sup>90</sup>

---

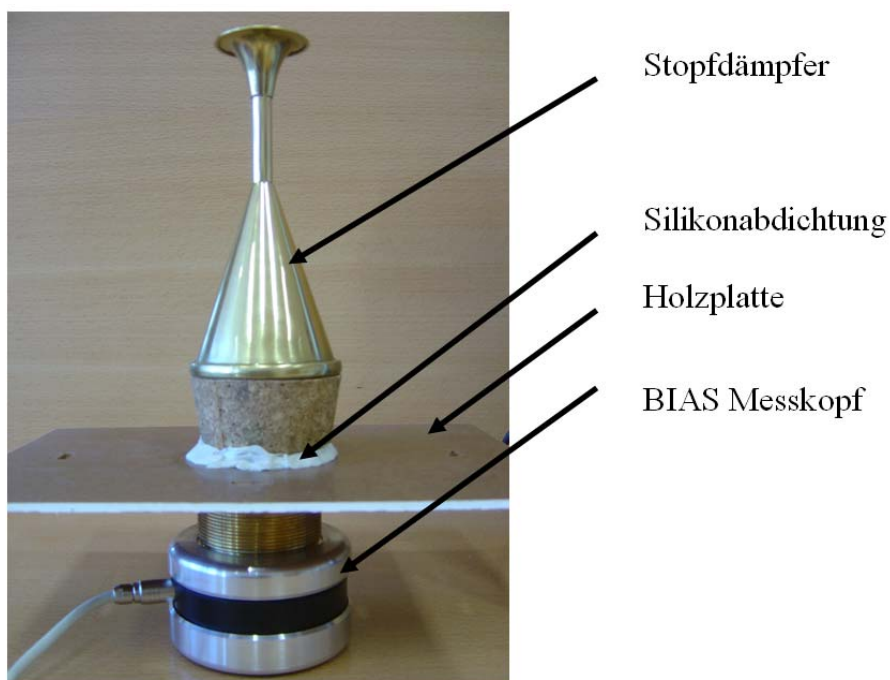
<sup>89</sup> Professional aS Stopfdämpfer, nicht transponierender Dämpfer.

<sup>90</sup> Stopfdämpfer: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer\\_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038).

### ***Abmessungen des Stopfdämpfers***

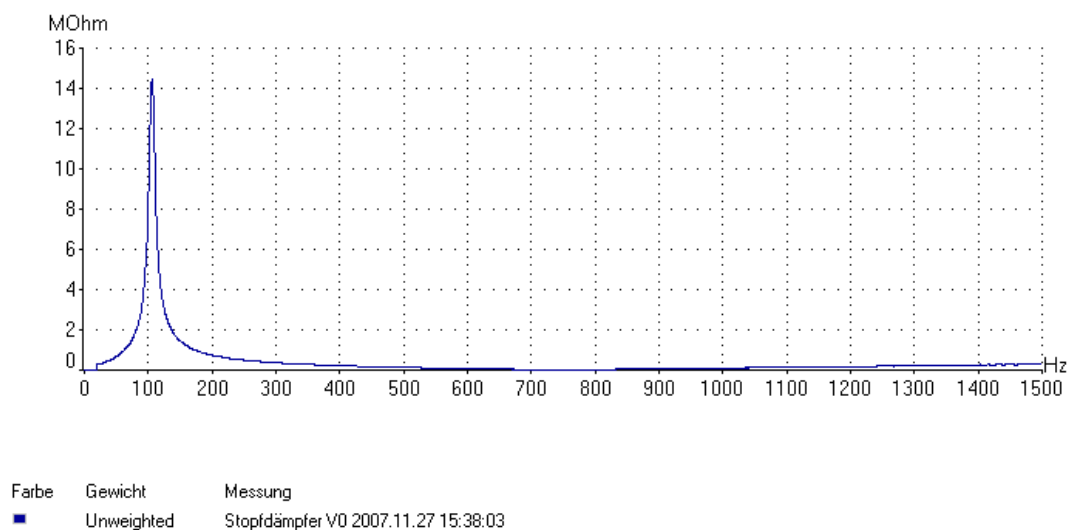
| Länge | Durchmesser |
|-------|-------------|
| mm    | mm          |
| 0     | 50,83       |
| 39    | 65,3        |
| 120   | 5,98        |
| 158   | 5,98        |
| 160   | 7,2         |
| 164   | 8,8         |
| 169   | 10,27       |
| 173   | 11,8        |
| 174   | 13          |
| 182   | 18          |
| 183   | 42,7        |

Die akustische Eingangsimpedanz des Stopfdämpfers wurde direkt mit dem BIAS Messsystem gemessen. Um die Eingangsimpedanzmessung am Stopfdämpfer mit dem BIAS Messkopf durchführen zu können, musste der Stopfdämpfereingang schalldicht abgeschlossen werden, indem eine 2mm dicke Holzplatte mit Silikon angebracht wurde.



**Abbildung 50 :** Messanordnung Stopfdämpfer

## Eingangsimpedanz



**Abbildung 51 :** Eingangsimpedanz Stopfdämpfer

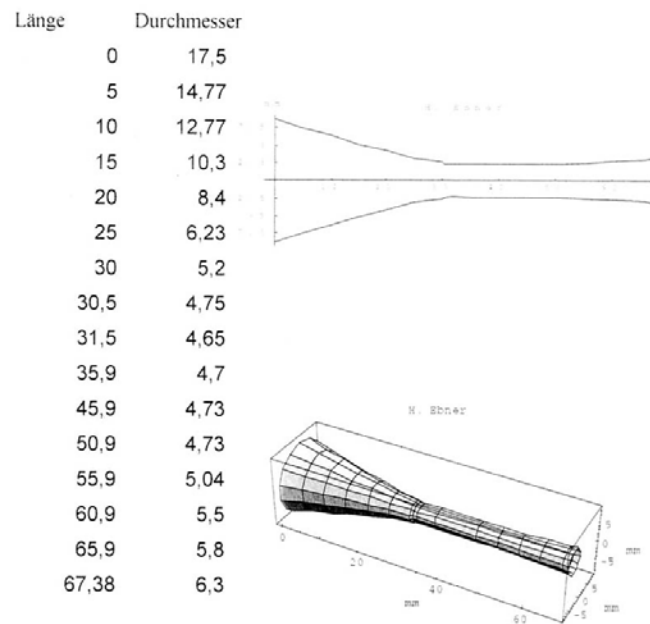
Die Eingangsimpedanz des Stopfdämpfers besitzt nur eine Resonanzspitze bei 106 Hz. Zudem hat diese nur eine Höhe von ca. 14 MOhm, was im Vergleich zu einem Horn (bis zu 60 MOhm) deutlich kleiner ist.

### 4.1.3 Instrument

Die Messungen wurden an einem F/B Doppelhorn<sup>91</sup> mit abschraubbarem handgehämmerten Schallbecher (Bell) durchgeführt. Zum Einsatz kam ein von Mag. Hermann Ebner entwickeltes Mundstück, dessen Konstruktionsdaten ich der Diplomarbeit von Bianka Emmerich entnehmen konnte.<sup>92</sup>

<sup>91</sup> Firma Engelbert Schmid F/B Doppelhorn Seriennummer 777.

<sup>92</sup> Emmerich, Bianka: *Der Einfluss des Mundstückes auf die Intonation beim Wiener F Horn*, Seite 32, Diplomarbeit 1999, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.



**Abbildung 52 : Mundstück Hermann Ebner<sup>93</sup>**



**Abbildung 53 : F/B Doppelhorn E. Schmid mit H. Ebner Mundstück**

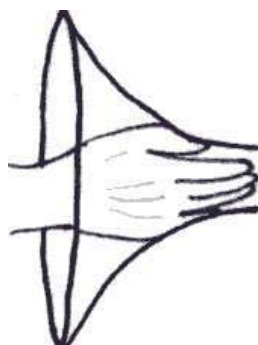
<sup>93</sup> Emmerich, Bianka: *Der Einfluss des Mundstückes auf die Intonation beim Wiener F Horn*, Seite 32, Diplomarbeit 1999, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

## 4.2 Eingangsimpedanz und Impulsantwort

In den nachfolgenden Kapiteln werden für die akustische Untersuchung des Hornes mit und ohne Dämpfer die Eingangsimpedanzen gemessen.

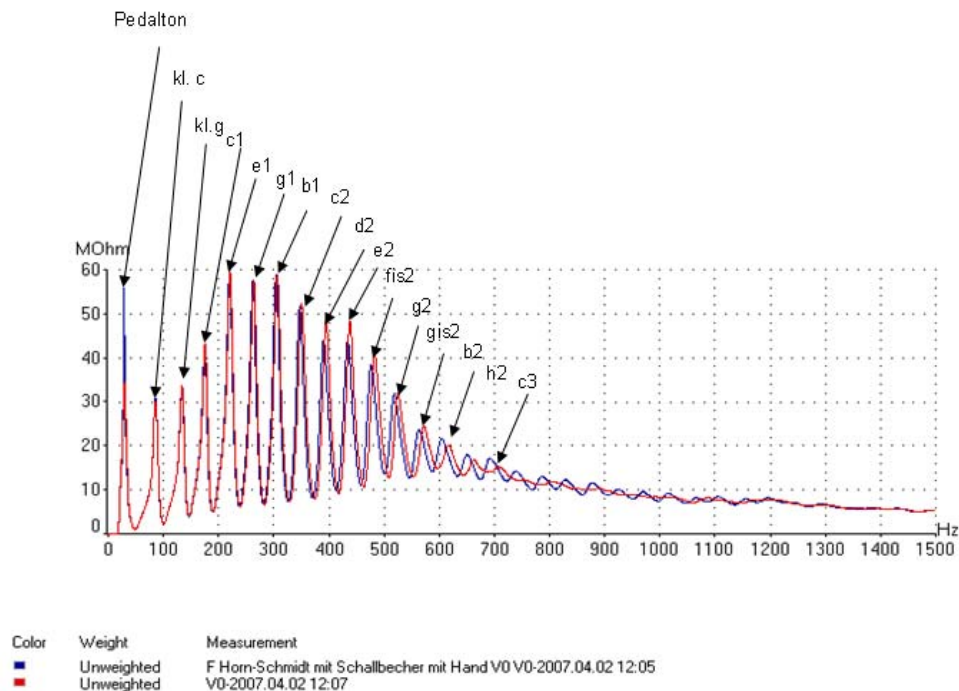
### 4.2.1 Das „offene Horn“

„Horn offen“ lautet die in der Notenliteratur verwendete Spielanweisung, wenn nach einem gestopften Ton wieder das Spiel mit der normalen Handhaltung (ungestopfter Ton) gewünscht wird. Daher liegt die rechte Hand im Schallbecher, das Gewicht des Hornes ruht auf dem Handballen. Die im Schallbecher liegende Hand verbessert die Intonation des Instruments und das Ansprechverhalten. Um für das „offene Horn“ exakt reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen, wird in dieser Versuchsanordnung das Horn ohne Anlegen der rechten Hand verwendet. Dem vorangestellt wird jedoch ein Vergleich der Eingangsimpedanz und Impulsantwort mit und ohne die rechte Hand im Schallbecher.



**Abbildung 54 :** Handhaltung des Horns mit der rechten Hand

## Eingangsimpedanz

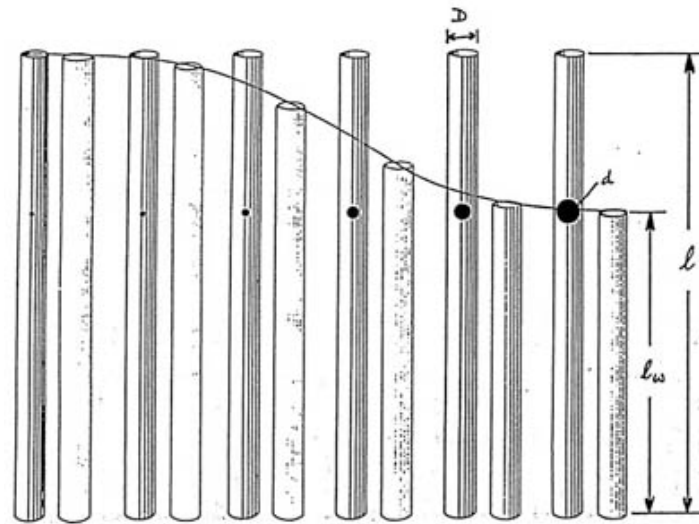


**Abbildung 55 :** Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (rot), Horn ohne Hand (blau)

Die Eingangsimpedanzmessung erfolgt am F Horn, Ventilstellung 0, weshalb die Resonanzfrequenzen in der Naturtonreihe C notiert sind. Das Horn ist ein transponierendes Instrument (in F). Um ein klingendes  $a_1$  mit der Frequenz von 443 Hz zu erhalten, muss das Horn eine reine Quint höher gespielt werden. Ab dem notierten c 2 liegen die Naturtöne sehr eng bei einander, was die Treffsicherheit im Allgemeinen sehr erschwert, zusätzlich sind die gemessenen Resonanzfrequenzen des Hornes mit der rechten Hand im Schallbecher im Vergleich dazu stärker ausgebildet. Dies verbessert das Ansprechverhalten beim Hornspiel.

Das Frequenzbild (Abbildung 55) zeigt, dass mit der rechten Hand im Schallbecher die Resonanzfrequenzen jeweils tiefer liegen.

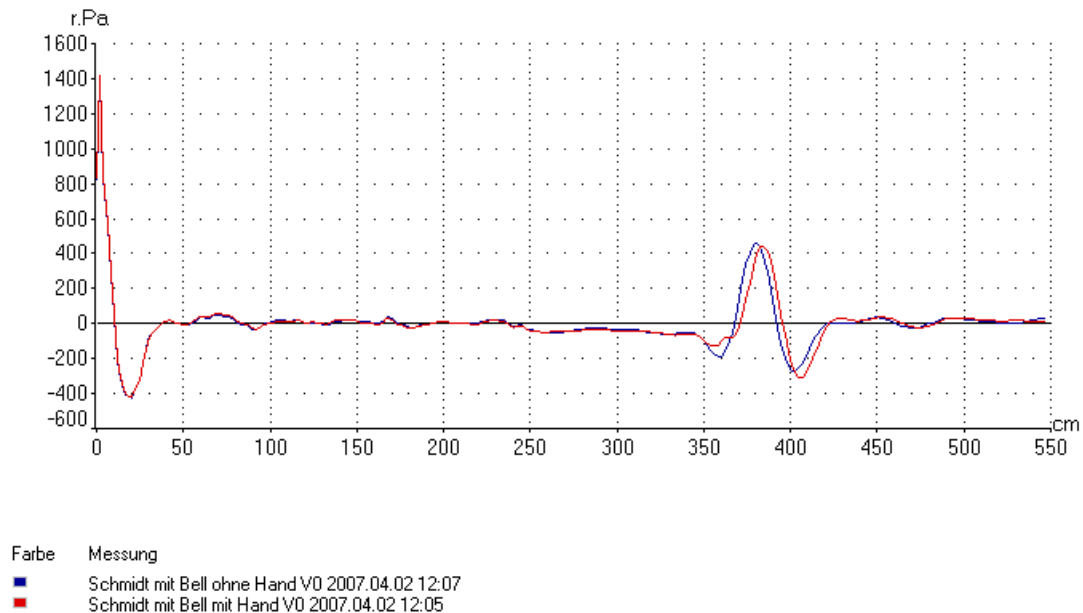
Dieses Ergebnis kann mit der Grifflöchergröße von Holzblasinstrumenten verglichen werden (Abbildung 56). Die im Schalltrichter immer anliegende Hand verringert den Querschnitt der Rohröffnung. Je größer die Grifflöcher (Rohröffnung) sind, desto kürzer ist die im Instrument schwingende Luftsäule.



**Abbildung 56 :** wirksame Luftsäulenlänge abhängig von der Grifflochgröße<sup>94</sup>

Aus dem Erklärungsmodell der Grifflöcher bei Holzblasinstrumenten kann geschlossen werden, dass die rechte Hand nicht die Rohrlänge des Hornes sondern die schwingende Luftsäule verlängert.

### Impulsantwort



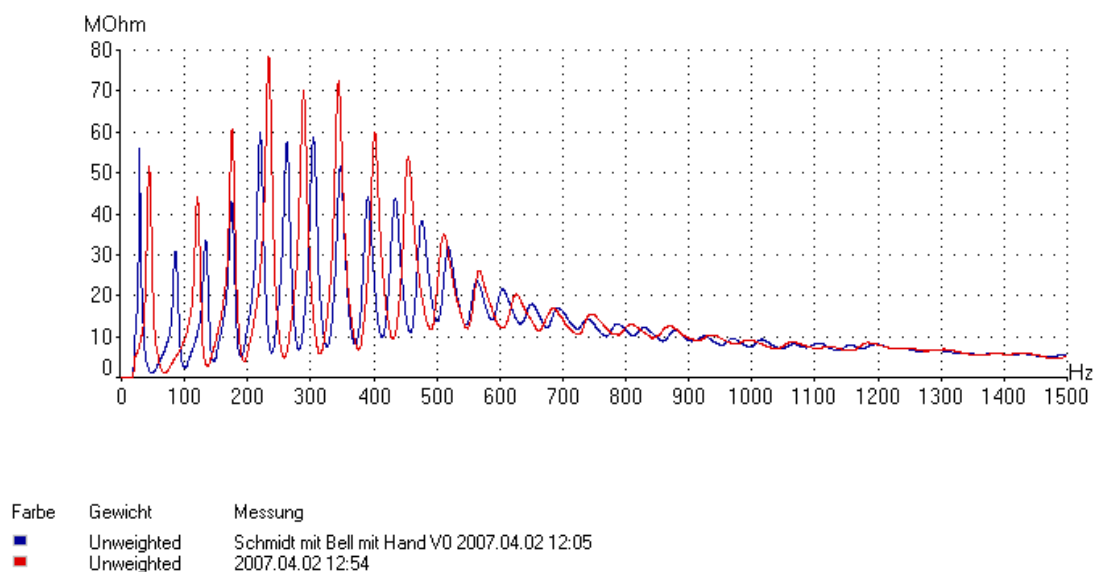
**Abbildung 57:** Impulsantwort F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (rot) und ohne Hand (blau)

<sup>94</sup> Widholm, Gregor: *Skriptum musikalische Akustik*, Seite 35, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2001.

Die berechnete Impulsantwort (aus der gemessenen Eingangsimpedanz) beim Horn ohne rechte Hand im Schallbecher (Bell) zeigt eine Verkürzung der wirksamen Luftsäulenlänge. Die rücklaufende Welle des Hornes ohne rechte Hand entsteht früher als mit der rechten Hand im Schallbecher (Abbildung 57). Der gespielte Ton wird höher.

#### 4.2.2 Vergleich von F Horn zum B Horn

Die Rohrlänge des B Hornes ist um circa 1 m kürzer als die des F Hornes. Das Doppelhorn kann mit einem Daumenventil jeweils zwischen F und B Seite umgeschaltet werden. Die B Hornseite ist ein Quart höher als das F Horn gestimmt und besitzt weniger Resonanzspitzen im Frequenzverlauf. Das Ansprechverhalten ist beim B Horn besser, da die Amplitude der Resonanzspitzen der Impedanz stärker ausgebildet ist. Dies ist durch das kleinere Verhältnis von Rohrlänge zum Durchmesser der Hornöffnung erklärbar.<sup>95</sup>



**Abbildung 58 :** Eingangsimpedanz Ventilstellung 0, F Horn (blau), B Horn (rot)

<sup>95</sup> Vgl.: Widholm, Gregor: *The Vienna Horn – a historic relict successfully used by top orchestras of the 21. century*, in: Forum Acousticum Budapest 2005



### 4.2.3 Horn ohne Schallbecher

Das Engelbert Schmid Doppelhorn besitzt einen abschraubbaren Schallbecher, wodurch das Instrument Platz sparend zusammengelegt und in einem Rucksack transportiert werden kann. Daher ist es möglich die Eingangsimpedanz des Hornes ohne Schallbecher zu messen.



Abbildung 59 : Horn ohne Schallbecher

### Eingangsimpedanz

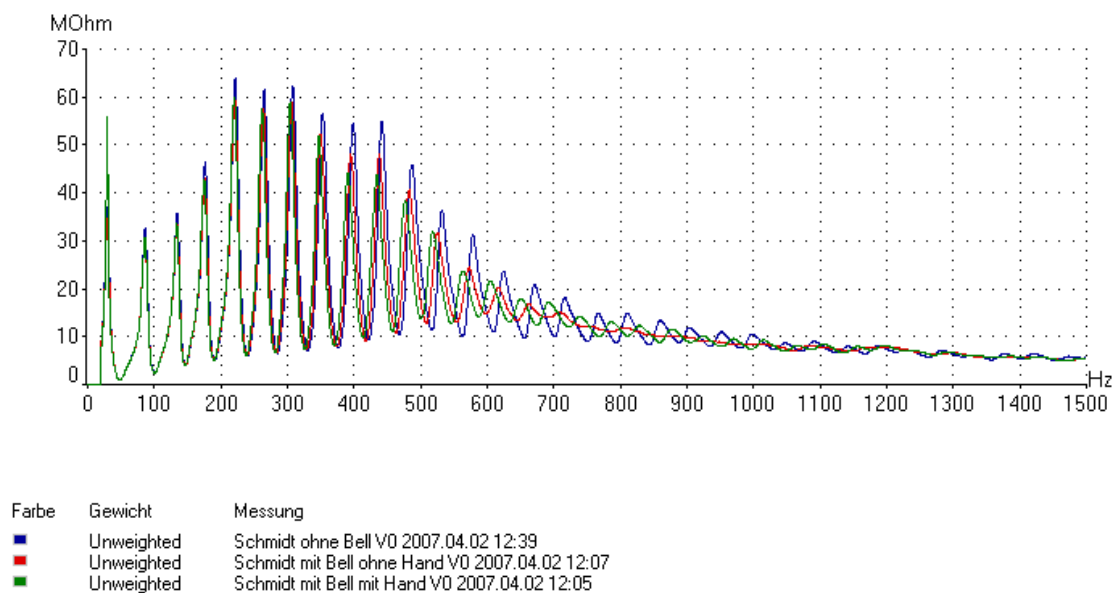
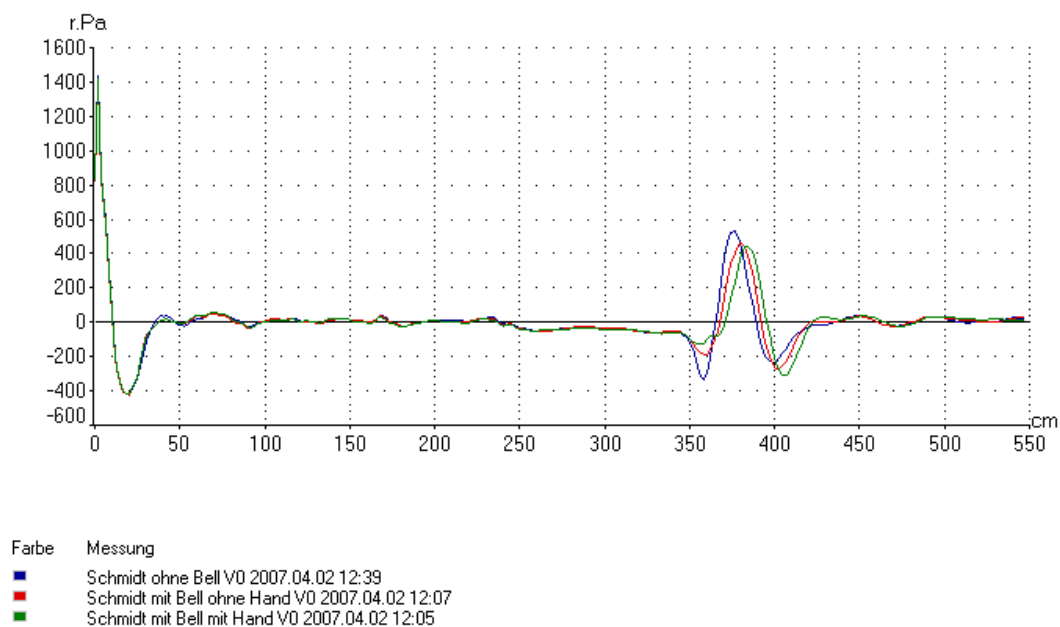


Abbildung 60 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (grün), Horn ohne Hand (rot), Horn ohne Schallbecher (blau)

In Abbildung 60 sind die Eingangsimpedanzen des Hornes ohne Schallbecher (Farbe Blau), mit Schallbecher ohne Hand (Farbe Rot) und mit der rechten Hand im Schallbecher (Farbe Grün) dargestellt. Ab einer Frequenz von ca. 220 Hz liegen die Resonanzfrequenzen des Hornes ohne Schallbecher im Vergleich zum Horn mit Schallbecher deutlich höher. Zudem sind die Resonanzfrequenzen über 600 Hz mit deutlich höherer Amplitude ausgebildet. Die Cut off Frequenz beim Horn ohne Schallbecher, ab der die Resonanzen nicht mehr ausgebildet sind, liegt deutlich höher als beim Horn mit Schallbecher.

### ***Impulsantwort***



**Abbildung 61 :** Impulsantwort F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (grün), Horn ohne Hand (rot), Horn ohne Schallbecher (blau)

Die Impulsantwort des Hornes ohne Schallbecher ist deutlicher ausgeprägt, da die Rohröffnung kleiner ist und daher weniger Schall abstrahlt (Abbildung 61). Ohne Schallbecher wird die wirksame Luftsäule vor allem für höhere Teiltöne kürzer (reicht nicht in den Schallbecher) und der Ton erhöht sich dementsprechend.

#### 4.2.4 Horn mit Stopfdämpfer

Da das Horn einen abschraubbaren Schallbecher besitzt, können neben der Impedanzmessung des gesamten Hornes mit Stopfdämpfer auch Messungen ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer durchgeführt werden. Der Stopfdämpfer am Horn ohne Schallbecher schließt den Stopfdämpfer unmittelbar an die Rohröffnung des Instruments an (Abbildung 62).



Abbildung 62 : Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer

#### Eingangsimpedanz

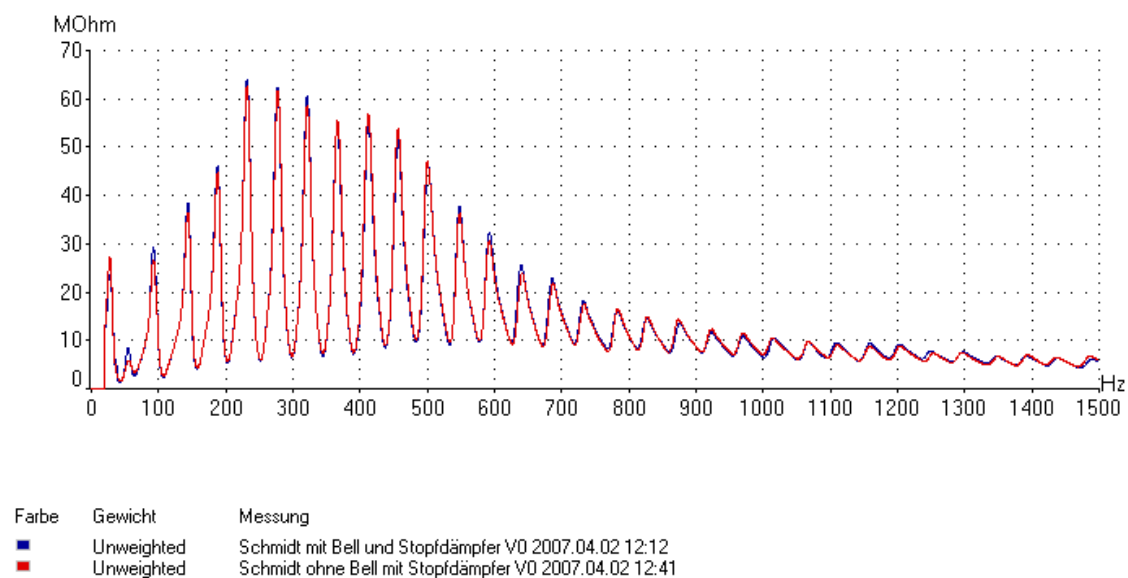
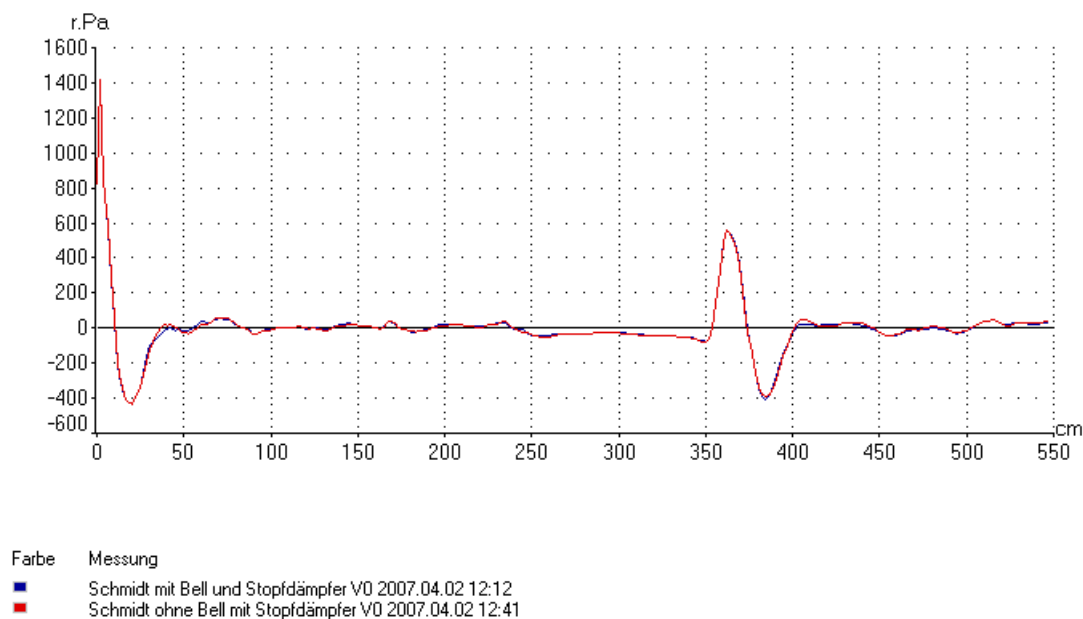


Abbildung 63 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer (rot)

Die Eingangsimpedanz des Hornes mit Stopfdämpfer bildet im Gegensatz zum offenen Horn bei 55 Hz eine neue Resonanzspitze. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese vom Stopfdämpfer stammt.<sup>96</sup> Die Eingangsimpedanz des gestopften Hornes mit und ohne Schallbecher ist ident. Daher kann angenommen werden, dass der Stopfdämpfer den Schallbecher ersetzt. Der Schallbecher ist in dieser Betriebsart nicht relevant, weshalb im folgenden das Horn mit Stopfdämpfer immer ohne Schallbecher betrachtet wird.

### Impulsantwort



**Abbildung 64 :** Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer (rot)

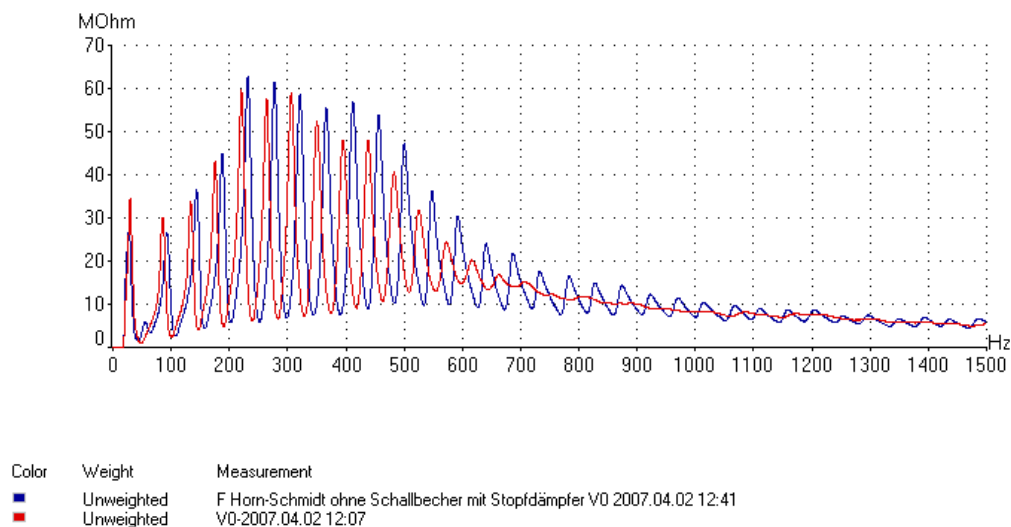
Die Impulsantwort des gestopften Hornes ohne Schallbecher ist ident mit der Impulsantwort des gestopften Hornes mit Schallbecher (Abbildung 64).

### 4.2.5 Vergleich Horn mit und ohne Stopfdämpfer

Wie in Abbildung 65 ersichtlich ist, sind die Resonanzfrequenzen des Hornes mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher im Vergleich zum Horn ohne Hand durchgängig höher ausgebildet. Die Resonanzfrequenzen besitzen jeweils alle höhere Amplituden, mit

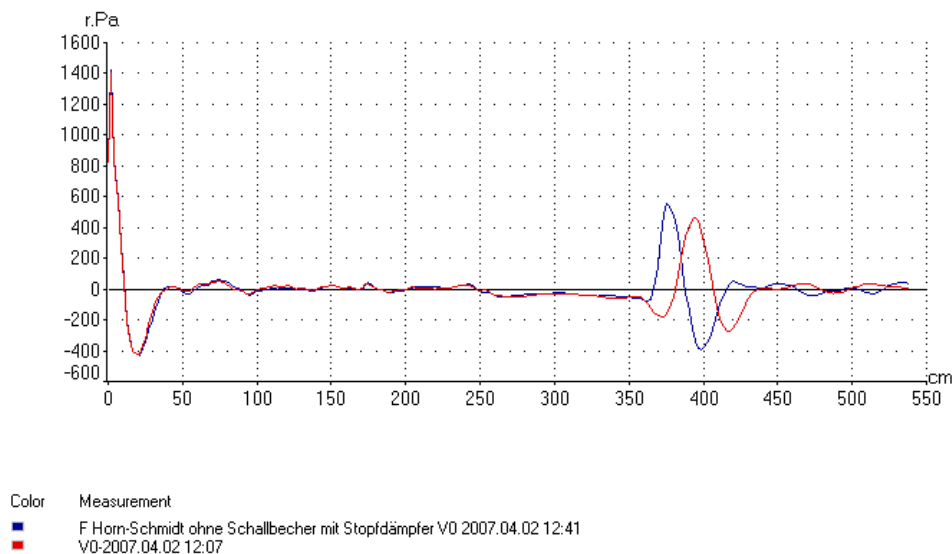
<sup>96</sup> Vgl. Bertsch, Matthias: *Der Einfluss des Dämpfers an das akustische Verhalten und der Klangfarbe der Trompete*, Diplomarbeit 1993, Seite 35, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

Ausnahme vom Pedalton (25 Hz), wodurch das Ansprechverhalten des Hornes mit Stopfdämpfer deutlich besser ist.



**Abbildung 65 :** Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher (blau), Horn offene Schallbecher (rot)

### Impulsantwort

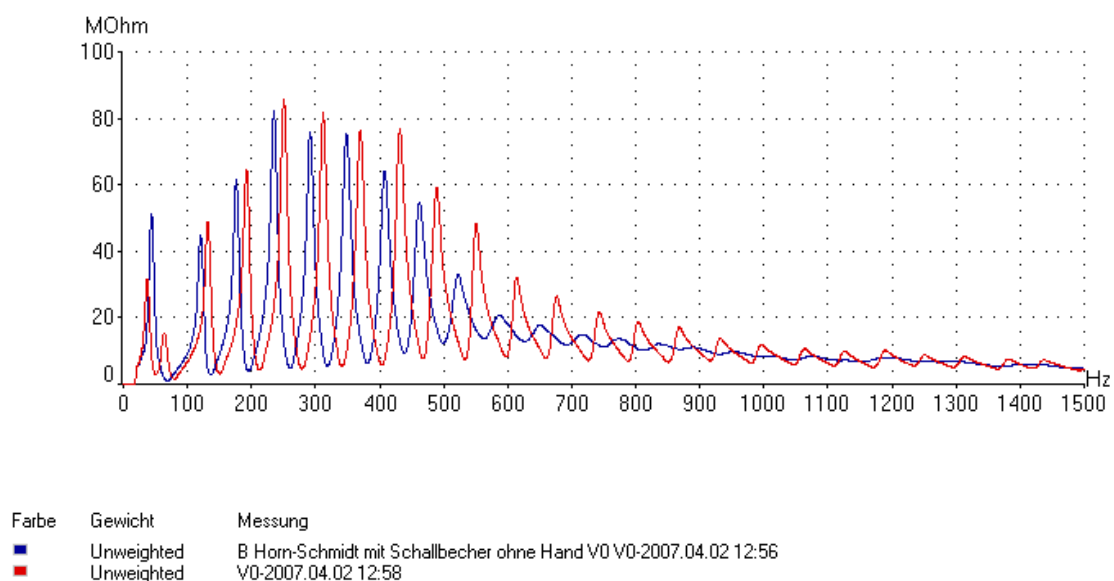


**Abbildung 66 :** Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher (blau), Horn offene Schallbecher (rot)

Der Stopfdämpfer verkürzt die wirksame Luftsäulenlänge und der gespielte Ton erhöht sich. Die Amplitude der Impulsantwort des Hornes mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher ist im Vergleich zum offenen Horn stärker ausgebildet, das heißt dass das Horn weniger Energie abstrahlt.

#### 4.2.6 Vergleich F Horn mit Stopfdämpfer zu B Horn mit Stopfdämpfer

Der gestopfte Ton auf dem B Horn besitzt eine falsche Intonation. Die gestopften Töne liegen beim B Horn zwischen einem Halbton und einem Ganzton vom ungestopften Ton entfernt. Der Musiker kann dies durch zusätzliches Transponieren nicht kompensieren. In der Praxis verwenden HornistInnen für das Spielen von gestopften Tönen daher meistens nur die F Hornseite. Das B – Horn bildet beim gestopften Betrieb eine Resonanzspitze bei 64,7 Hz.

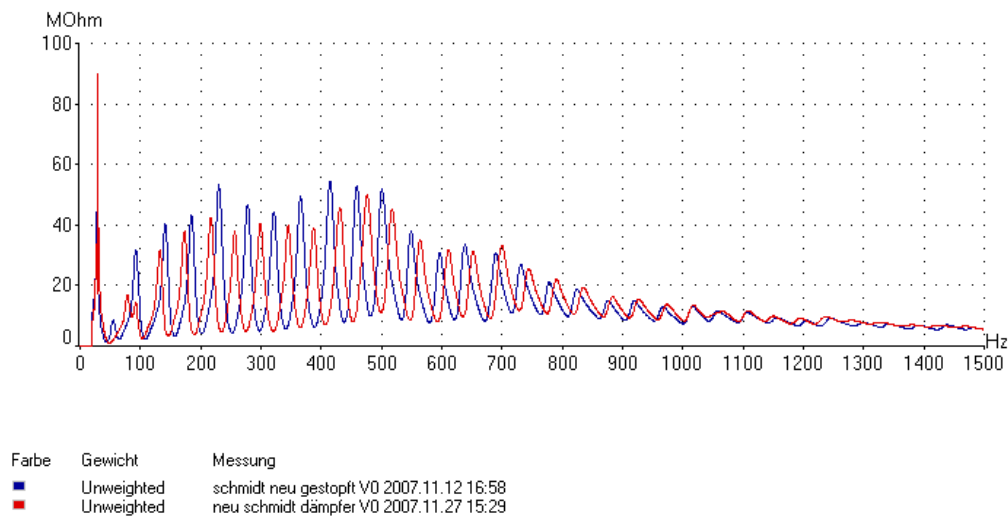


**Abbildung 67 :** Eingangsimpedanz, B Horn, Ventilstellung 0, Horn mit offenen Schallbecher (blau), Horn mit Stopfdämpfer (rot)

#### 4.2.7 Vergleich Horn mit transponierendem und nicht transponierendem Dämpfer

Wie im Kapitel 2.3 beschrieben, gibt es bei Hörnern zwei unterschiedliche Typen von Dämpfern. Zum einen den nicht transponierenden Dämpfer (Stopfdämpfer), der beim Gebrauch die Tonhöhe ändert, und zum anderen den transponierenden Dämpfer, der die Tonhöhenänderung kompensiert.

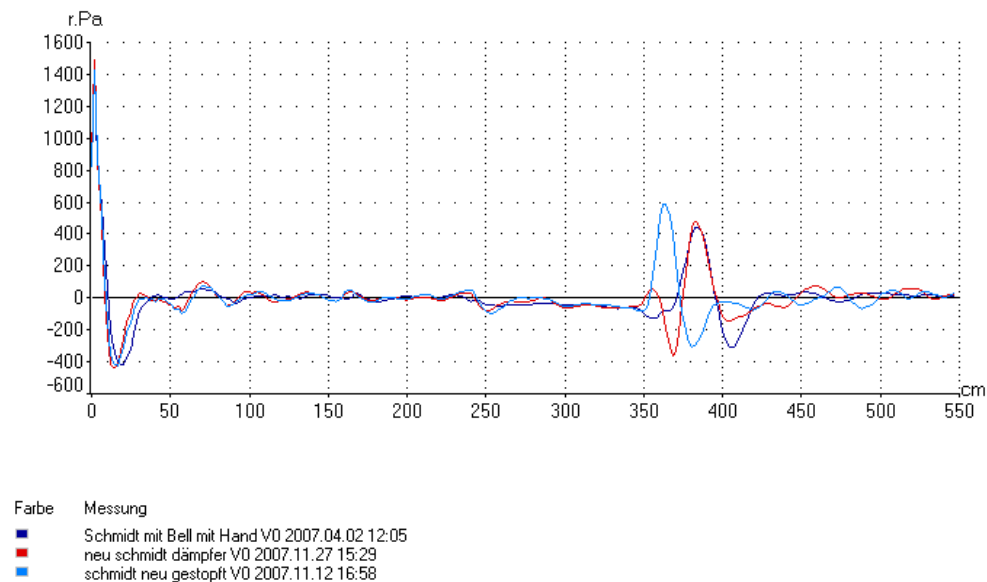
## Eingangsimpedanz



**Abbildung 68 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit transponierenden Dämpfer (blau), Horn mit nicht transponierendem Dämpfer (rot)

Die Abbildung 68 zeigt, dass beim transponierenden Dämpfer (95 Hz) wie auch beim nicht transponierenden Dämpfer<sup>97</sup> eine zusätzliche Resonanzfrequenz bei 55 Hz entsteht.

## Impulsantwort



**Abbildung 69 :** Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit nicht transponierenden Dämpfer (hellblau), Horn mit transponierendem Dämpfer (rot), Horn mit rechter Hand (blau)

<sup>97</sup> Stopfdämpfer.

Der transponierende Dämpfer besitzt meistens einen Stimmbolzen, mit dessen Hilfe die Tonhöhe geringfügig geändert werden kann. Wie in Abbildung 69 zu sehen ist, decken sich die rote (Horn mit transponierendem Dämpfer) und die dunkelblaue Linie (Horn mit der rechten Hand im Schallbecher). Hingegen wird beim Stopfdämpfer (nicht transponierender Dämpfer) die wirksame Luftsäulenlänge kürzer.

### 4.3 Messung der Übertragungsfunktion

Im schalltoten Raum wurde am Instrument die Druck – Übertragungsfunktion

$$H_p(f) = \frac{\text{Ausgangsdruck}}{\text{Eingangsdruck}} \text{ mit und ohne Stopfdämpfer sowie das Instrument ohne}$$

Schalltrichter gemessen. Da vordem am Institut für Wiener Klangstil die Übertragungsfunktionen von Blechblasinstrumenten nicht gemessen wurden, musste erst durch verschiedene Versuche der geeignete Messaufbau gefunden werden. Die verschiedenen Versuche werden im Anhang (11.2) beschrieben. Als Messsoftware wurde das Programm VIAS<sup>98</sup>, das am Institut für Wiener Klangstil entwickelt wurde, verwendet.

#### 4.3.1 Messkopf mit integriertem Mikrofon

Alexander Meyer<sup>99</sup> entwickelte einen Messkopf mit integriertem Mikrofon, um Übertragungsfunktionen zu messen. Als Ausgangsmikrofon wurde das Kleinmembran AKG CK 77 verwendet. Angebracht wurde das Mikrofon in der Ebene des Instruments, direkt am Ende des offenen Instruments angebracht. Beim Horn mit Stopfdämpfer wurde das Ausgangsmikrofon direkt beim Ausgang des Stopfdämpfers positioniert (Abbildung 70). Mit dieser Messanordnung konnte erstmals eine Übertragungsfunktion des Horns mit Stopfdämpfer mit ausreichendem Signalrauschabstand gemessen werden.

---

<sup>98</sup> VIAS: *Verisatle Instrument Analysis System Handbuch*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.

<sup>99</sup> Alexander Mayer, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.



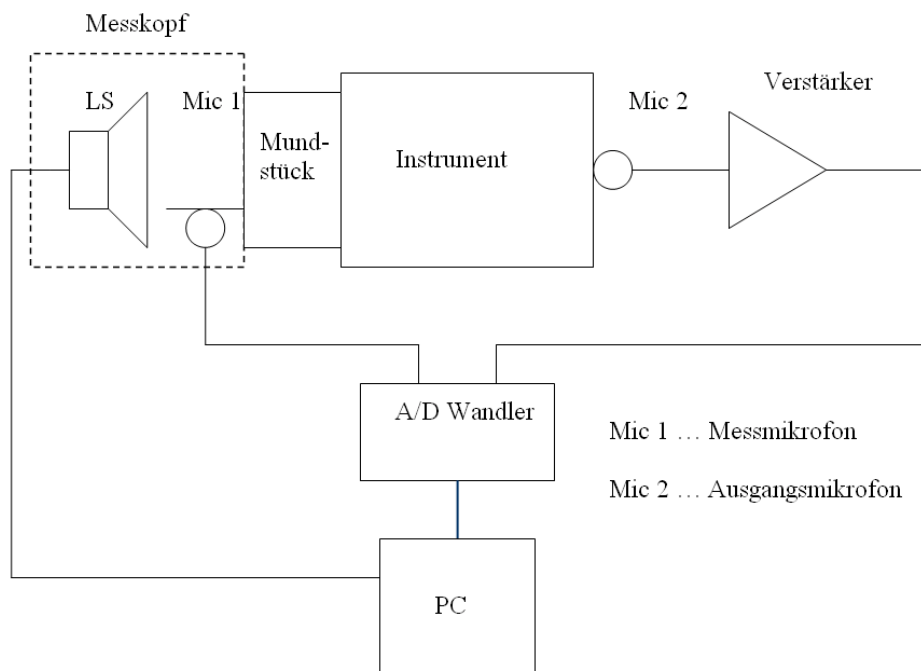


**Abbildung 70 :** Aufbau Messung Übertragungsfunktion



**Abbildung 71 :** Messkopf mit integriertem Messmikrofon

### Messaufbau Messkopf mit integriertem Messmikrofon



**Abbildung 72 :** Schaltplan Messung Übertragungsfunktion

Der BIAS Messkopf mit integriertem Messmikrofon ist direkt am Mundstück bzw. am Instrument angeschlossen. Das Eingangs- und Ausgangsdrucksignal wird an die externe Audio Soundkarte, Harddisc Recorder Alesis ADAT HD 24, geleitet und Digital gewandelt an den PC mit der Software VIAS übertragen. VIAS übergibt das Erregersignal direkt an den Lautsprecher LS (BIAS Messkopf).

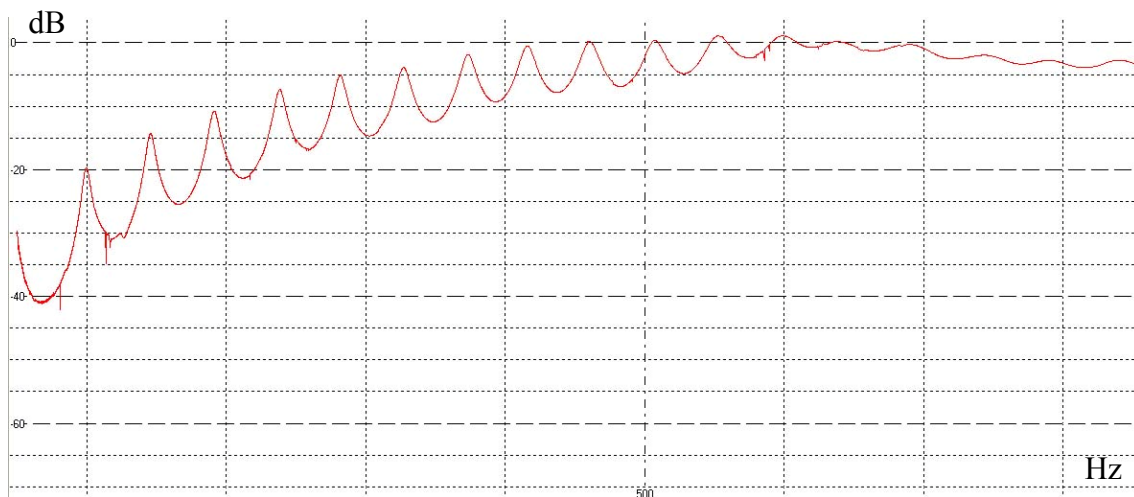
### Verwendete Komponenten

|                    |                                                                                                  |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mundstück          | H. Ebner                                                                                         |
| Instrument         | F/B Doppelhorn Engelbert Schmid                                                                  |
| Stopfdämpfer       | Professional Products aS                                                                         |
| Messkopf mit Mic 1 | Konstruktion von Alexander Mayer, Institut für Wiener Klangstil, Univ. f. Musik u. d. Kunst Wien |
| Mic2               | AKG CK 77                                                                                        |
| Verstärker         | Preamp mpa 2017                                                                                  |
| A/D Wandler        | 8 Kanal Harddisc Recorder Alesis ADAT HD 24, optischer Ausgang                                   |

Die gemessenen Amplituden der Übertragungsfunktionen sind als rein qualitativ zu interpretieren. Auf die Resonanzspitzen der Übertragungsfunktion folgt an der gleichen Position eine Antiresonanz der Eingangsimpedanz (Vergleich: Abbildung 55, 60 und 63). Die Resonanzspitze der Übertragungsfunktion ist zur Antiresonanz der Eingangs-

impedanz nur gering verschoben. Die liegt daran, dass bei der Messung der Übertragungsfunktion, vor dem Mundstück für die Positionierung des Eingangsmikrofons, ein zusätzliches Volumen angebracht werden musste.

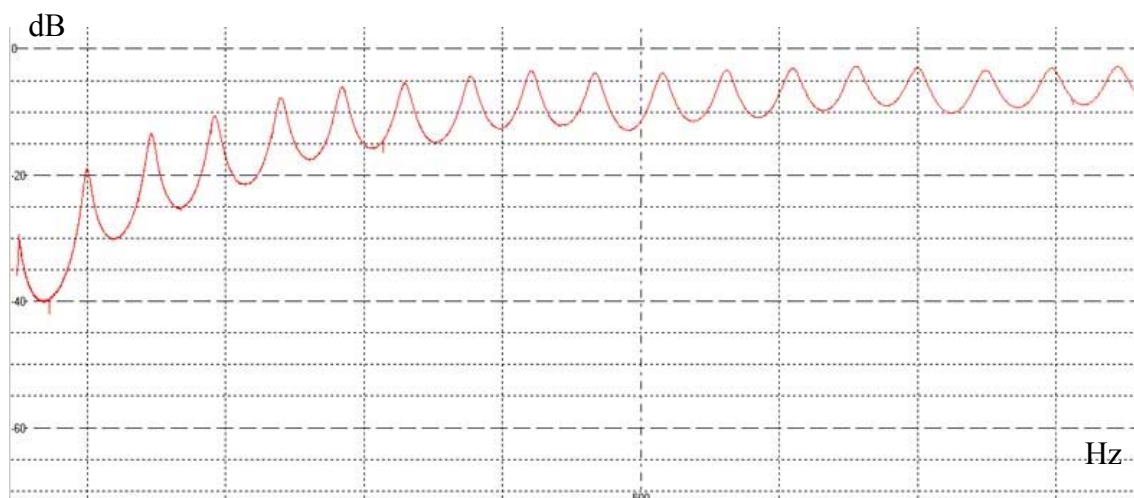
### **Übertragungsfunktion $F$ Horn offen**



**Abbildung 73 :** Übertragungsfunktion,  $F$  Horn, Ventilstellung 0

Ab ca. 600 Hz wird der größte Teil der Energie abgestrahlt. Die Übertragungsfunktion fällt dementsprechend.

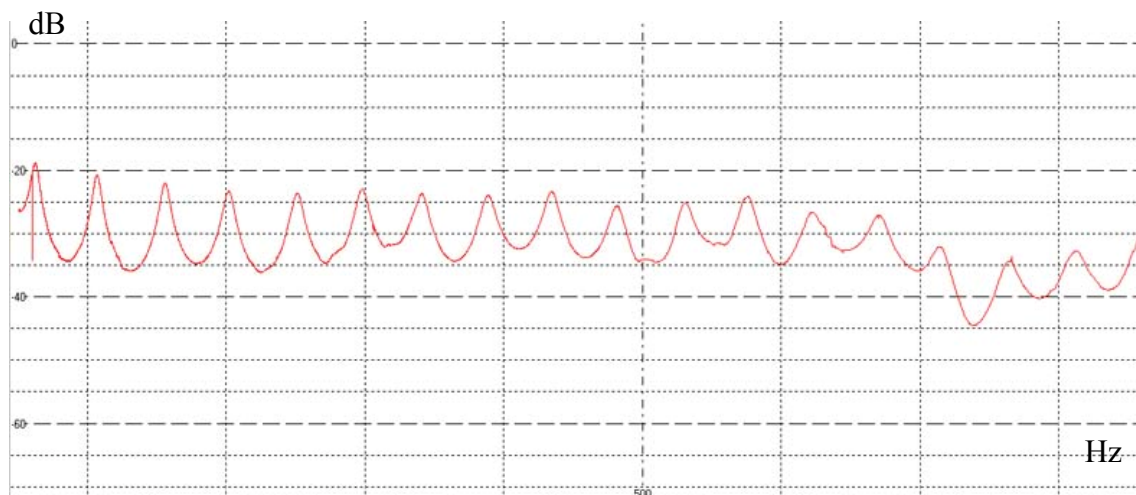
### **Übertragungsfunktion $F$ Horn ohne Schallbecher**



**Abbildung 74 :** Übertragungsfunktion,  $F$  Horn ohne Schallbecher, Ventilstellung 0

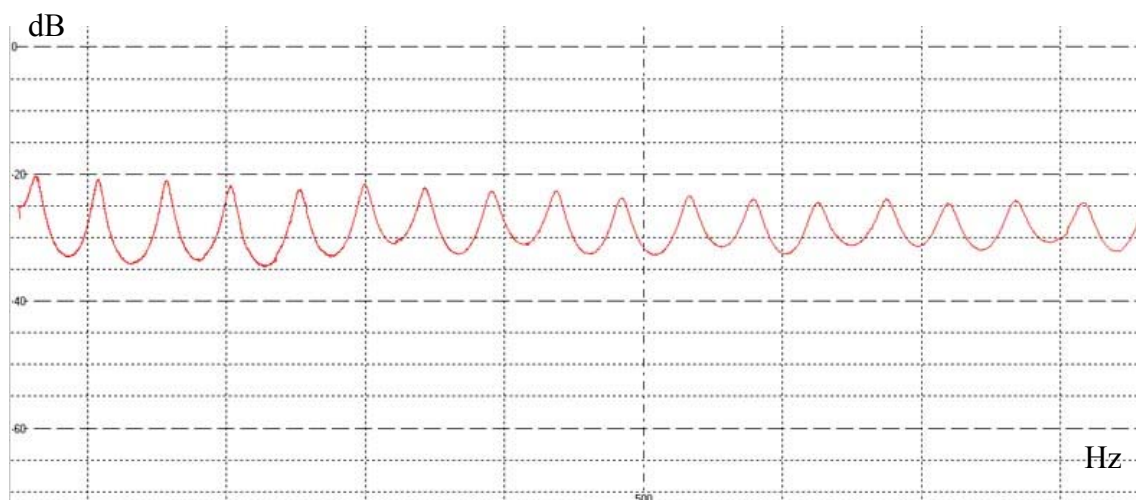
Die Maxima und Minima sind deutlicher ausgebildet, da im vergleichbaren Resonanzverlauf der Eingangsimpedanz im Bereich bis 850 Hz noch keine „Cut off Frequenz“ entsteht.

### ***Übertragungsfunktion $F$ Horn mit Stopfdämpfer***



**Abbildung 75 :** Übertragungsfunktion,  $F$  Horn mit Stopfdämpfer, Ventilstellung 0

### ***Übertragungsfunktion $F$ Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher***



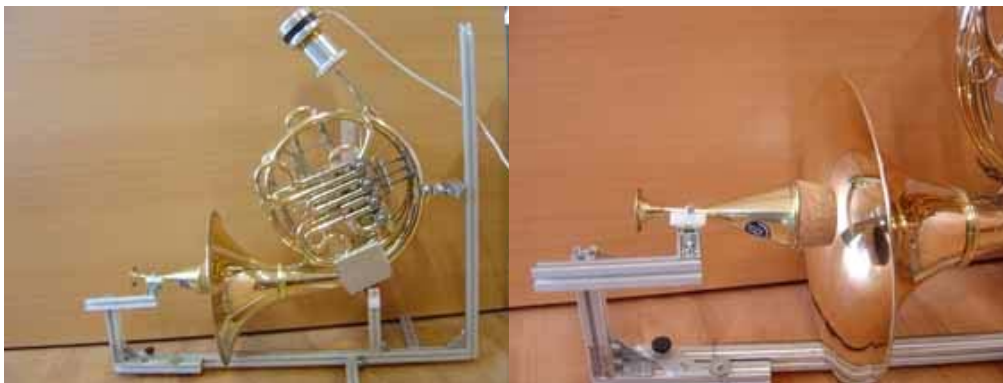
**Abbildung 76 :** Übertragungsfunktion,  $F$  Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher , Ventilstellung 0

Die Übertragungsfunktion des gestopften Hornes ohne Schallbecher zeigt im Gegensatz zum offenen Horn einen relativ konstante Verlauf der Resonanzen über die Frequenzachse.

## 5 Analyse der Messergebnisse

Im Kapitel 4 wurden statische Messungen des offenen und gestopften Hornes beschrieben. Um den Bereich direkt vor dem Effekt des Stopfens zu analysieren, wurde eine dynamische Messreihe gestartet. Wenn die rechte Hand kontinuierlich immer weiter in den Schallbecher geführt wird, verändert sich stetig die Intonation und die Klangfarbe des gespielten Tones.

Es soll nun untersucht werden, was die Hand im Schalltrichter bewirkt und in welcher Weise sich der Ton vom offenen zum gestopften Horn verändert. Aus praktischen Gründen erfolgt die Messung am gestopften Horn, das allmählich geöffnet wird. Anstelle der Hand wird der Stopfdämpfer verwendet. Hierzu verschließt der Stopfdämpfer zunächst den Schallbecher und wird im Laufe der Messungen mit Hilfe einer horizontalen Konstruktion schrittweise aus dem Horn geführt.



**Abbildung 77** : Messaufbau Horn gestopft bis offen

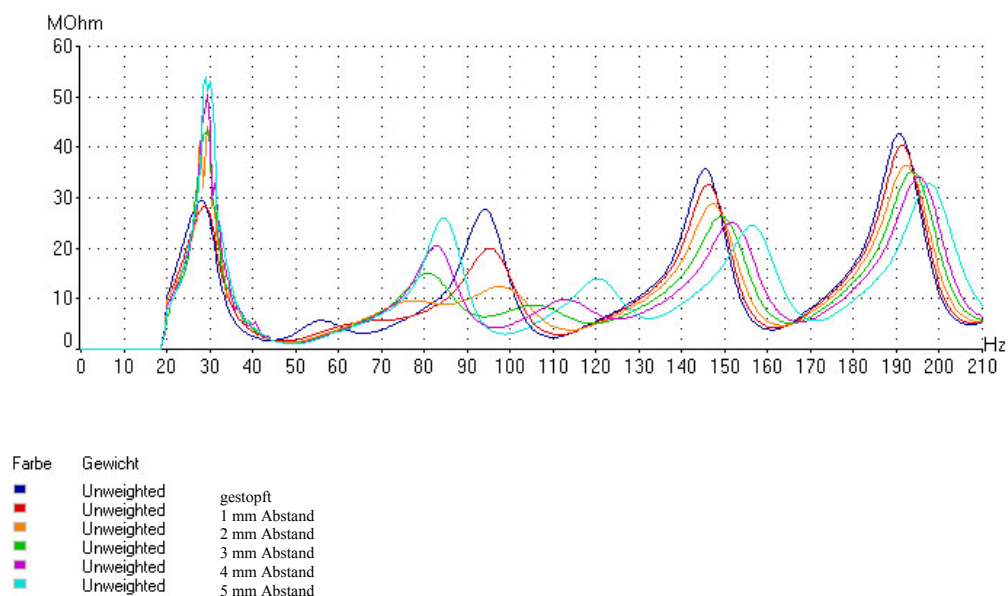
### 5.1 Eingangsimpedanz

Der Stopfdämpfer wird in Millimeterschritten aus dem Schallloch geführt und jeweils eine Impedanzkurve gemessen. Das Ergebnis ist ein Frequenzbild, in dem man sieht, wie sich die Resonanzmaxima vom gestopften bis zum 5 mm weit geöffneten Horn verschieben (Abbildung 78). Die blaue Messkurve stellt die Eingangsimpedanz des Hornes mit Stopfdämpfer dar.



Während bei 2 mm Abstand noch die dritte Resonanzfrequenz über die zweite Resonanzfrequenz dominiert, ist es bei 3 mm Abstand umgekehrt. Bei einem Abstand des Stopfdämpfers von 2 mm vom Schallloch (orange Messkurve) verhält sich das Instrument als „gestopft Horn“. Bei einem Abstand von 3 mm (grüne Messkurve) kann das Horn als „offen“ gelten. Zwischen 2 und 3 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Schallloch kippen die Resonanzfrequenzen in den gestopften Bereich. Der Musiker regt das Horn normalerweise an der Impedanzspitze (= Resonanzfrequenz) an. Wenn die Amplitude einer Resonanz stark sinkt, die benachbarte Resonanz sich hingegen stark erhöht, kann ab einer bestimmten Lippenspannung die Resonanz der kleinen Resonanzamplitude nicht mehr angeregt werden und springt auf die benachbarte Resonanz.

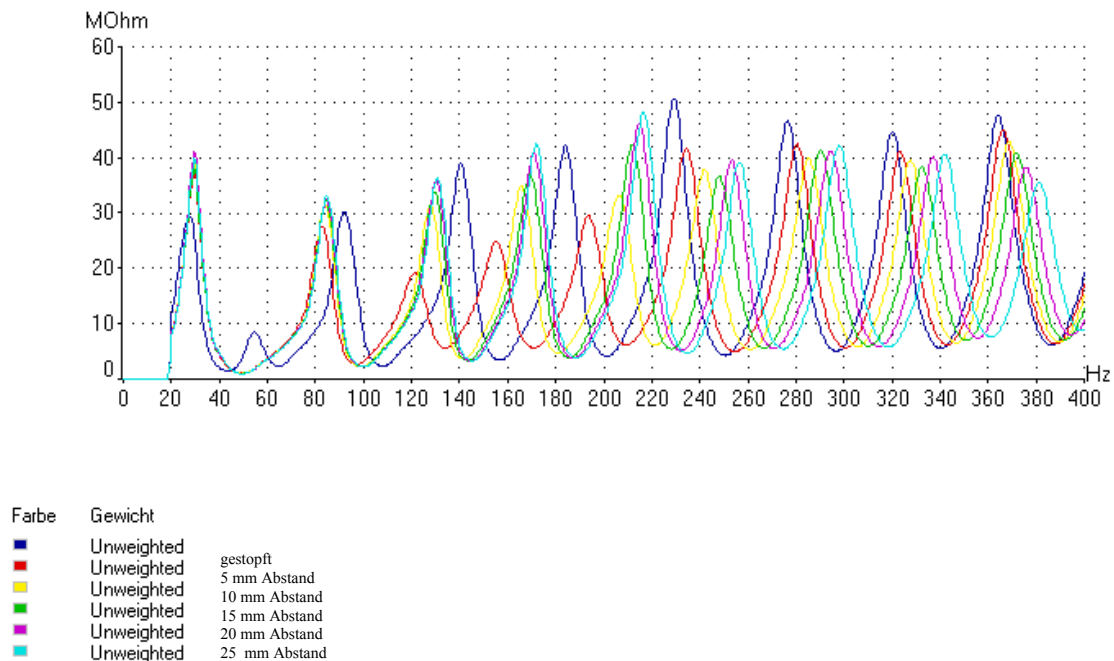
Das zweite Resonanzmaximum des gestopften Hornes liegt bei 56 Hz (blaue Messkurve) und wird durch das schrittweise Hinausführen des Stopfdämpfers vom Schallloch bis zu einem Abstand von 5 mm auf 84 Hz (türkise Messkurve) stetig verschoben. Die dazugehörige Amplitude erhöht sich zudem von 5 MOhm (blaue Messkurve) auf 26 MOhm (türkise Messkurve).



**Abbildung 78 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, von gestopft bis 5 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Ausgang des Schallbechers, gestopft (blau), Abstand 1 mm (rot), Abstand 2 mm (orange), Abstand 3 mm (grün), Abstand 4 mm (violett), Abstand 5 mm (türkis)

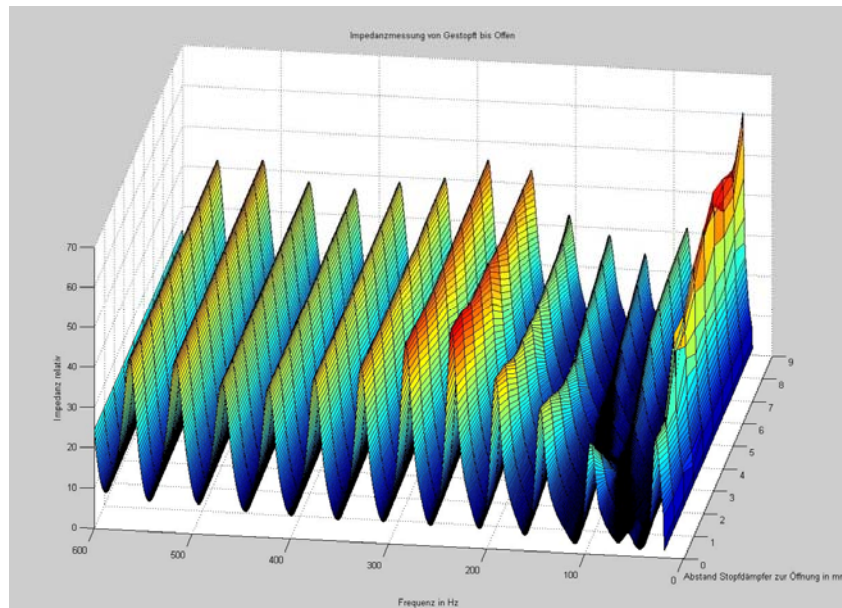
Die Abbildung 79 zeigt ein Frequenzbild, bei dem der Stopfdämpfer in 5 mm Schritten bis 25 mm aus dem Schallloch geführt wird. Je weiter der Stopfdämpfer von der

Schallbecheröffnung entfernt ist, desto weiter rechts liegen die Resonanzmaxima auf der Frequenzachse.

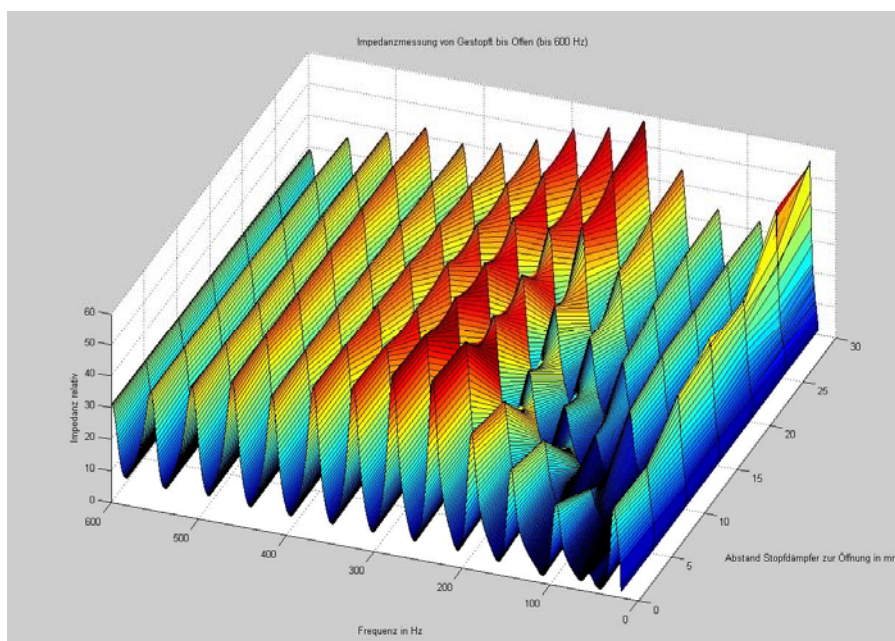


**Abbildung 79 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, von gestopft bis 25 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Ausgang des Schallbechers, blau gestopft, Abstand 5 mm (rot), Abstand 10 mm (orange), Abstand 15 mm (grün), Abstand 20 mm (violett), Abstand 25 mm (türkis)

Für eine 3D – Darstellung der dynamischen Messung wird das Messergebnis in Abbildung 80 (Stopfen bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers zum Schallloch) und Abbildung 81 (Stopfen bis 30 mm Abstand des Stopfdämpfers zum Schallloch) mittels Matlab graphisch dargestellt. Dies ermöglicht eine erweiterte Darstellung, indem die Messergebnisse statt bis zu einem Abstand von 5 mm (25 mm) bis zu einem Abstand von 9 mm (30 mm) abgebildet werden.



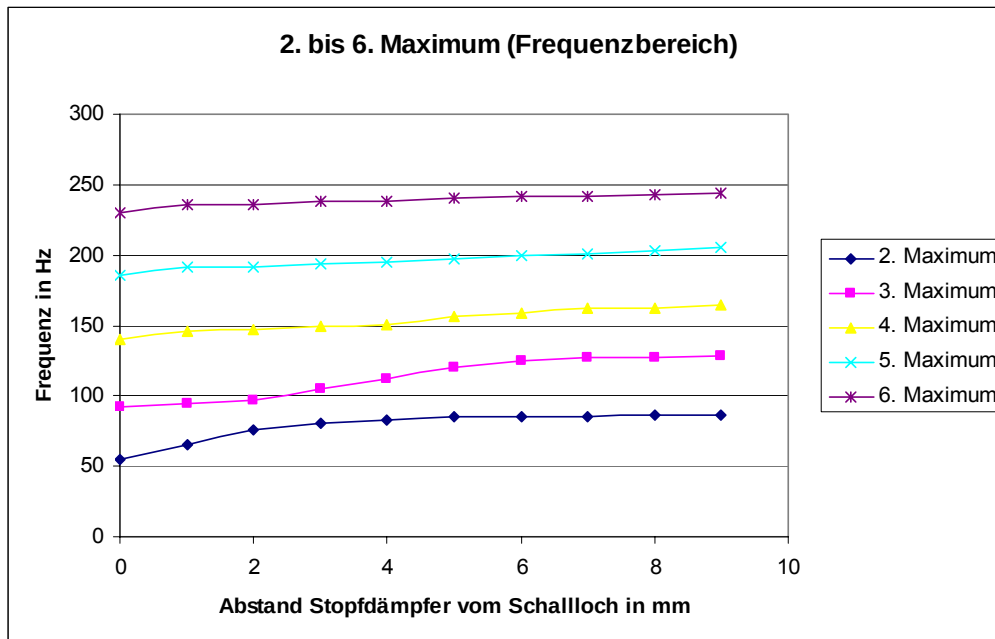
**Abbildung 80 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, 3 D Ansicht von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers zur Schallbecheröffnung



**Abbildung 81 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, 3 D Ansicht von gestopft bis 30 mm Abstand des Stopfdämpfers zur Schallbecheröffnung

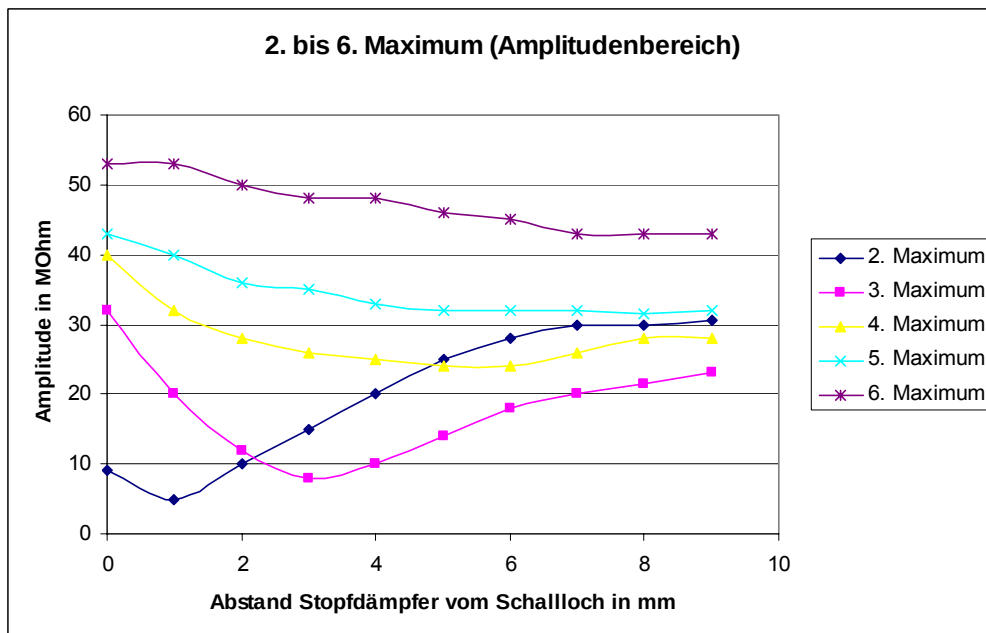
In Abbildung 82 und 83 wird das Messergebnis bis zu einem Abstand von 9 mm in Frequenzbereich und Amplitudenbereich getrennt dargestellt. Im Frequenzbereich ist ersichtlich, dass sich vom zweiten bis sechsten Maximum bei zunehmendem Abstand des Stopfdämpfers vom Horn die Frequenzen erhöhen.





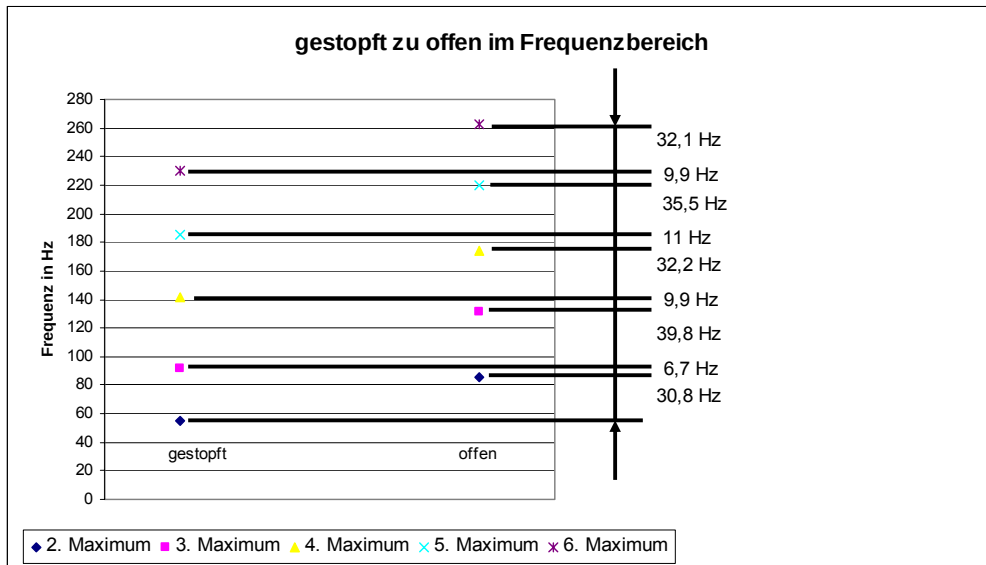
**Abbildung 82 :** Resonanzmaxima (Frequenzbereich) von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Schallloch

Im Amplitudenbereich (Abbildung 83) fällt insbesondere auf, dass sich die Amplitudenverläufe des zweiten und dritten Maximums bei einem Abstand zwischen 2 und 3 mm des Stopfdämpfers vom Horn überschneiden. In diesem Punkt wechselt das Horn von gestopft zu offen.



**Abbildung 83 :** Resonanzmaxima (Amplitudenbereich) von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Schallloch

In Abbildung 84 sind die Resonanzmaxima des gestopften und offenen Hornes im Frequenzbereich gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die Resonanzmaxima beim gestopften Horn jeweils niedriger liegen als beim offenen Horn. So liegt beispielsweise das zweite Resonanzmaximum im gestopften Betrieb bei 56 Hz, im offenen bei 84 Hz. Der Abstand zwischen gestopft und offen beträgt 30,8 Hz.



**Abbildung 84 :** Resonanzmaxima des offenen und gestopften Hornes

In der Tabelle 85 sind für das offene und gestopfte Horn die im Spielbetrieb hauptsächlich verwendeten Resonanzen (zweites bis 15. Maximum) gegenüber gestellt. Zwischen dem zweiten offenen und dem zweiten gestopften Maximum liegen 30.8 Hz (Tabelle 85 oben), hingegen zwischen dem zweiten offenen und dem dritten gestopften Maximum nur 6.7 Hz (Tabelle 85 unten). Die kleinsten Abstände zwischen offenen und gestopften Maxima sind rot markiert. Bei diesen zugehörigen Maxima ist die Wahrscheinlichkeit am größten, dass das jeweilige Maximum<sup>100</sup> beim Übergang vom offenen zum gestopften Spielbetrieb wechselt.

Außer beim 13. und 15. Maximum liegen alle Resonanzfrequenzen  $n$  des gestopften zum offenen Horn bei  $n+1$ . Über dem 15. Maximum ( $h_2$  transponiert in  $F$ ) wird in der Hornliteratur das Stopfen kaum angewendet.

<sup>100</sup> Schwingungsmode bzw. Teilton

***Resonanzmaxima des offenen und gestopften Hornes***

| offen   | Frequenz | gestopft | Frequenz | delta<br>Frequenz |
|---------|----------|----------|----------|-------------------|
| n       | Hz       | n        | Hz       | Hz                |
| 2. max  | 85,3     | 2. max   | 54,5     | 30,8              |
| 3. max  | 131,8    | 3. max   | 92       | 39,8              |
| 4. max  | 173,9    | 4. max   | 141,7    | 32,2              |
| 5. max  | 220,4    | 5. max   | 184,9    | 35,5              |
| 6. max  | 262,4    | 6. max   | 230,3    | 32,1              |
| 7. max  | 305,6    | 7. max   | 277,9    | 27,7              |
| 8. max  | 352,1    | 8. max   | 321,1    | 31                |
| 9. max  | 397,5    | 9. max   | 365,4    | 32,1              |
| 10. max | 437,4    | 10. max  | 415,2    | 22,2              |
| 11. max | 482,8    | 11. max  | 459,5    | 23,3              |
| 12. max | 526      | 12. max  | 500,5    | 25,5              |
| 13. max | 572,5    | 13. max  | 549,2    | 23,3              |
| 14. max | 621,8    | 14. max  | 596,8    | 25                |
| 15. max | 661,8    | 15. max  | 639,6    | 22,2              |

| offen   | Frequenz | gestopft | Frequenz | delta<br>Frequenz |
|---------|----------|----------|----------|-------------------|
| n       | Hz       | n+1      | Hz       | Hz                |
| 2. max  | 85,3     | 3. max   | 92       | 6,7               |
| 3. max  | 131,8    | 4. max   | 141,7    | 9,9               |
| 4. max  | 173,9    | 5. max   | 184,9    | 11                |
| 5. max  | 220,4    | 6. max   | 230,3    | 9,9               |
| 6. max  | 262,4    | 7. max   | 277,9    | 15,5              |
| 7. max  | 305,6    | 8. max   | 321,1    | 15,5              |
| 8. max  | 352,1    | 9. max   | 365,4    | 13,3              |
| 9. max  | 397,5    | 10. max  | 415,2    | 17,7              |
| 10. max | 437,4    | 11. max  | 459,5    | 22,1              |
| 11. max | 482,8    | 12. max  | 500,5    | 17,7              |
| 12. max | 526      | 13. max  | 549,2    | 23,2              |
| 13. max | 572,5    | 14. max  | 596,8    | 24,3              |
| 14. max | 621,8    | 15. max  | 639,6    | 17,8              |
| 15. max | 661,8    | 16. max  | 689,9    | 28,1              |

**Tabelle 85 :** Vergleich Resonanzmaxima, oben: n offen zu n gestopft, unten: n offen zu n+1 gestopft

In Abbildung 86 ist die Spielfrequenz<sup>101</sup> des Hornes ersichtlich. Der offen gespielte Ton wechselt beim Stopfen auf die nächstliegende Resonanzfrequenz, die meistens (außer 13. und 15. Maximum) die nächst höhere Resonanzfrequenz ist.

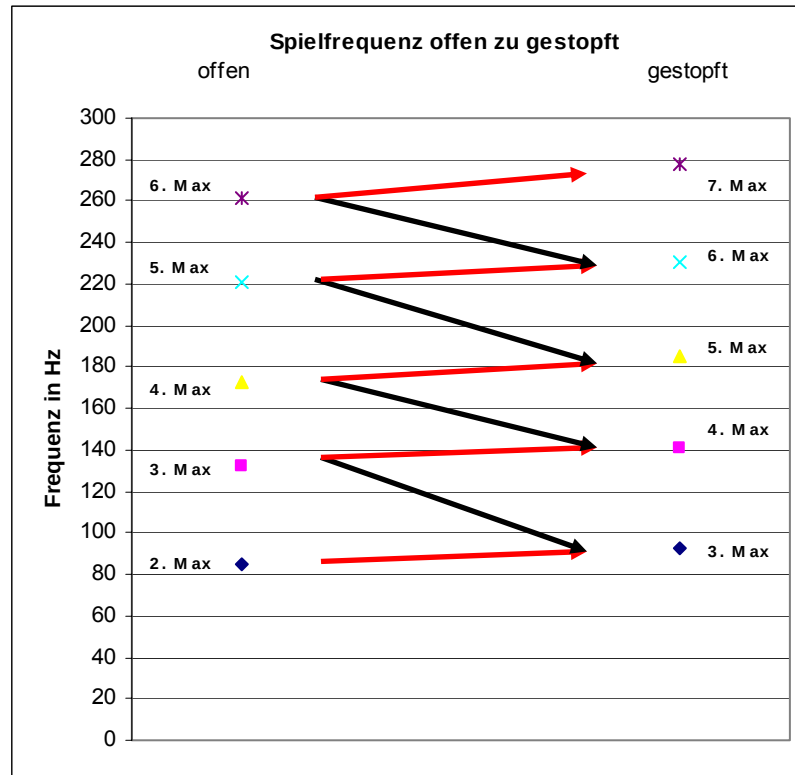


Abbildung 86 : Spielfrequenz des gestopften bis offenen Hornes

<sup>101</sup> Grundfrequenz.

## 6 Simulation eines Hornes

Um die physikalischen Vorgänge im Instrument zu beschreiben, soll neben der Eingangsimpedanz und Übertragungsfunktion auch der Druckverlauf im Rohr und die Ausgangsimpedanz betrachtet werden. Die Berechnung des Druckverlaufs und der Ausgangsimpedanz ist messtechnisch sehr aufwändig, daher wird der Mensurverlauf des Hornes mit dem Softwareprogramm „Optimierer“<sup>102</sup> simuliert. Um gültige Ergebnisse berechnen zu können, muss die berechnete Eingangsimpedanz mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus an die gemessene Eingangsimpedanz angeglichen werden, da der gemessene Mensurverlauf des Hornes Messfehler beinhaltet.

### 6.1 Optimierung der Eingangsimpedanz

Der Optimierer ist eine Software, die von Wilfried Kausel<sup>103</sup> speziell für Blechblasinstrumentenmacher entwickelt wurde. Das Programm kann die Impedanz und den Druckverlauf aus der Mensurliste des Instruments berechnen. Ein Regler optimiert durch Änderung der Mensurdaten Intonation und Ansprache des Instruments. Das dahinterliegende physikalische Modell besteht aus Matrizengleichungen, die das Instrument beschreiben (Kapitel 3.2.4) und einem Transmission – Line – Modell, das von Dan Mapes – Riordan<sup>104</sup> entwickelt wurde. Das Modell berücksichtigt Viskosität, Reibungsverluste sowie die Abstrahlungsverluste des Schallbechers. Der Optimierungsalgorithmus wird auch Rosenbrock – Algorithmus<sup>105</sup> genannt

---

<sup>102</sup> Kausel, Wilfried: *A Musical Acoustician's Guide to Computational Physics*, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, Seite 232 ff, Wien 2003.

<sup>103</sup> Wilfried Kausel, Professor am Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

<sup>104</sup> Mapes-Riordan, Dan: *Horn Modeling with Conical and Cylindrical Transmission – Line Elements*, in: *Audio Eng. Soc.* Vol 41, No 6, Seite 471 – 481, Juni 1993.

<sup>105</sup> Optimierer: *Handbuch Optimierer*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2002.

### Rosenbrock Algorithmus

Nach der Eingabe der Messurdaten des Hornes berechnet der „Optimierer“ die Eingangsimpedanz. Da beim Abmessen des Instruments Messfehler nicht auszuschließen sind, wird die berechnete Eingangsimpedanz mit der gemessenen BIAS Eingangsimpedanz verglichen. Der Mensurverlauf wurde mittels Schnur für die Messung der Längsachse und mittels Messschieber zur Messung des Durchmessers ermittelt. Durch die gebogenen Rohre und dem stetig veränderten Durchmesser mussten Messfehler in Kauf genommen werden. Der Optimierungsalgorithmus (Abbildung 87) gleicht die gemessene Mensur durch Verändern der Messurdaten an die mit BIAS gemessene Eingangsimpedanz an.

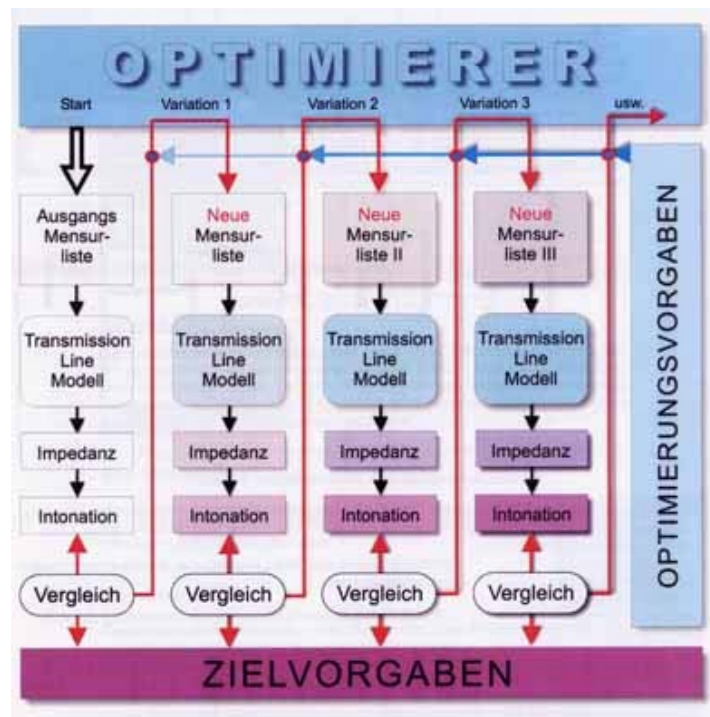


Abbildung 87 : Optimierungsvorgang des Rosenbrock Algorithmus<sup>106</sup>

<sup>106</sup> Optimierer: *Handbuch Optimierer*, Seite 5, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2002.

### 6.1.1 Horn ohne Hand

Für die Simulation des Hornes wurde die rechte Hand vernachlässigt, da die Handhaltung im Schalltrichter schwer zu simulieren ist. In Abbildung 88 ist der Mensurverlauf des F Hornes ohne rechte Hand abgebildet.

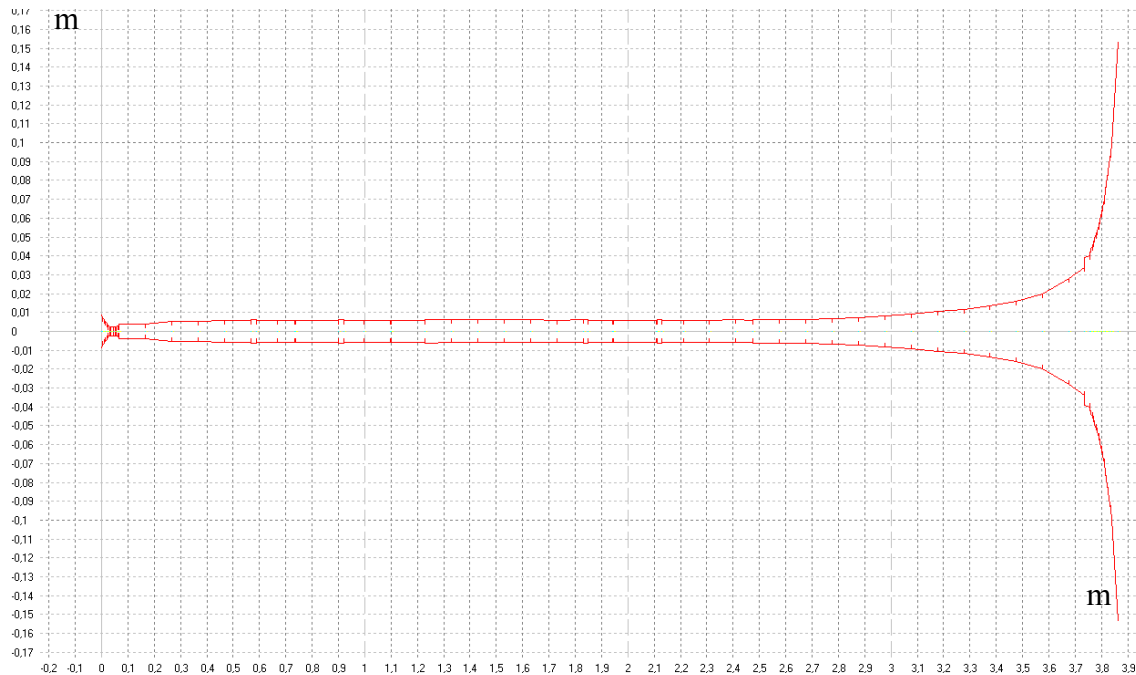


Abbildung 88 : Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0

### Optimierungsergebnis

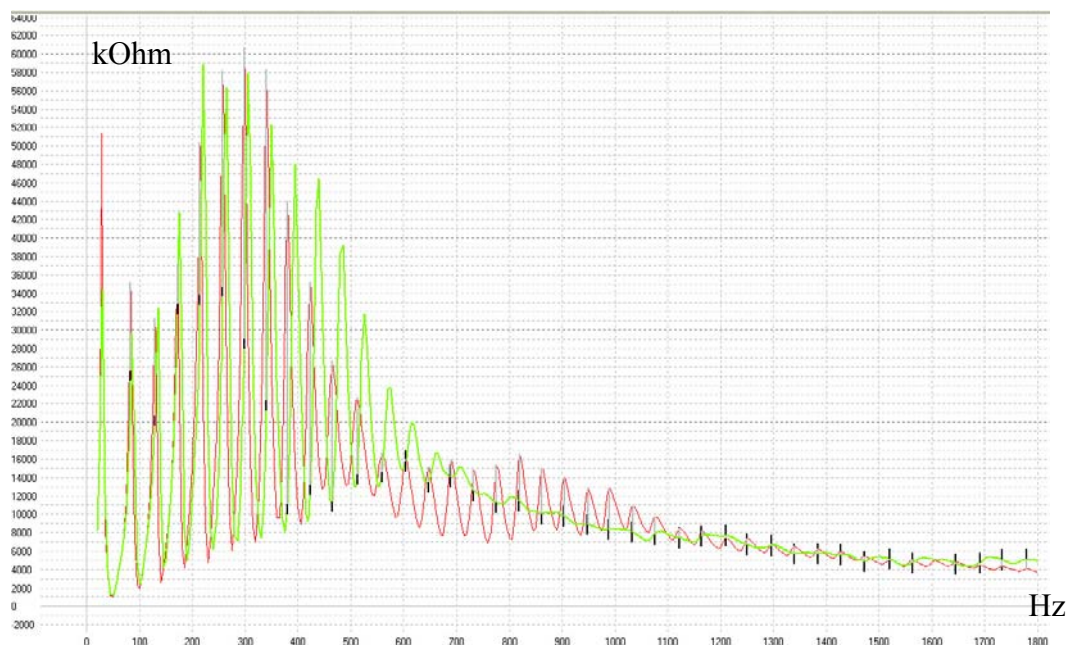
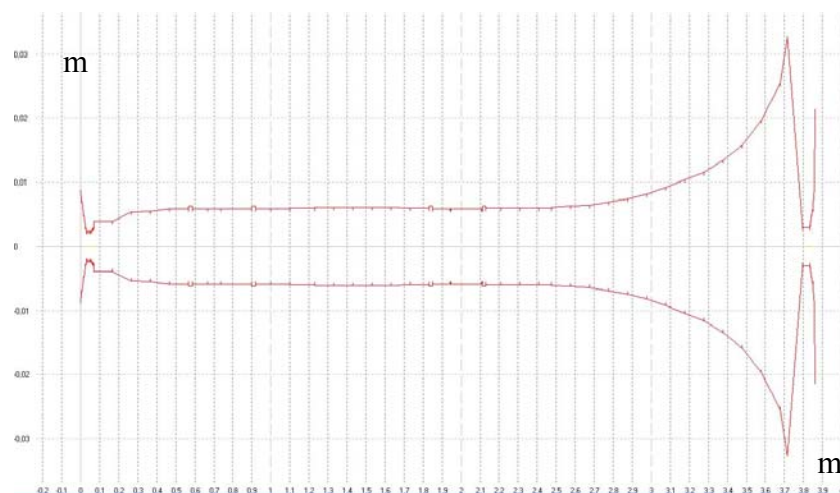


Abbildung 89 : Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne rechte Hand, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün)

Bis 500 Hz konnte der berechnete Impedanzverlauf (Abbildung 89) an den gemessenen Impedanzverlauf angeglichen werden. Bei über 700 Hz waren die gemessenen Resonanzspitzen des Hornes zu gering ausgebildet, da die Messung des Hornes ohne rechte Hand durchgeführt wurde. Im Impedanzverlauf mit rechter Hand sind die Resonanzfrequenzen deutlicher ausgebildet (siehe Kapitel 4.2.1). Die berechneten Resonanzfrequenzen sind im Vergleich zum gemessenen Impedanzverlauf jeweils tiefer ausgebildet. Dies kann durch Temperaturunterschiede oder unterschiedliche Länge von gemessener Mensur und berechneter Mensur entstehen. Bei dieser Messung ist die unterschiedliche Position des Stimmzuges ausschlaggebend, da am Tag der Abmessung des Instruments nicht die Eingangsimpedanz gemessen wurde. Der Impedanzverlauf wurde für die weitere Berechnung des Druckverlaufs berechnet und der gemessenen Impedanz angeglichen. Das Horn mit dem berechneten Impedanzverlauf ist tiefer gestimmt, für den Druckverlauf ist dies aber nicht relevant.

### 6.1.2 Horn mit Stopfdämpfer

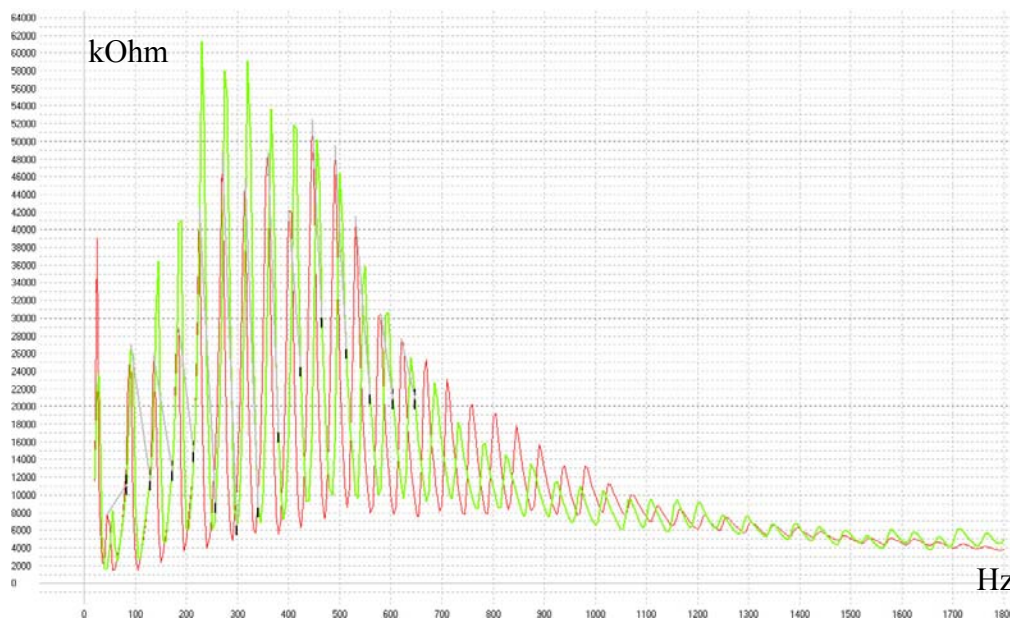
Die Messergebnisse mit BIAS haben gezeigt, dass zwischen dem Horn mit Stopfdämpfer und dem Horn mit Stopfdämpfer ohne Schalltrichter keine merklichen Unterschiede vorhanden sind. Für die Simulation wurde daher das Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher herangezogen, siehe Kapitel 4.2.3.



**Abbildung 90** : Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher



### Optimierungsergebnis

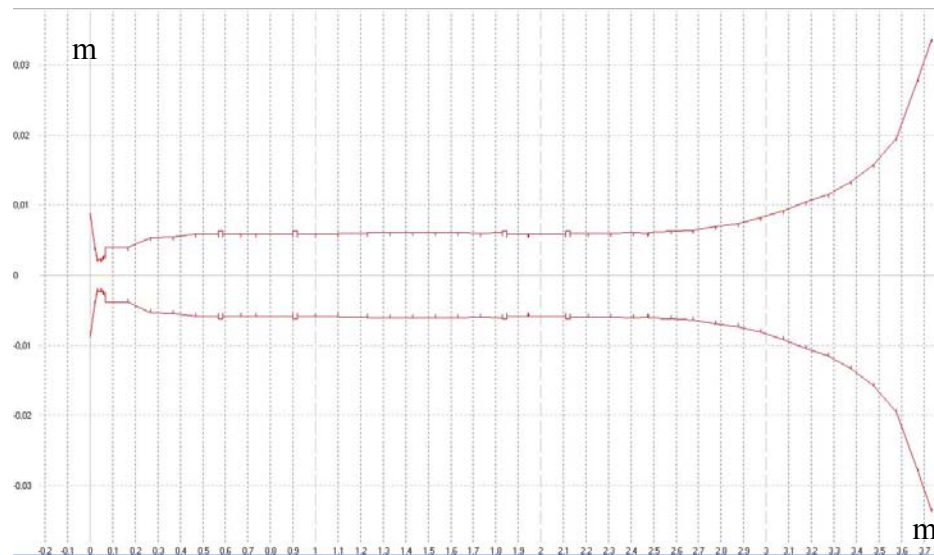


**Abbildung 91 :** Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün)

Wie auch beim Horn offen ist das Horn mit Stopfdämpfer zu tief gestimmt, da durch den Stimmzug das abgemessene Horn länger ist als das mit BIAS gemessene Horn. Daher ist die Länge des optimierten Instruments, wie in Abbildung 91 zu sehen ist, im Vergleich zum realen Instrument länger. Die Resonanzspitzen sind beim berechneten Horn stärker ausgebildet, was einem besseren Ansprechverhalten entspricht.

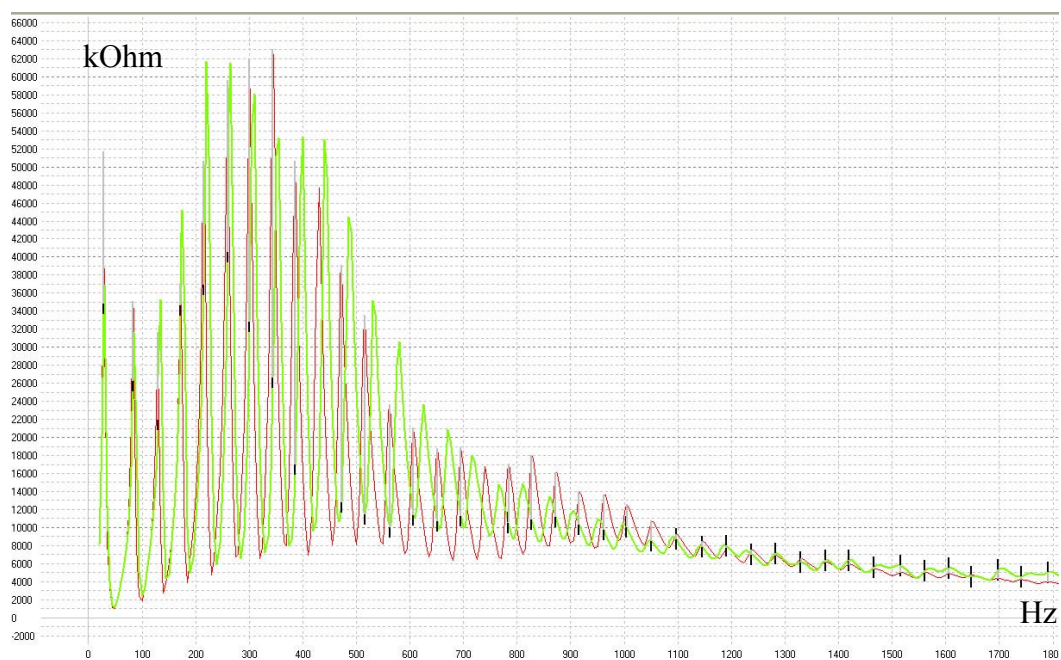
#### 6.1.3 Horn ohne Schallbecher

Für die Berechnung des Druckverlaufs ist die Simulation des Hornes ohne Schallbecher von Interesse, da der Stopfdämpfer den Schallbecher, wie bereits ausgeführt, ersetzt. Die Optimierung erfolgt daher auch am Instrument ohne Schallbecher.



**Abbildung 92 :** Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher

### Optimierungsergebnis



**Abbildung 93 :** Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün)

Wie auch in den beiden letzten Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2 ist das abgemessene Horn ohne Schallbecher im Vergleich zum gemessenen Horn länger. Die Abbildung 93 zeigt, dass die Annäherung der berechneten Impedanz zur gemessenen mit Ausnahme des Bereichs von 600 bis 1000 Hz sehr nahe an das gemessene Horn angeglichen werden kann.

## 6.2 Berechnung des Druckverlaufs im Instrument

Eine Messung des Druckverlaufs im Horn ist sehr aufwändig und wurde im Jahr 1969 von Willi Aebi<sup>107</sup> durchgeführt. Er nahm ein ausgerolltes Inventionshorn in F und maß mit

Hilfe eines Sondenrohrs den Schalldruck an verschiedenen Punkten im Instrument. Um die Herstellung eines ausgerollten Hornes zu umgehen, wurde der Druckverlauf mittels Software Optimierer berechnet.

Zu diesem Zweck wird das simulierte Instrument zunächst in Millimeterscheiben zerlegt. Sodann wird die Übertragungsfunktion jeder einzelnen Scheibe berechnet. Der Druck am Mundstück wird auf eins normiert und in ein Verhältnis zu den anderen Scheiben des Mensurverlaufs gesetzt.

### 6.2.1 Horn ohne Hand

Am Mundstück (Abbildung 94) besitzen alle Teiltöne ein Druckmaximum (Druckbauch), da durch die Lippen des Bläasers das Rohr geschlossen ist. Dies entspricht einer gedeckten Pfeife. Zugleich ist am Ende des Schalltrichters ein Druckminimum (Druckknoten), da bei einer offenen Pfeife der Druck minimal ist.

Der Schalltrichter hat die Aufgabe möglichst viel Energie zu reflektieren, daher fällt der Druck am Ende des Instruments nicht auf Null (Fehlanpassung!). Da das Horn neben zylindrischen Rohrelementen auch konisch geformt ist, ist die Wellenlänge entlang des Rohres nicht konstant. Die lineare Beziehung zwischen Wellenlänge und der Resonanzfrequenz ( $f \neq \frac{c}{\lambda}$ ) hat keine Gültigkeit mehr.

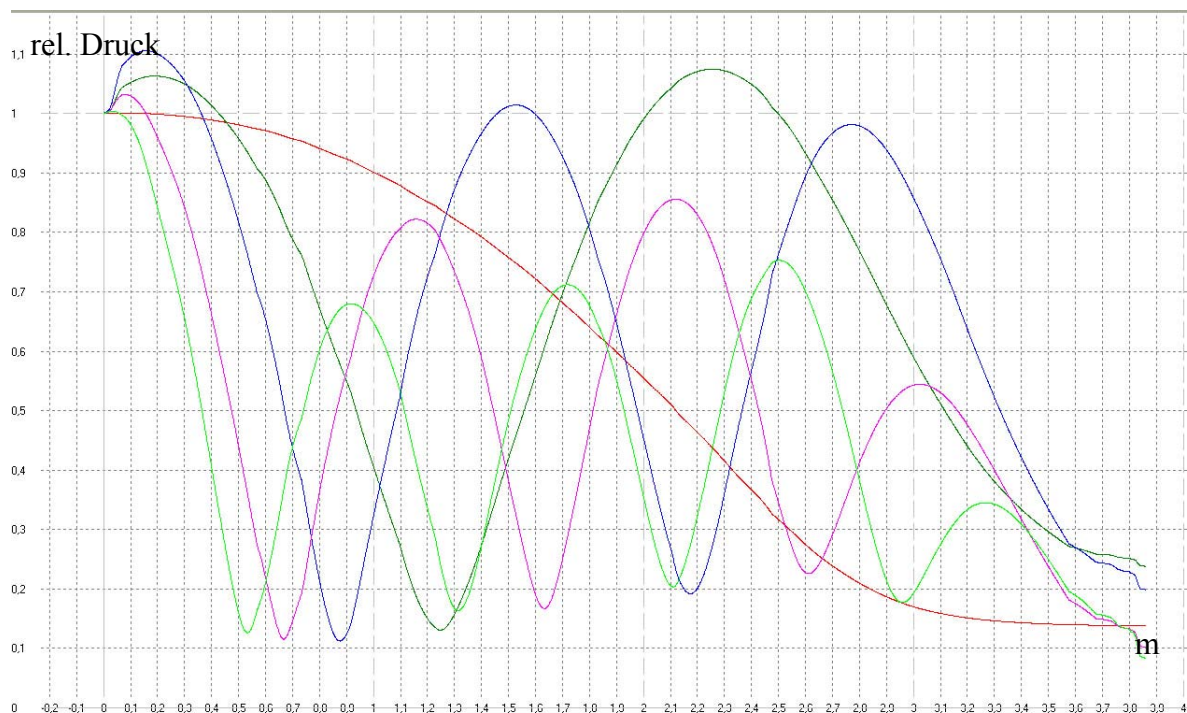
$f$  ... Frequenz,  $c$  ... Schallgeschwindigkeit,  $\lambda$  ... Wellenlänge

Eine Rückrechnung auf die Resonanzfrequenz ist daher nicht möglich.

---

<sup>107</sup> Aebi, Willi: *Das Waldhorn und seine innere Akustik*, in: Schweizer Bauzeitung, 87. Jahrgang, Heft 38, Seite 1 - 9, 18.9.1969.

In Abbildung 94 Abbildung 93 ist der Druckverlauf eines Hornes ohne Hand dargestellt. Am linken Rand beginnt das Instrument mit dem Mundstück und endet rechts mit dem Schallbecher. Mit der roten Kurve ist der erste Teilton (Grundton) dargestellt. Der nächste Teilton (zweiter Teilton – dunkelgrün) besitzt die doppelte Frequenz zum Grundton. Das Frequenzverhältnis der Teiltöne dieser gedeckten Pfeife ist durch die Konuselemente ganzzahlig (Kapitel 3.3).

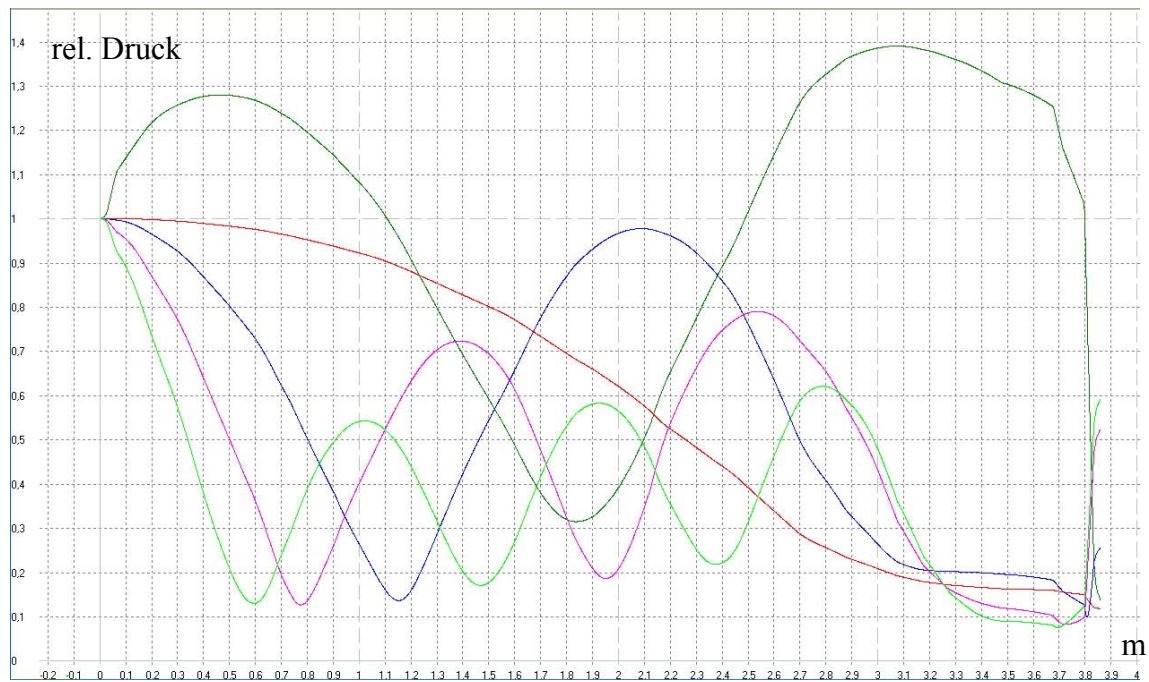


**Abbildung 94 :** Druckverlauf Horn ohne Hand, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta), 5. Teilton (hellgrün)

## 6.2.2 Horn mit Stopfdämpfer

Wie auch beim Horn ohne Hand ist das Frequenzverhältnis der Teiltöne beim Horn mit Stopfdämpfer ganzzahlig. Die ersten zwei Teiltöne des Druckverlaufs vom Horn mit Stopfdämpfer besitzen am Ende des Instruments einen Druckknoten. Alle anderen Teiltöne erreichen plötzlich ein Druckmaximum. Durch die Verengung des gestopften Hornes entsteht am Ende des Instruments eine hohe Ausgangsimpedanz (Abbildung 101). Dies hat die Wirkung, dass an dieser Stelle der Druck im Vergleich zum offenen Horn steigt.

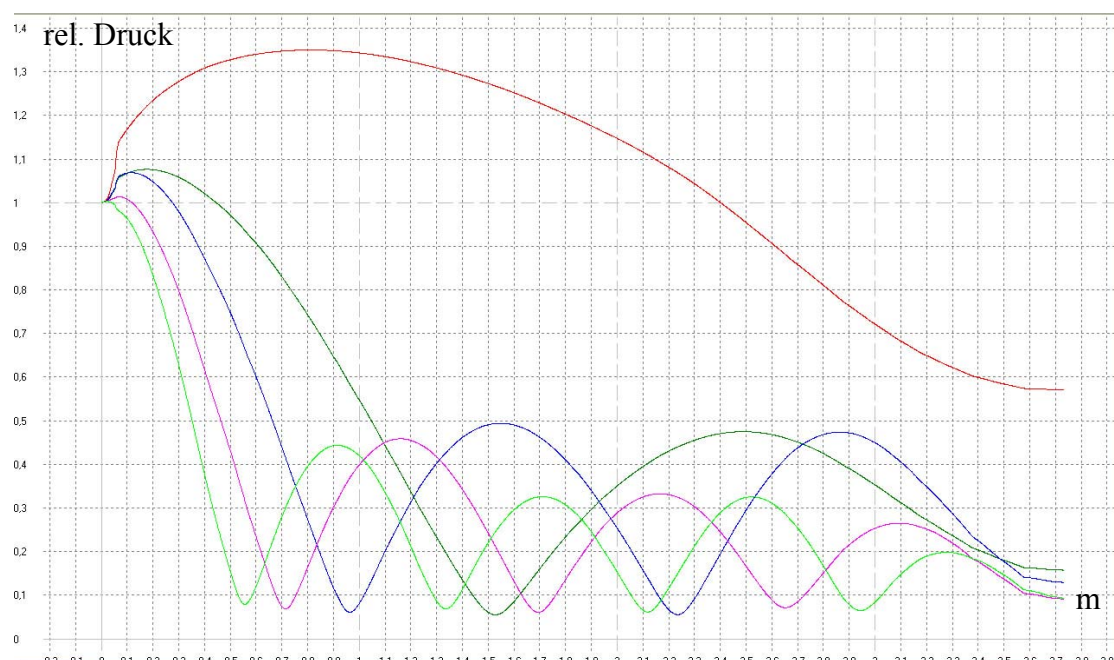




**Abbildung 95 :** Druckverlauf Horn mit Stopfdämpfer, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta), 5. Teilton (hellgrün)

### 6.2.3 Horn ohne Schallbecher

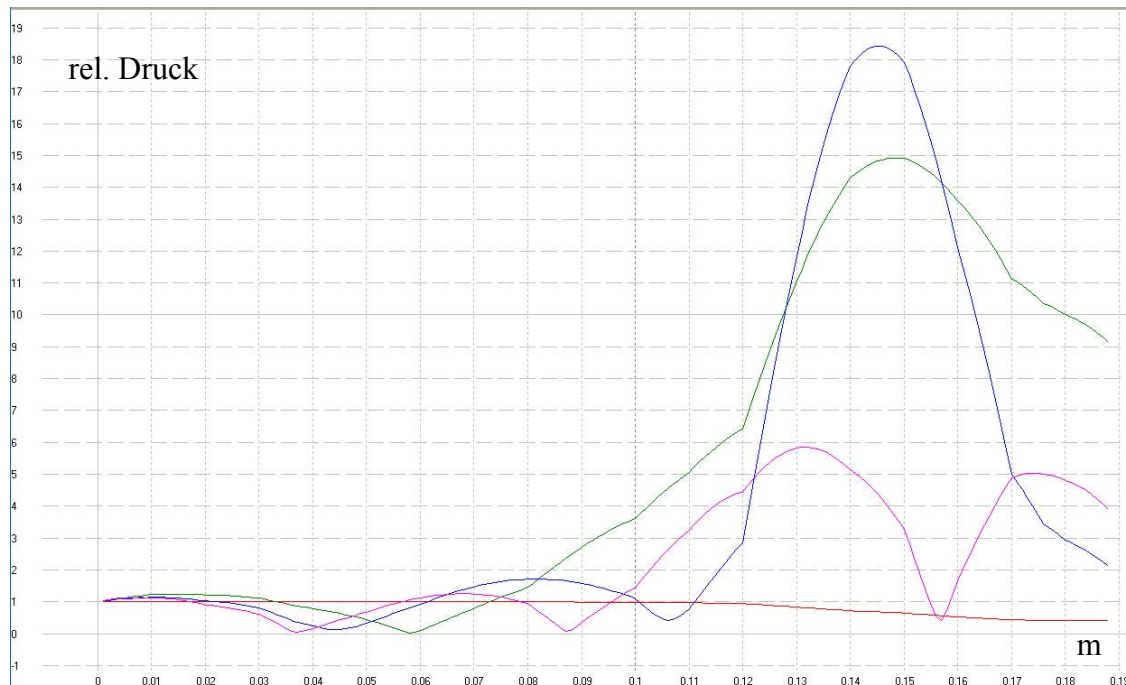
Der erste Teilton des Hornes ohne Schallbecher wird im Gegensatz zu den weiteren Teiltönen stark in das Horn reflektiert. Alle weiteren Teiltöne strahlen die meiste Energie vom Schallbecher ab.



**Abbildung 96 :** Druckverlauf Horn ohne Schallbecher, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta), 5. Teilton (hellgrün)

## 6.2.4 Stopfdämpfer

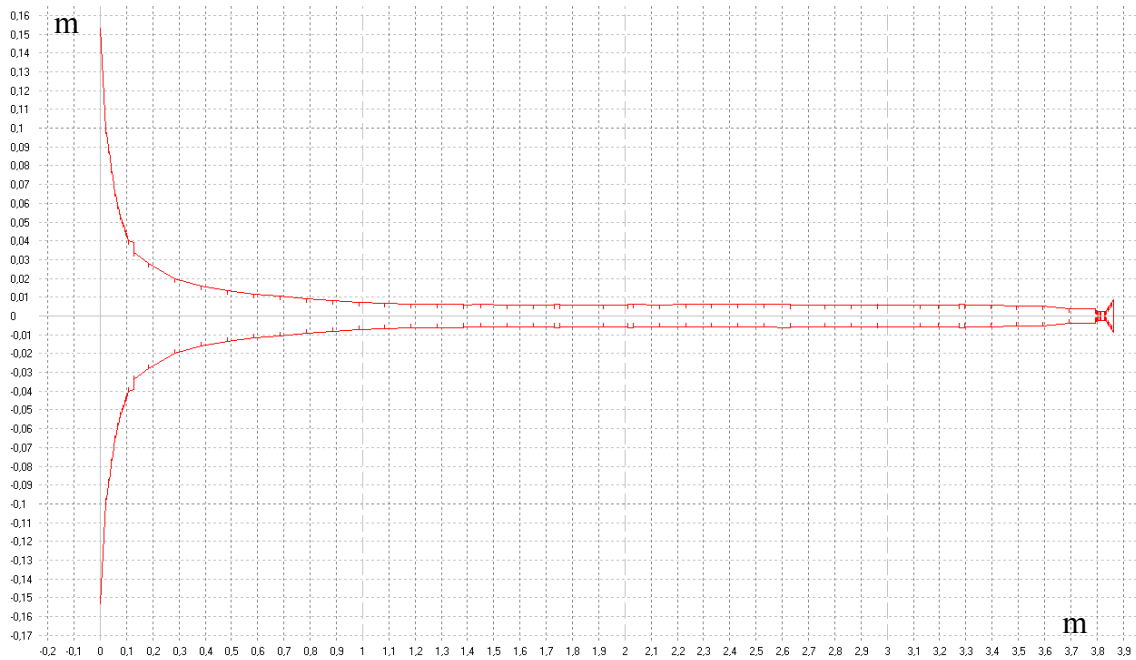
Der Druckverlauf im Stopfdämpfer ist wegen der stark konusförmigen Elemente verzerrt. Ab dem zweiten Teilton liegen die Druckknoten außerhalb des Stopfdämpfers.



**Abbildung 97 :** Druckverlauf Stopfdämpfer, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta)

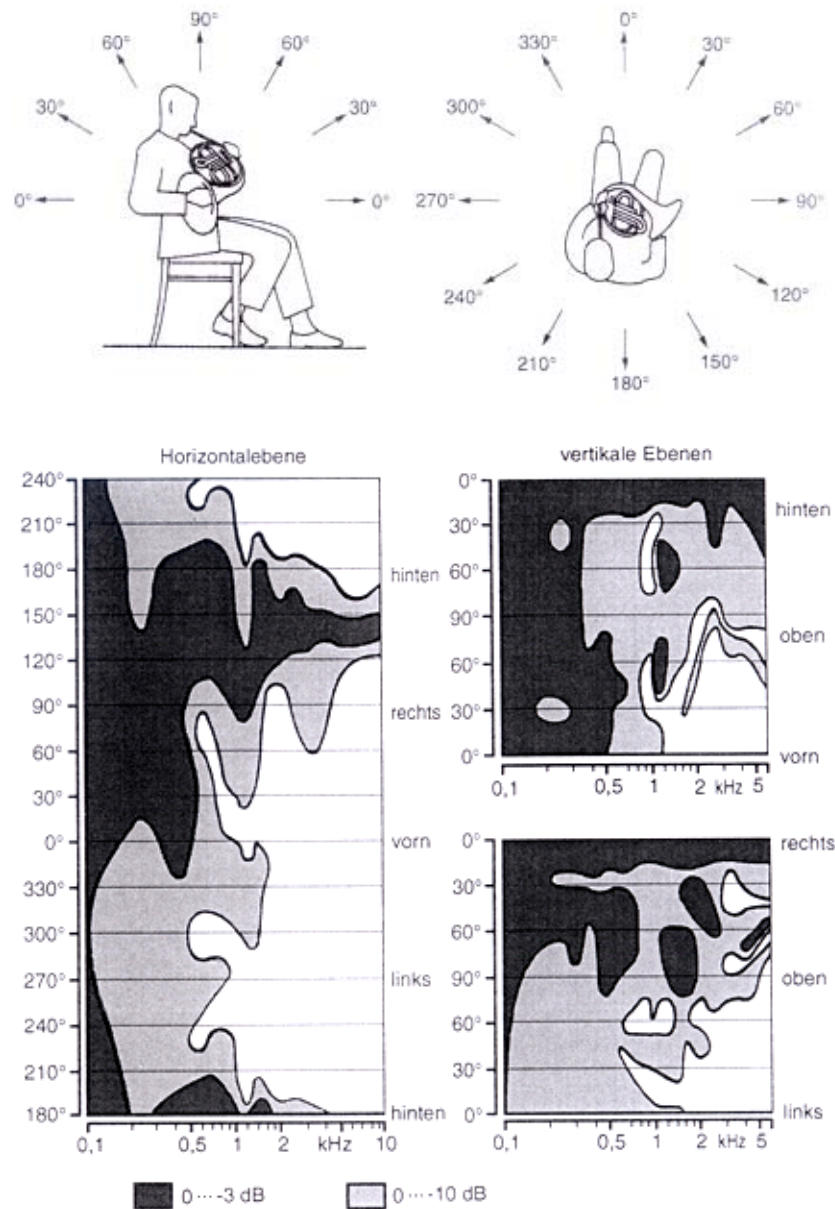
## 6.3 Berechnung der Ausgangsimpedanz

Die Ausgangsimpedanz wurde mittels des Optimierers aus den gemessenen Mensurdaten berechnet. Die Herstellung eines Messkopfs für den Ausgang des Instruments wäre für die Messung sehr aufwändig. Die Mensurliste für die Eingangsimpedanzmessung (Kapitel 6.1) wurde vom Instrumentenausgang beginnend bis nach vorne zum Mundstückrand in eine neue Mensurliste geschrieben. Das Instrument beginnt nun mit dem Schallbecherrand und endet am geschlossenen Mundstückrand (Abbildung 98). Die neu berechnete Impedanz entspricht dann der Ausgangsimpedanz des Instruments.



**Abbildung 98 :** Ausgangsimpedanzmessung F Horn und Mundstück

Das Horn hat wie jedes andere Instrument eine frequenzabhängige Abstrahlcharakteristik. Die Ausgangsimpedanz entspricht daher dem frequenzabhängigen Widerstand, der direkt an der Öffnung des Instruments vorherrscht. In Abbildung 99 ist die frequenzabhängige Abstrahlcharakteristik des Hornes mit Spieler abgebildet. Der Schallbecher strahlt die Energie des Instruments ab, breitet sich aber frequenzabhängig um das Instrument im Raum aus. Hier ist zu sehen, dass durch die rechte Hand in der Stürze das Schallfeld beeinflusst wird. Da das Instrument dicht am Körper des Spielers gehalten wird, spielt auch die Beugung des Schalls eine Rolle.



**Abbildung 99 :** Abstrahlcharakteristik Horn mit Spieler<sup>108</sup>

<sup>108</sup> Meyer, Jürgen: *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Seite 114 und 115, Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main 1972.



### 6.3.1 Horn ohne Hand

Die Ausgangsimpedanz des Hornes gleicht einer gespiegelten Exponentialfunktion. Bis ca. 700 Hz sinkt die Ausgangsimpedanz des Hornes zum Außendruck, danach bleibt die Ausgangsimpedanz relativ konstant. Ab 700 Hz wird der Großteil der Energie vom Schallbecher abgestrahlt. Der Spielbereich des Hornes in der üblichen Notenliteratur endet ungefähr bei 700 Hz für die Frequenz des Grundtones, was einem c3 transponiert in F entspricht.

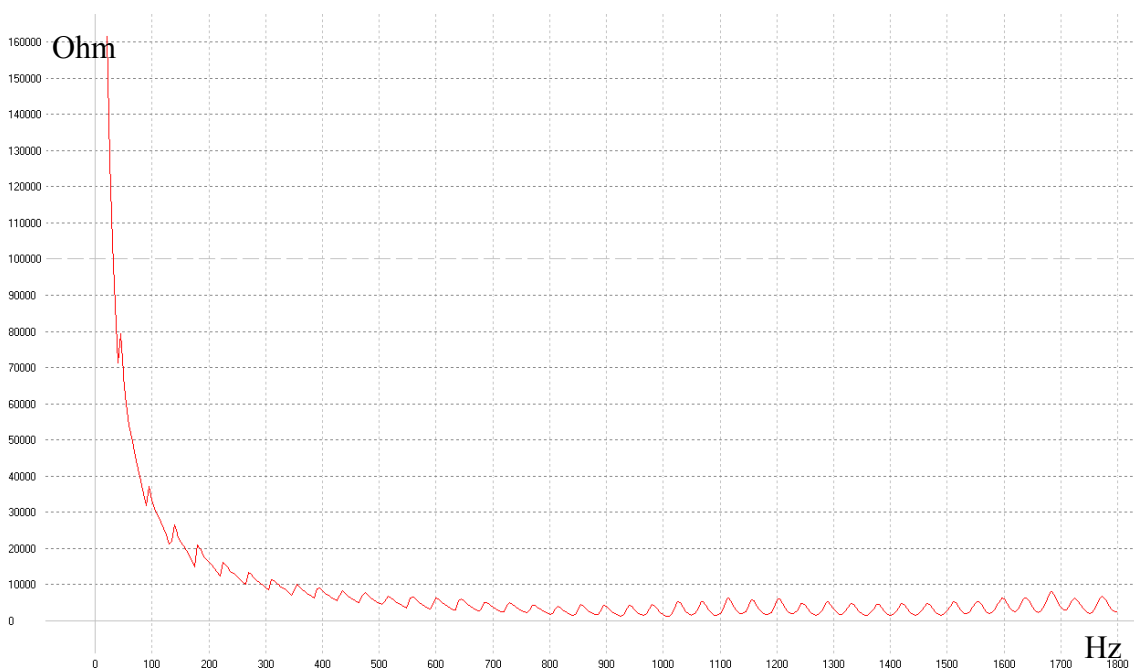
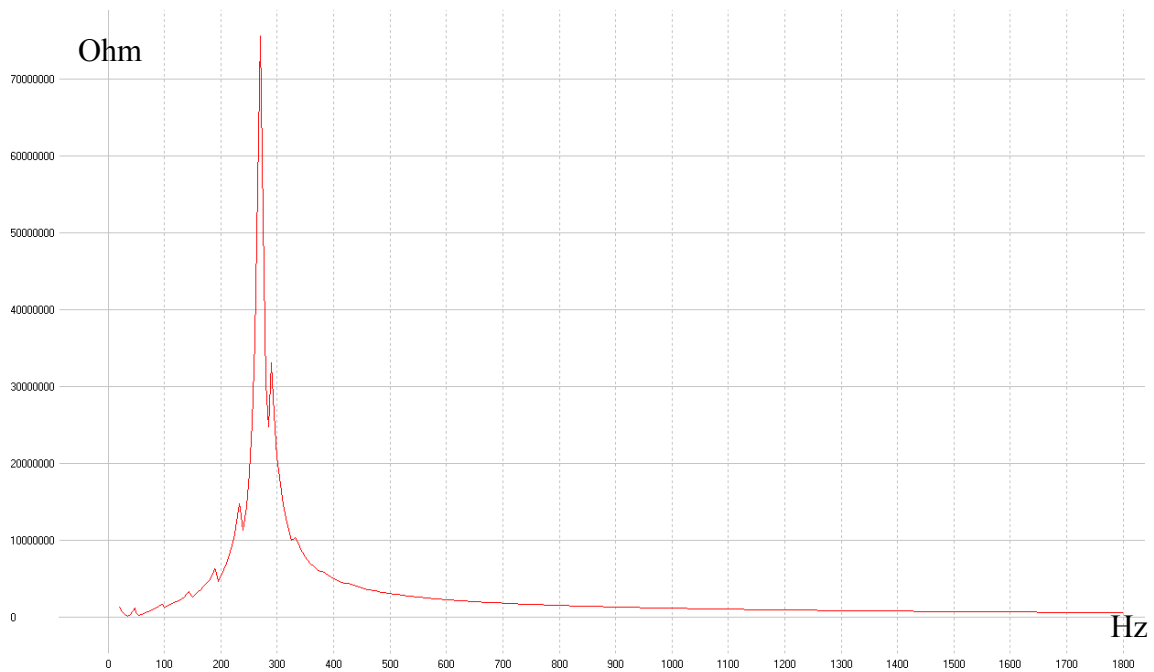


Abbildung 100 : Ausgangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne rechte Hand

### 6.3.2 Horn mit Stopfdämpfer

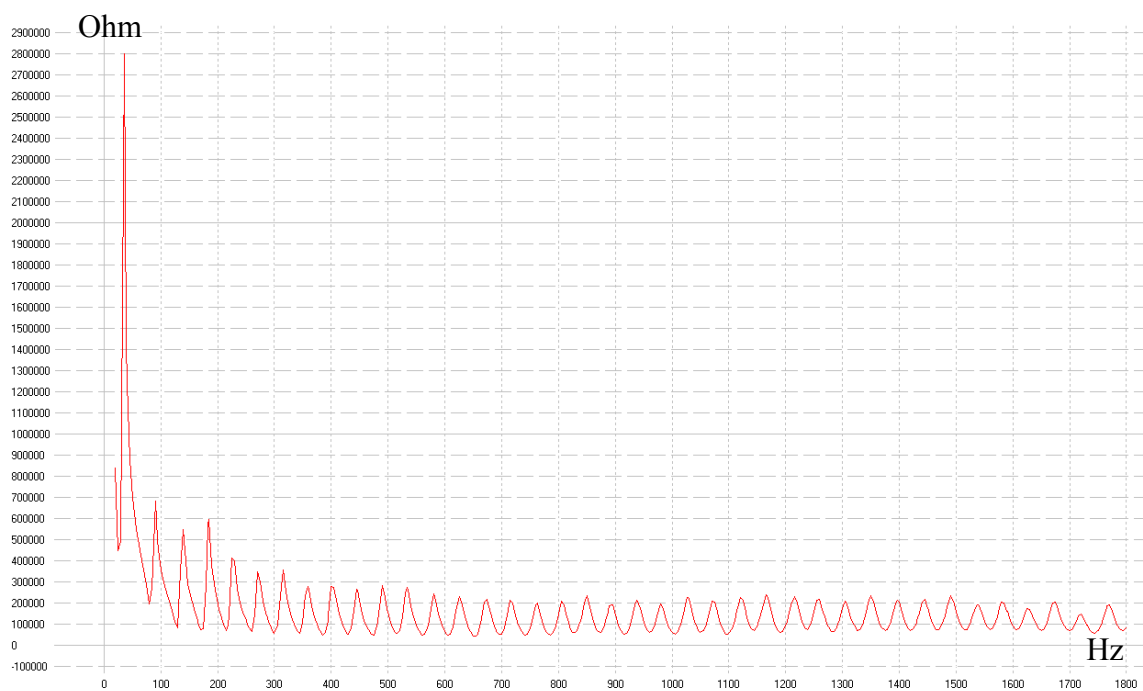
In Abbildung 101 ist die Ausgangsimpedanz des Hornes mit Stopfdämpfer abgebildet. Im Frequenzbereich zwischen 100 und 400 Hz wird die meiste Energie im Instrument gespeichert. Der Stopfdämpfer strahlt kaum Energie ab.



**Abbildung 101 :** Ausgangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer

### 6.3.3 Horn ohne Schallbecher

Ab ca. 250 Hz wird mehr Energie im Horn ohne Schallbecher (Abbildung 102) abgestrahlt als mit dem Schallbecher (Abbildung 100).



**Abbildung 102 :** Ausgangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher

## 7 Phänomen Stopfen - Die Erkenntnisse

Im Kapitel 7.1 wird das Modell Horn mit Stopfdämpfer aufgestellt und vereinfacht. Im Kapitel 7.2 werden schließlich die Resultate der gesamten Arbeit zusammengefasst.

### 7.1 Modellbildung des gestopften Hornes

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein vereinfachtes Modell des Hornes mit Stopfdämpfer zu finden. Zu diesem Zweck wurden die Abmessungen des Hornes mit Stopfdämpfer abgenommen. Geringfügige Abweichungen von den tatsächlichen Daten wurden dabei bewusst in Kauf genommen. Anschließend wurden die Mensurdaten in das Programm „Optimierer“ eingegeben und die zugehörige Impedanzkurve errechnet.

Im ersten Schritt wurde die Form des Stopfdämpfers vereinfacht und auf eine rohrförmige Öffnung reduziert, deren Größe zunächst den Abmessungen des verwendeten Stopfdämpfers entnommen wurde. Die Abmessungen des zylindrischen Rohres wurden aus den Abmessungen des Stopfdämpfers entnommen (Abbildung 103).

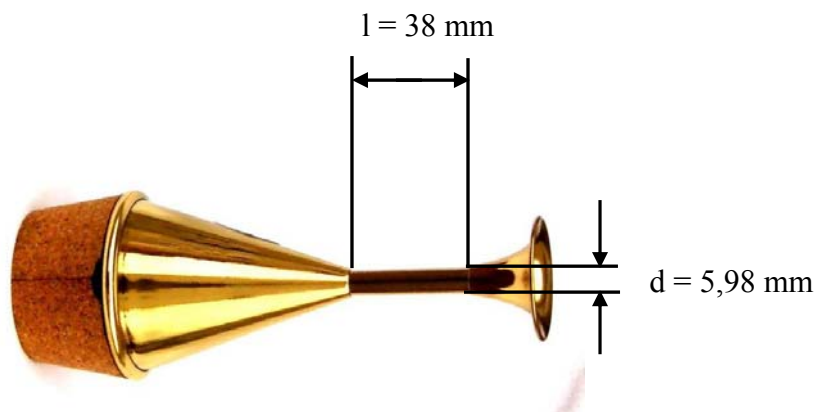
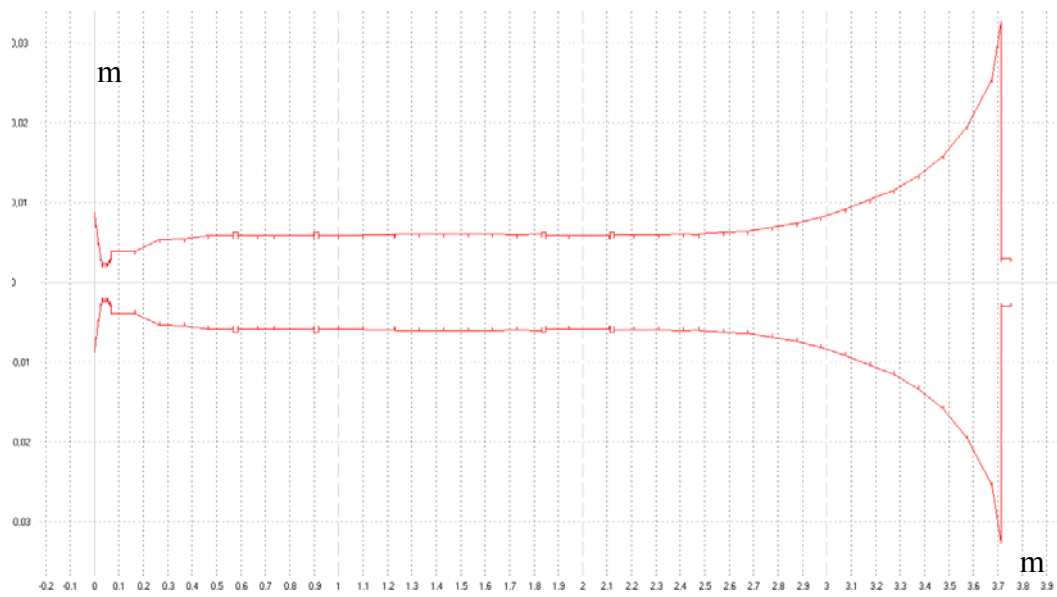


Abbildung 103 : Stopfdämpfer<sup>109</sup>

Das in diesem ersten Schritt erzielte und im Programm „Optimierer“ abgebildete Instrument mit Stopfdämpfer erhielt somit folgendes Aussehen (Abbildung 104).

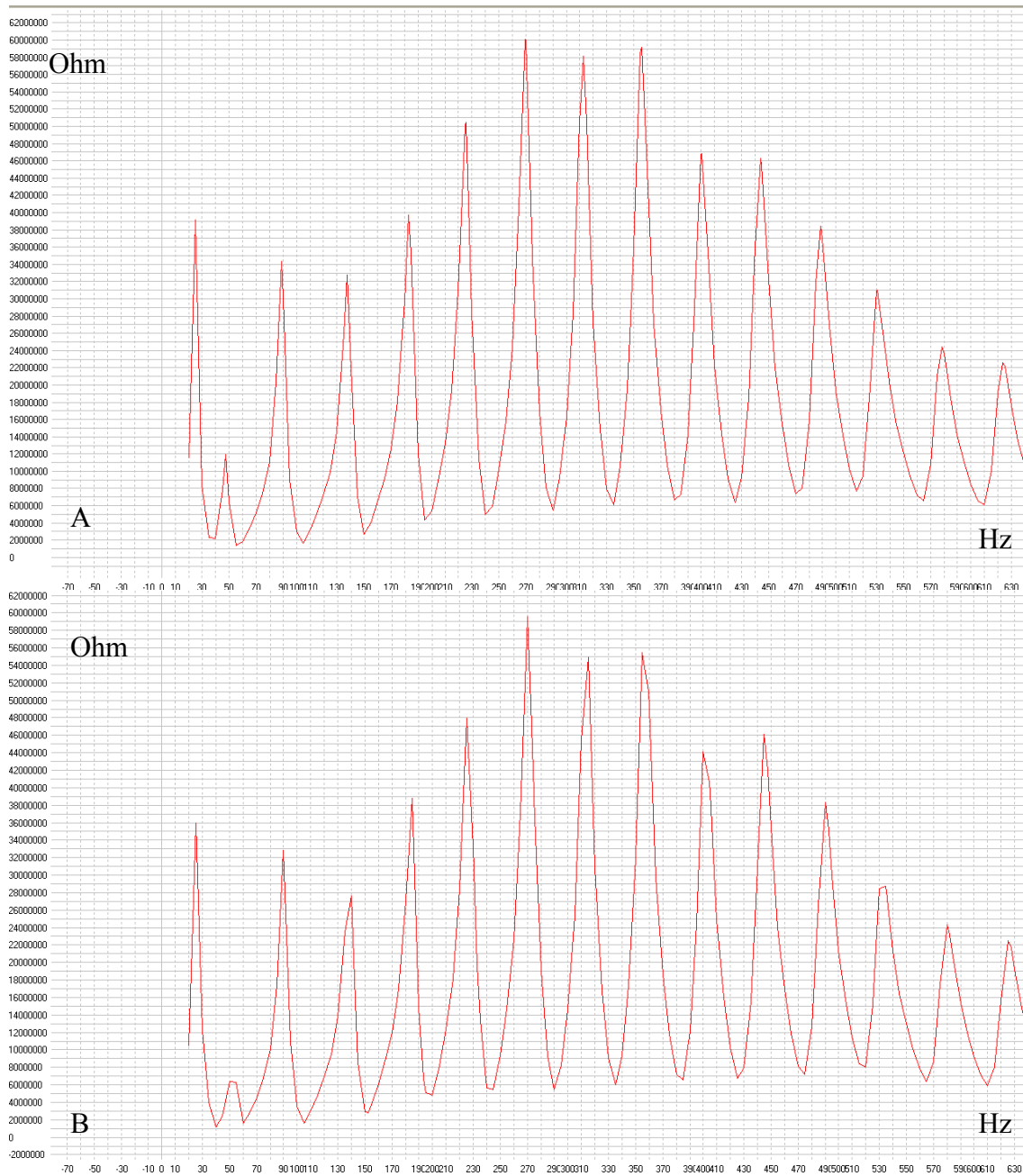
---

<sup>109</sup> Stopfdämpfer: Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer\\_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038).



**Abbildung 104 :** F Horn mit zylindrischem Rohr (Länge 38 mm, Durchmesser 5,98 mm)

Der Vergleich der berechneten Impedanzkurve des Hornes mit Stopfdämpfer (A) und der errechneten Impedanzkurve des Hornes mit zylindrischen Rohr (B) zeigt einen sehr ähnlichen Amplitudenverlauf.



**Abbildung 105 :** Eingangsimpedanz F Horn, A: Horn mit Stopfdämpfer, B: Horn mit zylindrischem Rohr ( $l = 38 \text{ mm}$ ,  $d = 5,98 \text{ mm}$ )

### ***Vergleich der Position der Resonanzmaxima mit Stopfdämpfer und mit zylindrischem Rohr***

Die Resonanzmaxima des F Hornes mit zylindrischem Rohr sind im Frequenzbereich bis 600 Hz maximal um 7 Hz verschoben (Tabelle 106). Das zweite Resonanzmaximum hat eine Abweichung von 7 Hz, alle anderen Resonanzmaxima bis zum 14. Maximum sind um maximal 3 Hz verschoben.

| F - Horn       |                  |                        |            |
|----------------|------------------|------------------------|------------|
| Resonanzmaxima | mit Stopfdämpfer | mit zylindrischem Rohr | $\Delta f$ |
| Nr.            | in Hz            | in Hz                  | in Hz      |
| 1              | 25               | 25                     | 0          |
| 2              | 48               | 55                     | 7          |
| 3              | 89               | 90                     | 1          |
| 4              | 138              | 140                    | 2          |
| 5              | 182              | 185                    | 3          |
| 6              | 225              | 225                    | 0          |
| 7              | 270              | 270                    | 0          |
| 8              | 312              | 315                    | 3          |
| 9              | 355              | 358                    | 3          |
| 10             | 400              | 402                    | 2          |
| 11             | 442              | 446                    | 4          |
| 12             | 489              | 490                    | 1          |
| 13             | 530              | 532                    | 2          |
| 14             | 580              | 580                    | 0          |

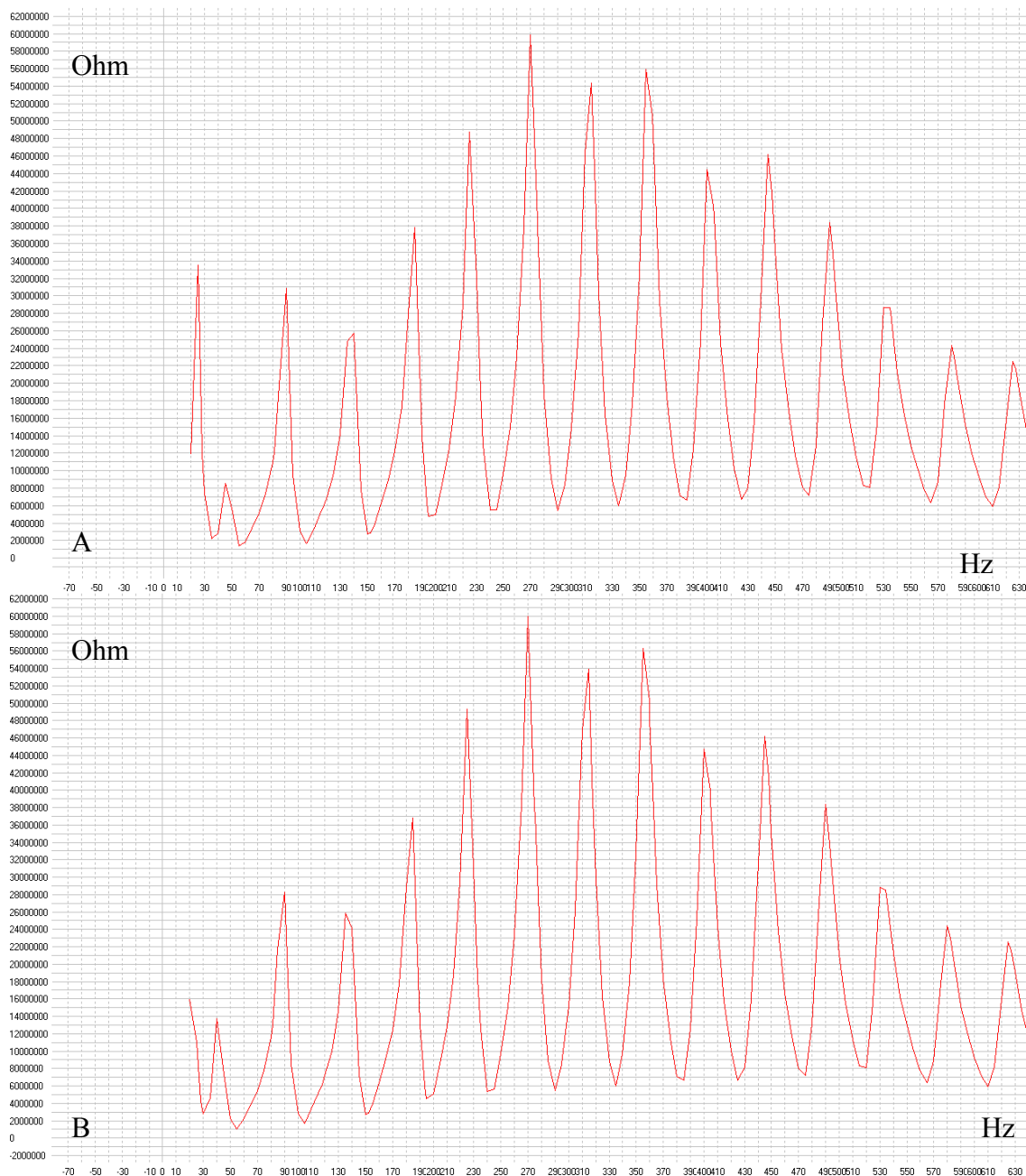
**Tabelle 106 :** Vergleich Resonanzmaxima F Horn mit Stopfdämpfer und F Horn mit zylindrischem Rohr  
d = 5,98 mm, l = 38 mm

In einem weiteren Schritt wurde der Rohrdurchmesser verkleinert, um eine weitere Annäherung des Impedanzverlaufs zum Horn mit Stopfdämpfer zu erreichen. Mit der Verkleinerung des Rohrdurchmessers auf 5 mm konnte das 10. Resonanzmaximum genau an das Resonanzmaximum des Hornes mit Stopfdämpfer angeglichen werden.

| Resonanz-<br>maxima | Horn mit<br>Stopfdämpfer | Horn mit<br>zylindrischem Rohr (Länge 38 mm) |     |     |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------------------|-----|-----|
|                     |                          | Durchmesser des zylindrischen Rohres         |     |     |
|                     |                          | 5,98                                         | 5   | 4   |
|                     |                          | mm                                           | mm  | mm  |
| Nr.                 | in                       | in                                           | in  | in  |
|                     | Hz                       | Hz                                           | Hz  | Hz  |
| 1                   | 25                       | 25                                           | 25  | 20  |
| 2                   | 48                       | 53                                           | 45  | 40  |
| 3                   | 89                       | 90                                           | 90  | 90  |
| 4                   | 138                      | 140                                          | 140 | 140 |
| 5                   | 182                      | 185                                          | 185 | 185 |
| 6                   | 225                      | 225                                          | 225 | 225 |
| 7                   | 270                      | 270                                          | 270 | 270 |
| 8                   | 312                      | 314                                          | 314 | 314 |
| 9                   | 355                      | 358                                          | 355 | 355 |
| 10                  | 400                      | 402                                          | 400 | 400 |
| 11                  | 442                      | 446                                          | 445 | 445 |
| 12                  | 489                      | 490                                          | 490 | 490 |
| 13                  | 530                      | 532                                          | 530 | 530 |
| 14                  | 580                      | 580                                          | 580 | 580 |

**Tabelle 107 :** Tabelle Resonanzmaxima F Horn mit verschiedenem zylindrischen Rohrdurchmesser (konstante Rohrlänge von 38 mm) und F – Horn mit Stopfdämpfer

Wie in Tabelle 107 zu sehen ist, gibt es zwischen den Rohrdurchmessern 5 und 4 mm keine Unterschiede in der Frequenzlage der Resonanzmaxima. Auch Amplituden der Resonanzmaxima sind identisch (Abbildung 108).



**Abbildung 108 :** Impedanzverlauf F Horn mit unterschiedlichem zylindrischen Rohrdurchmesser ( $l = 38$  mm), A:  $d = 5$  mm, B:  $d = 4$  mm

Mit einer Verkleinerung der Rohrlänge von 38 mm auf 30 mm konnte die zweite Resonanzfrequenz von 45 Hz auf 50 Hz verbessert werden und damit der Differenz zur Resonanzfrequenz des Hornes mit Stopfdämpfer auf 2 Hz angeglichen werden.

Mit dem Rohrdurchmesser von 5 mm und einer Rohrlänge von 30 mm konnte der Impedanzverlauf des Hornes mit zylindrischem Rohr sehr nahe an den Impedanzverlauf des Hornes mit Stopfdämpfer angeglichen werden (Abbildung 109).



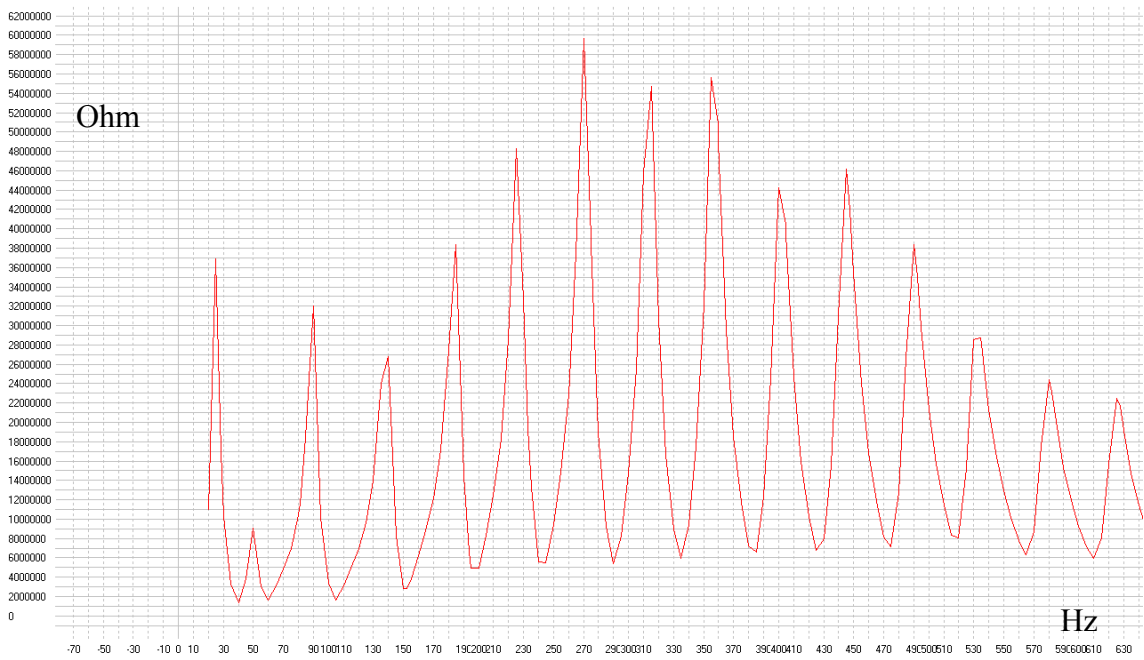


Abbildung 109 : Eingangsimpedanz F Horn mit zylindrischem Rohr (l = 30 mm, d = 5 mm)

Tabelle 110 zeigt die Resonanzmaxima des F Hornes mit Stopfdämpfer im Vergleich zum F Horn mit zylindrischem Rohr (l = 30 mm, d = 5 mm).

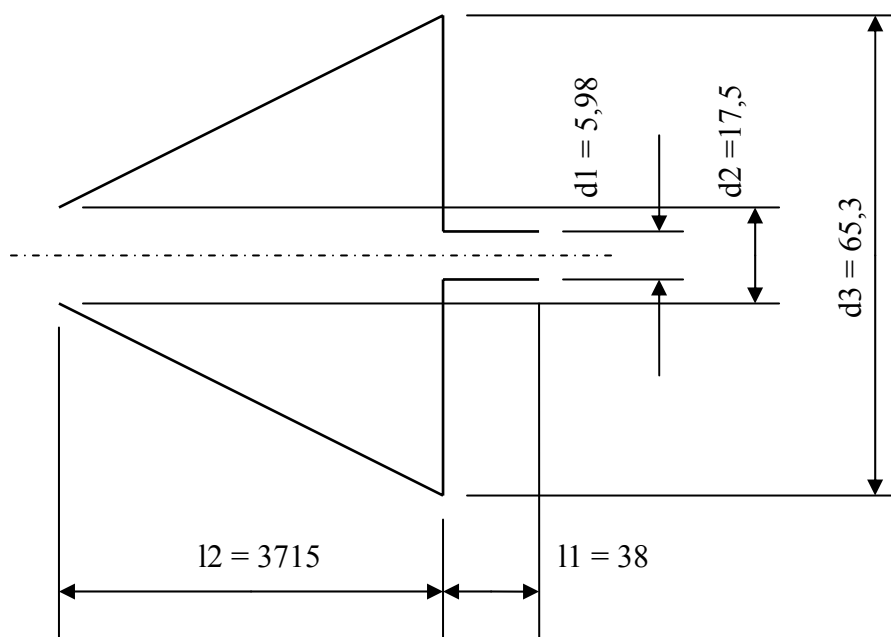
| F Horn              |                  |                           |                     |
|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------|
| Resonanzmaxi-<br>ma | mit Stopfdämpfer | mit zylindrischem<br>Rohr |                     |
| Nr.                 | in Hz            | in Hz                     | $\Delta f$<br>in Hz |
| 1                   | 25               | 25                        | 0                   |
| 2                   | 48               | 50                        | 2                   |
| 3                   | 89               | 90                        | 1                   |
| 4                   | 138              | 140                       | 2                   |
| 5                   | 182              | 185                       | 3                   |
| 6                   | 225              | 225                       | 0                   |
| 7                   | 270              | 270                       | 0                   |
| 8                   | 312              | 314                       | 2                   |
| 9                   | 355              | 355                       | 0                   |
| 10                  | 400              | 400                       | 0                   |
| 11                  | 442              | 445                       | 3                   |
| 12                  | 489              | 490                       | 1                   |
| 13                  | 530              | 530                       | 0                   |
| 14                  | 580              | 580                       | 0                   |

Tabelle 110 : Vergleich Resonanzmaxima F Horn mit Stopfdämpfer und F Horn mit zylindrischem Rohr d = 5 mm, l = 30 mm

Um das Modell des Hornes so einfach wie möglich zu halten, wurde in einem weiteren Schritt das Horn als Konus (Abbildung 111) angenommen. Die kleinere Öffnung (Mundstückseite) wird vom Programm Optimierer als geschlossen angesehen.

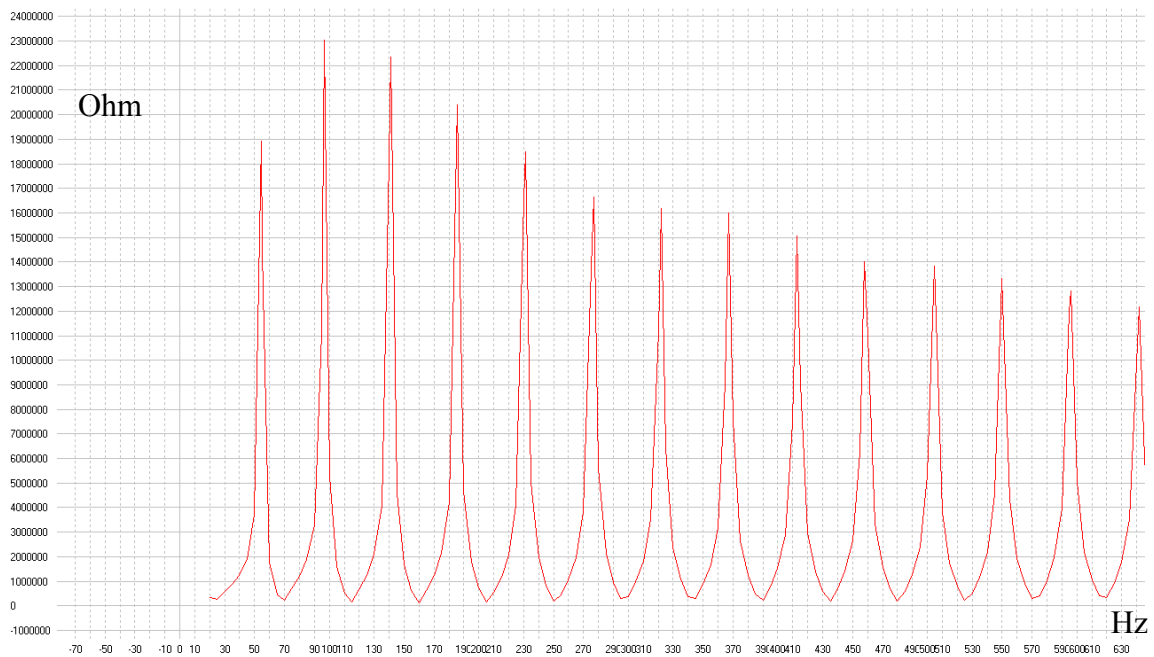
Für den kleinen Konusdurchmesser  $d_2$  wurde die Abmessung des Mundstückrands (17,5 mm) verwendet. Der große Durchmesser des Konus  $d_3$  wurde auf 65,3 mm angenommen, die vom Anfangsdurchmesser des Schallbechers entnommen wurde und für die Länge des Konus  $l_2$  wurde die Länge des F-Hornes (3,715 m) angenommen.

Als Stopfdämpfer wurde wieder ein zylindrisches Rohr mit den gleichen Abmessungen wie am Beginn der Optimierung angenommen. Die Länge  $l_1$  wurde mit 38 mm und der Durchmesser  $d_1$  mit 5,98 mm angenommen.



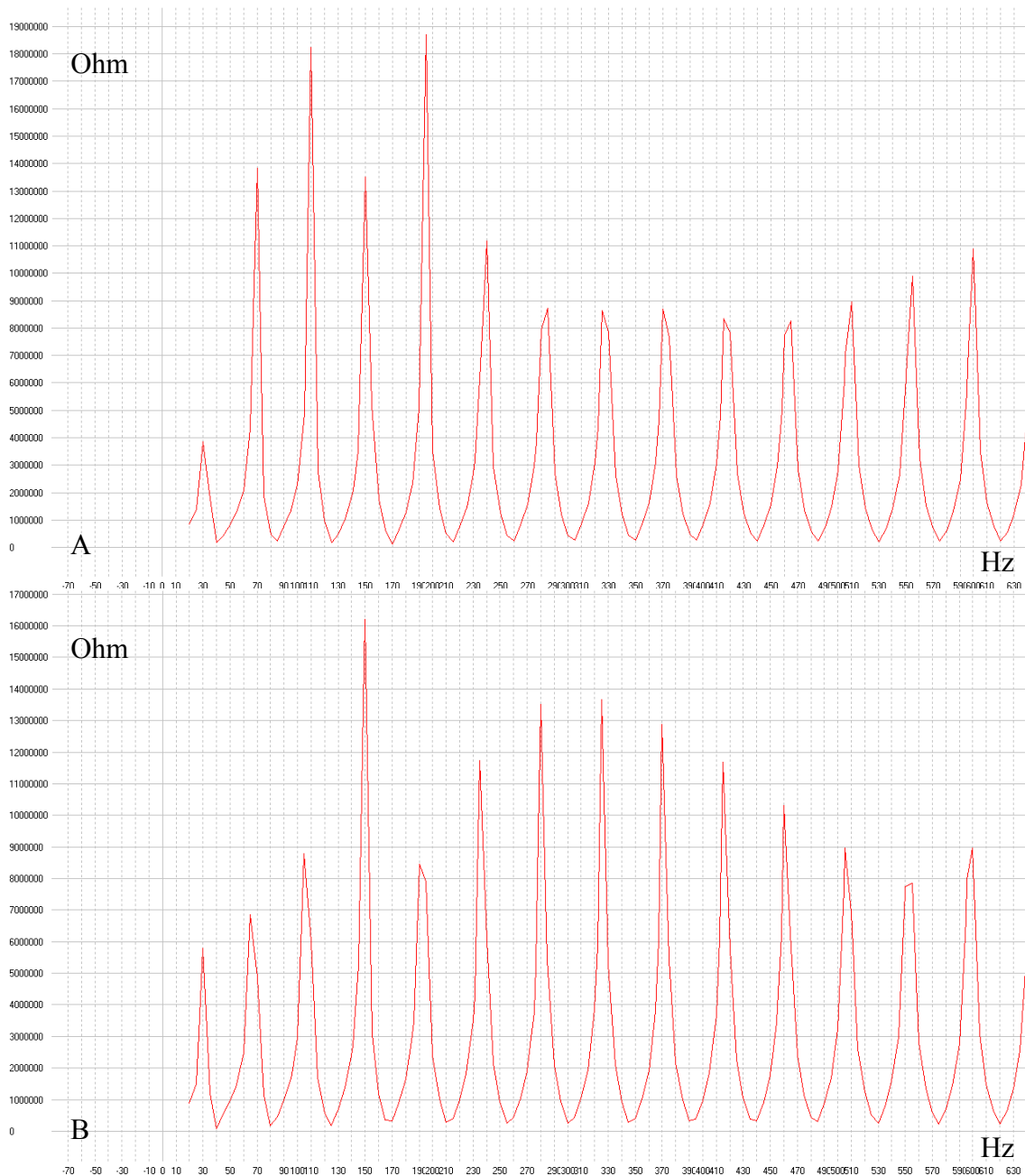
**Abbildung 111 :** Abmessungen Konus mit zylindrischem Rohr

Der berechnete Impedanzverlauf des Konus mit zylindrischem Rohr (Abbildung 112) ist weit von dem gewünschten Impedanzverlauf des gestopften Hornes entfernt.

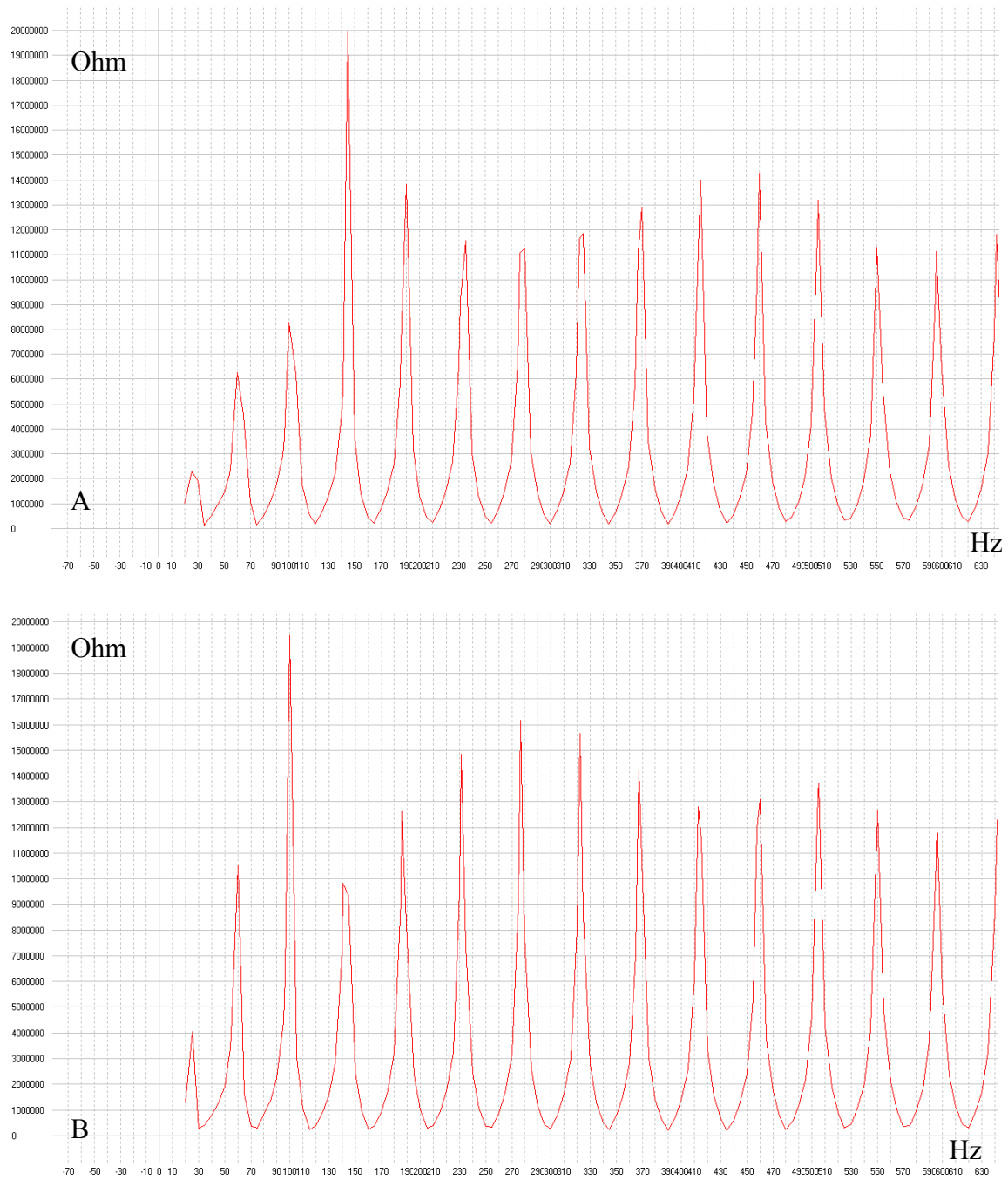


**Abbildung 112 :** Eingangsimpedanz konisches ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit zylindrischem Rohr ( $l = 38$  mm,  $d = 5,98$  mm)

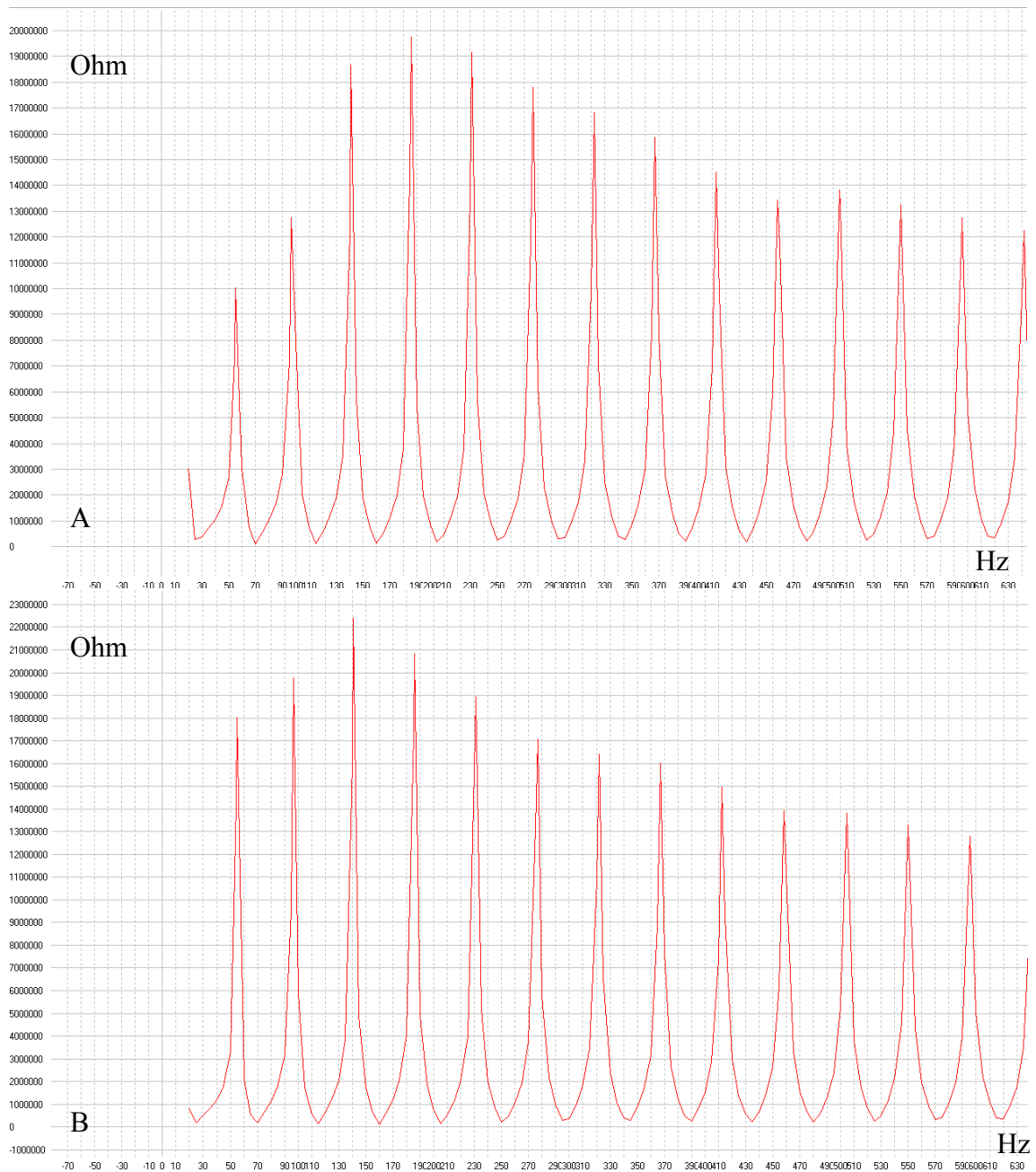
Um den Impedanzverlauf zu verbessern, wurde zuerst die Länge des zylindrischen Rohres variiert. Die Impedanzkurven des Konus mit unterschiedlicher Rohrlänge und konstantem Rohrdurchmesser (5,98 mm) werden in der Abbildung 113 bis 116 dargestellt. Durch Vergrößern der zylindrischen Rohrlänge werden die Resonanzfrequenzen immer tiefer.



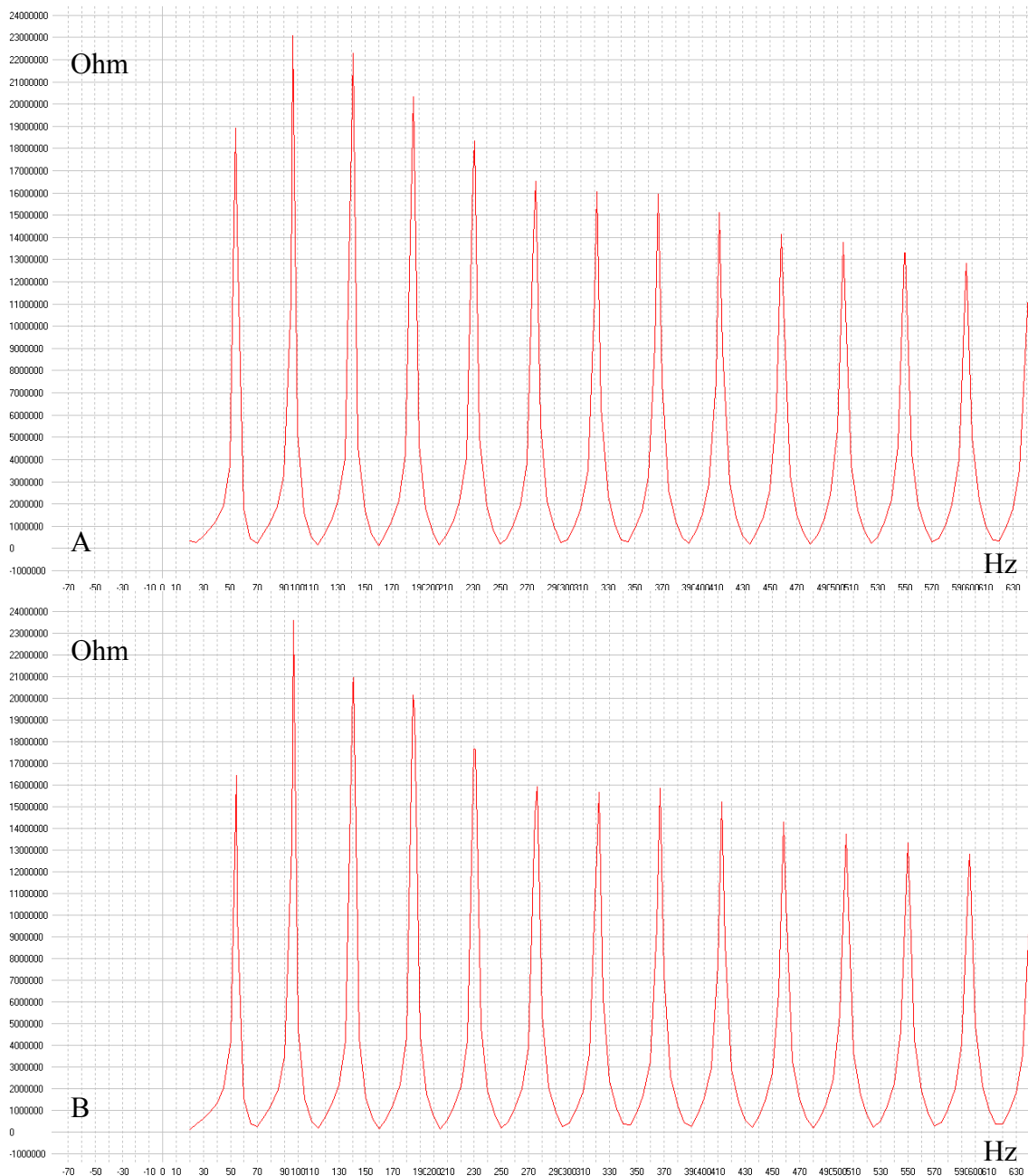
**Abbildung 113 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5,98$  mm), A: ohne zylindrischem Rohr, B:  $l = 1$  mm



**Abbildung 114 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98$ mm) A:  $l = 5$  mm, B:  $l = 10$  mm

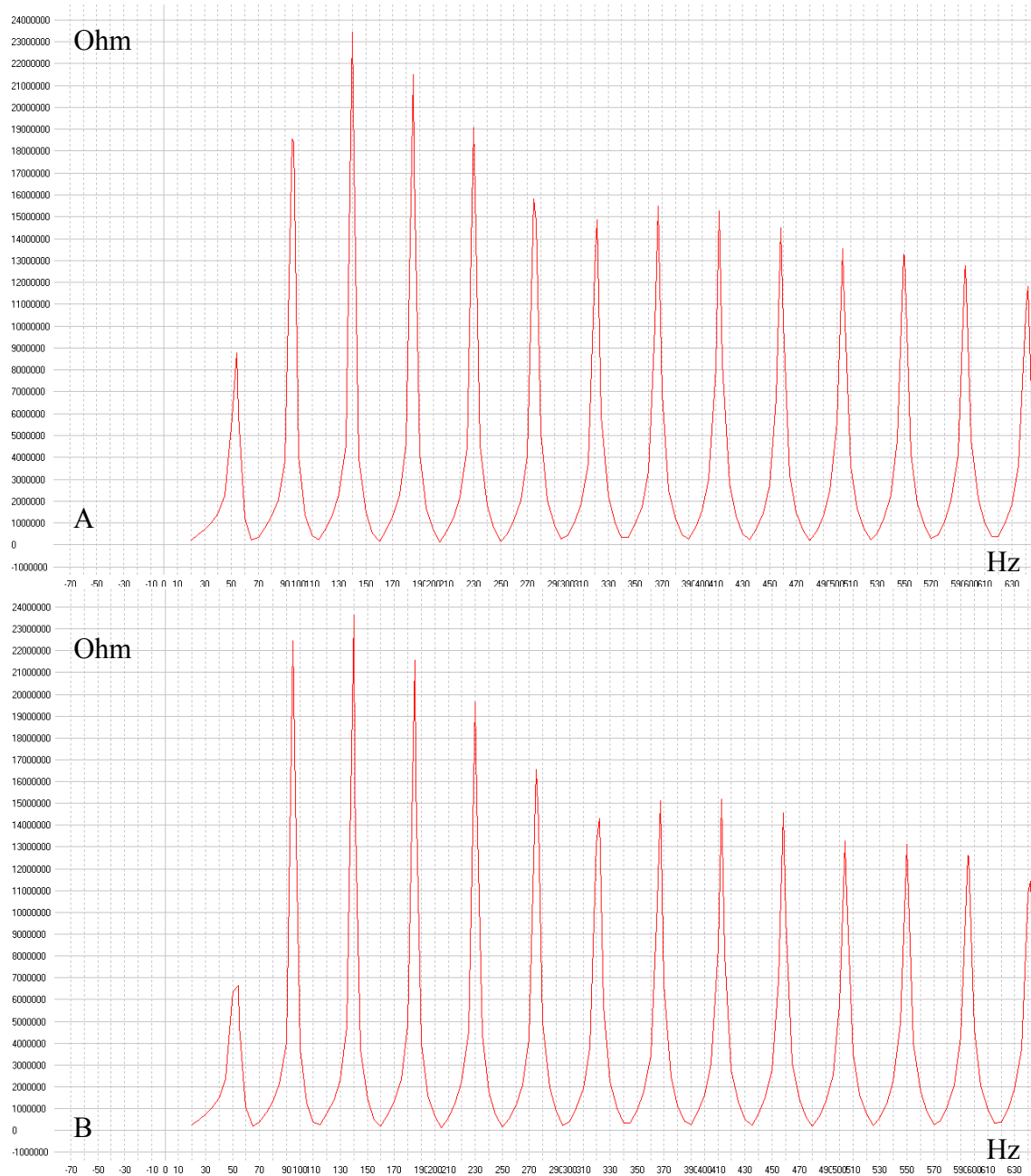


**Abbildung 115 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5,98$ mm), A:  $l = 20$  mm, B:  $l = 30$  mm



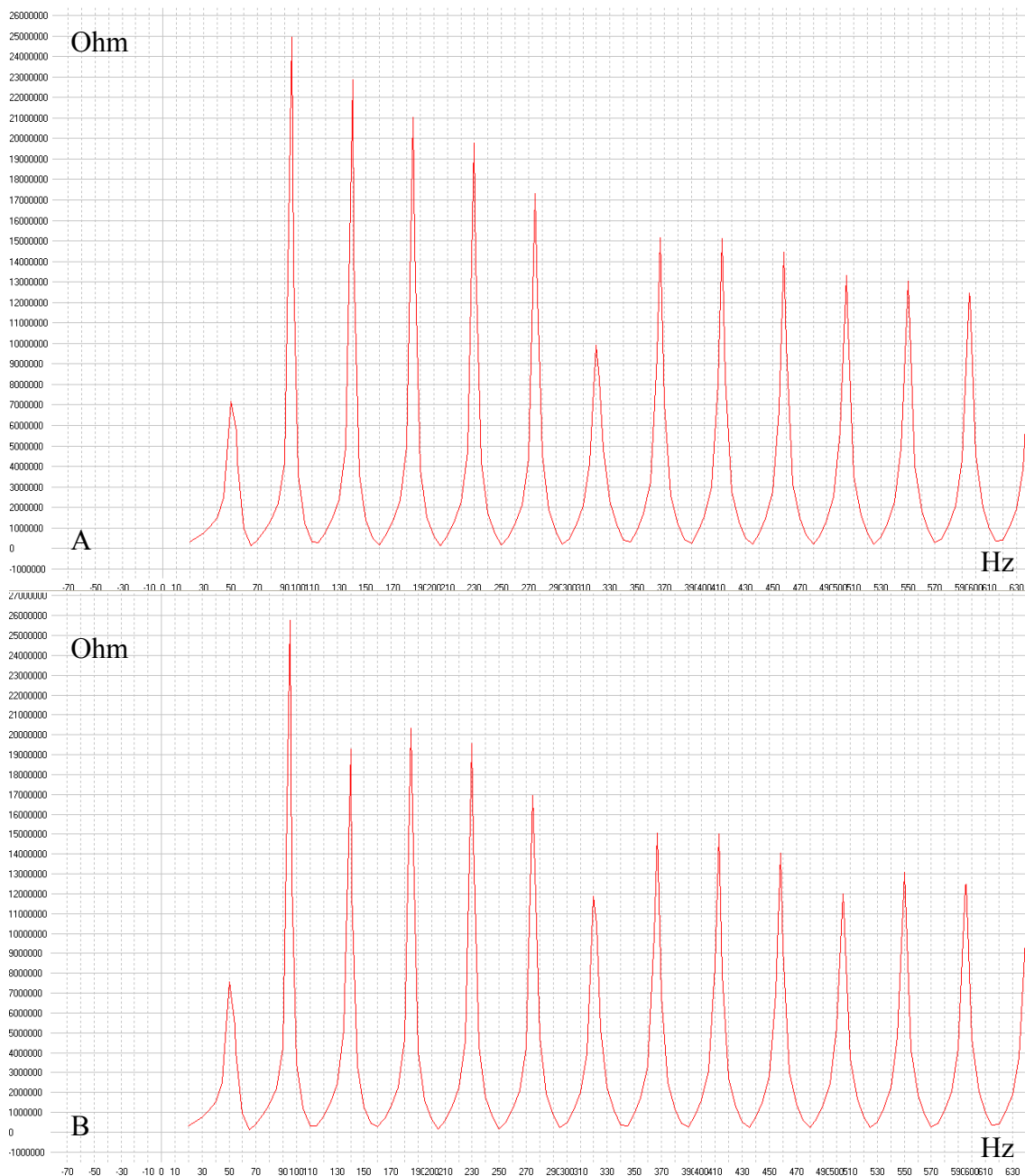
**Abbildung 116 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98$ mm) A:  $l = 38$  mm, B:  $l = 50$  mm

Wird die Rohrlänge des zylindrischen Rohres über 50 mm vergrößert, verändert sich nur noch die Amplitudenhöhe der Resonanzfrequenzen im Impedanzverlauf (Abbildung 117 und 118).



**Abbildung 117 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98$ mm), A:  $l = 100$  mm, B:  $l = 200$  mm





**Abbildung 118 :** Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4$  mm,  $d = 65,3$  mm) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5,98$  mm), A:  $l = 500$  mm, B:  $l = 1000$  mm

Um die einzelnen Impedanzkurven in den Abbildung 113 bis 118 zu vergleichen, wurden sie in einer Tabelle zusammengefasst. In der Tabelle 119 sind die Resonanzmaxima der unterschiedlichen Impedanzverläufe zusammengefasst. Ab einer Rohrlänge von 20 mm (rot gefärbt) erreicht der Konus mit einer Gesamtlänge von 3715,4 mm und einem Durchmesser von 76,3 mm den Bereich des Stopfens.

| Resonanzmaxima | Horn mit<br>Stopfdämpfer | Konus mit verschiedenen<br>zylindrischen Rohrlängen |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                |                          | 0                                                   | 1        | 5        | 10       | 20       | 30       | 38       | 50       | 100      | 200      | 500      | 1000     |
|                |                          | mm                                                  | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       | mm       |
| Nr.            | in Hz                    | in<br>Hz                                            | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz | in<br>Hz |
| 1              | 25                       | 30                                                  | 30       | 25       | 25       | 20       | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      |
| 2              | 48                       | 70                                                  | 64       | 60       | 60       | 55       | 55       | 53       | 53       | 53       | 53       | 50       | 50       |
| 3              | 89                       | 110                                                 | 105      | 100      | 100      | 98       | 98       | 98       | 98       | 95       | 95       | 95       | 95       |
| 4              | 138                      | 150                                                 | 150      | 145      | 140      | 140      | 140      | 140      | 140      | 140      | 140      | 140      | 140      |
| 5              | 182                      | 195                                                 | 190      | 190      | 185      | 185      | 185      | 185      | 185      | 185      | 185      | 185      | 185      |
| 9              | 225                      | 240                                                 | 235      | 235      | 230      | 230      | 230      | 230      | 230      | 230      | 230      | 230      | 230      |
| 7              | 270                      | 285                                                 | 280      | 280      | 278      | 278      | 278      | 278      | 278      | 275      | 275      | 275      | 275      |
| 8              | 312                      | 325                                                 | 325      | 325      | 322      | 322      | 322      | 322      | 322      | 322      | 322      | 320      | 320      |
| 9              | 355                      | 370                                                 | 370      | 370      | 368      | 368      | 368      | 368      | 368      | 368      | 368      | 368      | 368      |
| 10             | 400                      | 415                                                 | 415      | 415      | 412      | 412      | 412      | 412      | 412      | 412      | 412      | 412      | 412      |
| 11             | 442                      | 465                                                 | 460      | 460      | 460      | 458      | 458      | 458      | 458      | 458      | 458      | 458      | 458      |
| 12             | 489                      | 510                                                 | 505      | 505      | 505      | 505      | 503      | 503      | 503      | 503      | 503      | 503      | 503      |
| 13             | 530                      | 555                                                 | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      | 550      |
| 14             | 580                      | 600                                                 | 600      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      | 595      |

**Tabelle 119 :** Resonanzmaxima mit verschiedener Rohrlänge (konstanter Durchmesser von 5,98 mm)

Zuletzt wurde überprüft, ob sich durch die Verringerung des Durchmessers des zylindrischen Rohres der Impedanzverlauf zum Impedanzverlauf des gestopften Hornes verbessert (Tabelle 120). Mit kleinerem Rohrdurchmesser wird das erste Resonanzmaximum weiter unter 20 Hz gesenkt, was einer Verschlechterung des Impedanzverlaufs entspricht.

| Resonanz-<br>maxima | Horn mit<br>Stopfdämpfer | Durchmesser des zylindrischen Roh-<br>res |     |     |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------------|-----|-----|
|                     |                          | 5,98                                      | 5   | 4   |
|                     |                          | mm                                        | mm  | mm  |
| Nr.                 | in                       | in                                        | in  | in  |
|                     | Hz                       | Hz                                        | Hz  | Hz  |
| 1                   | 25                       | 20                                        | <20 | <20 |
| 2                   | 48                       | 55                                        | 55  | 53  |
| 3                   | 89                       | 98                                        | 98  | 98  |
| 4                   | 138                      | 140                                       | 140 | 140 |
| 5                   | 182                      | 185                                       | 185 | 185 |
| 6                   | 225                      | 230                                       | 230 | 230 |
| 7                   | 270                      | 278                                       | 278 | 278 |
| 8                   | 312                      | 322                                       | 322 | 322 |
| 9                   | 355                      | 368                                       | 368 | 368 |
| 10                  | 400                      | 412                                       | 412 | 412 |
| 11                  | 442                      | 458                                       | 458 | 458 |
| 12                  | 489                      | 505                                       | 505 | 505 |
| 13                  | 530                      | 550                                       | 550 | 550 |
| 14                  | 580                      | 595                                       | 595 | 595 |

**Tabelle 120 :** Resonanzmaxima Konus mit verschiedenem zylindrischem Rohrdurchmesser (konstante Rohrlänge von 20 mm)

Das Verkleinern der Schallbecheröffnung entspricht einer Senkung der Resonanzfrequenzen der Eingangsimpedanzen. Das bedeutet, dass die Tonhöhe tiefer wird. Um in den Bereich des Stopfens zu kommen, müssen die Resonanzfrequenzen weiter gesenkt werden. Dies kann nur mit dem Hinzufügen eines zylindrischen Rohres an die verringerte Öffnung des Schallbechers erreicht werden.

### ***Modell des gestopften Hornes***

Durch die Vereinfachung des Stopfdämpfers zu einem zylindrischen Rohr und des Hornes zu einem Konus konnte das gestopfte Horn in ein geometrisch einfaches Modell gefasst werden.

Der Effekt des Stopfens kann daher in Verbindung mit einem zylindrischen Rohr entstehen. Das zylindrische Rohr muss mindestens 7,7 % des Konusdurchmessers, die Rohrlänge mindestens 0,54 % des Konuslänge besitzen.

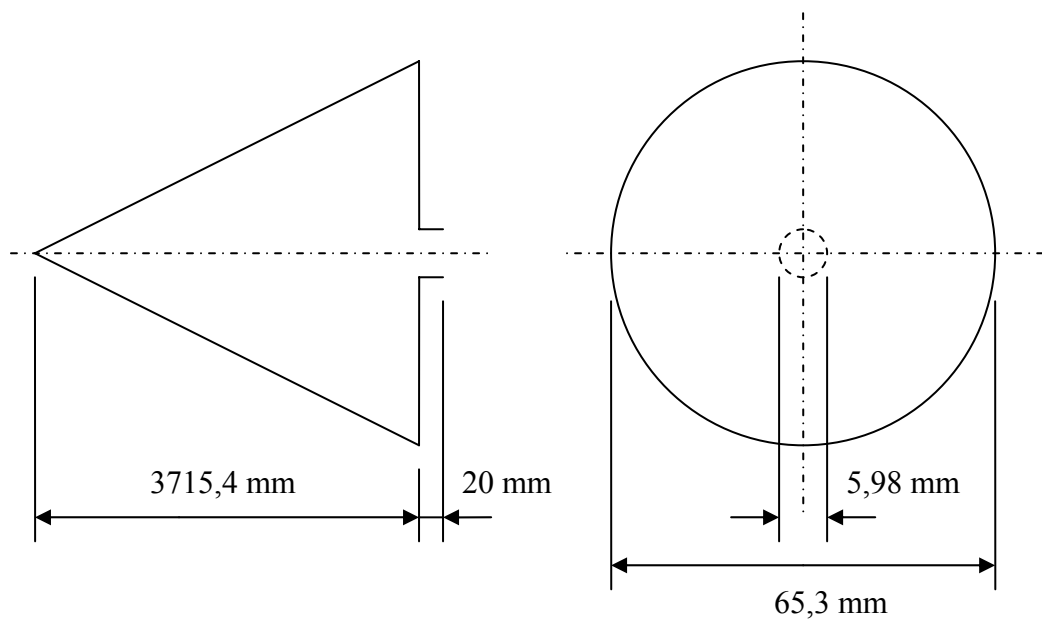


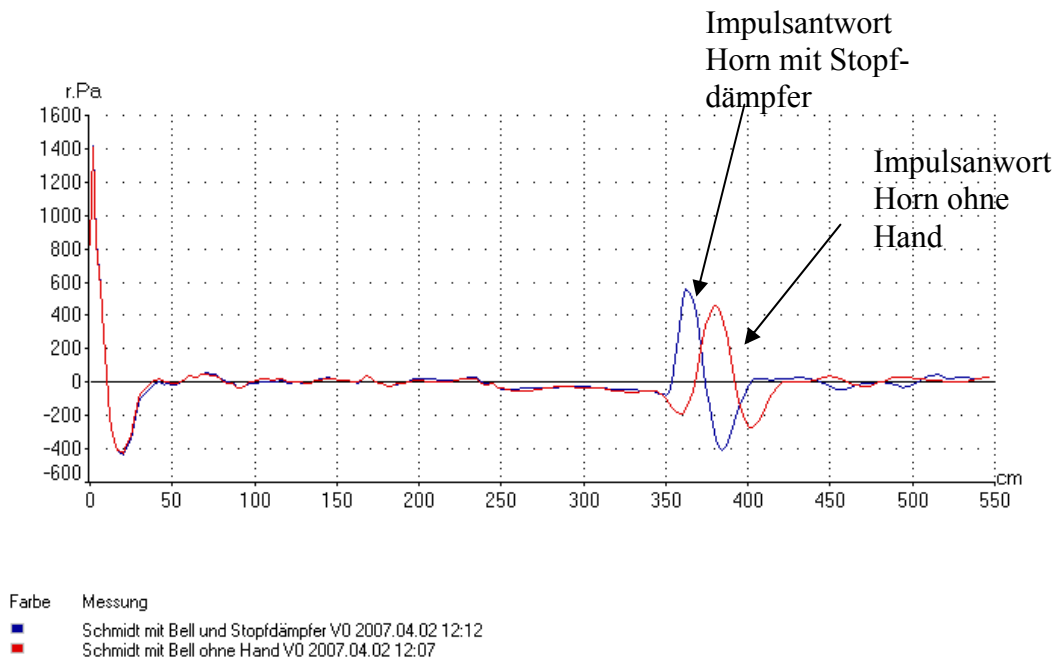
Abbildung 121 : Modell Horn mit Stopfdämpfer

## 7.2 Resultate

### *Erhöht sich der Ton beim Stopfen?*

In der Fachzeitschrift „Horn Call“ wurde öfters über diese Fragestellung diskutiert. Wenn der Spieler einen Ton erzeugt, die Hand in den Schallbecher einführt und in den Bereich des Stopfens kommt, verändert sich der Ton spontan. Mit der Lippenspannung des Bläusers kann gesteuert werden, ob sich der Ton erhöht oder erniedrigt. Spielt der Musiker ein klingendes a`, wechselt der Ton durch das Stopfen zu einem ais` oder fis`. Das klingende a` kann danach nur durch eine Transposition mit den Ventilen aus dem gespielten ais` erzeugt werden.

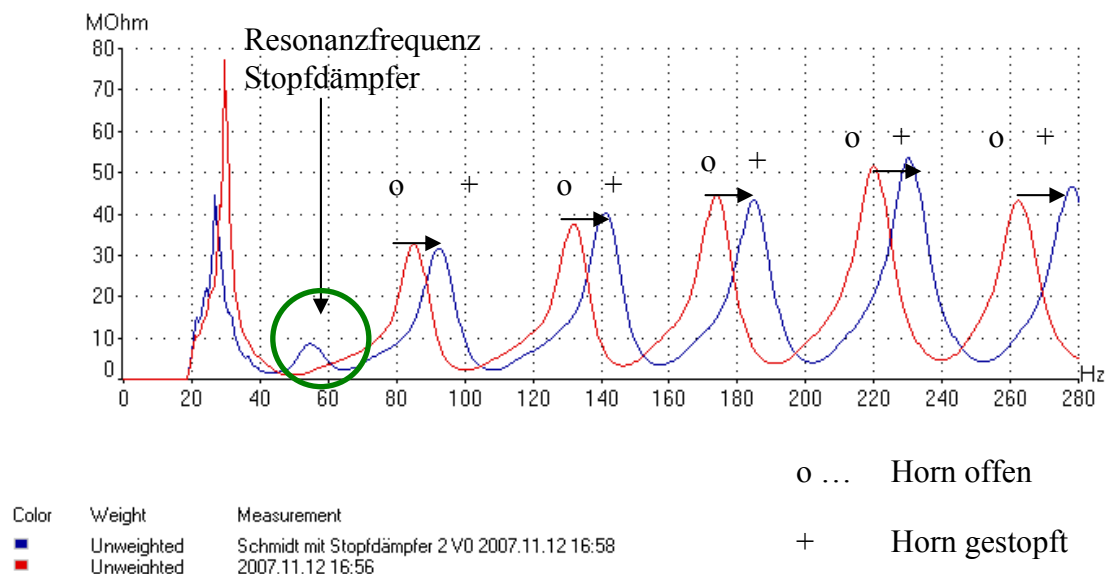
In der Abbildung 122 wird die wirksame akustische Wellenlänge durch die Impulsantwort dargestellt. Am Mundstück wird ein Impuls in das Instrument gebracht und die rücklaufende Welle gemessen. Je früher die rücklaufende Welle wieder am Mundstück ankommt, desto kürzer ist die akustische Länge des Instruments. Die Impulsantwort zeigt, dass die wirksame Luftsäule beim Stopfen verkürzt und der Ton beim Stopfen erhöht wird.



**Abbildung 122 :** Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau) und Horn ohne Hand (rot)

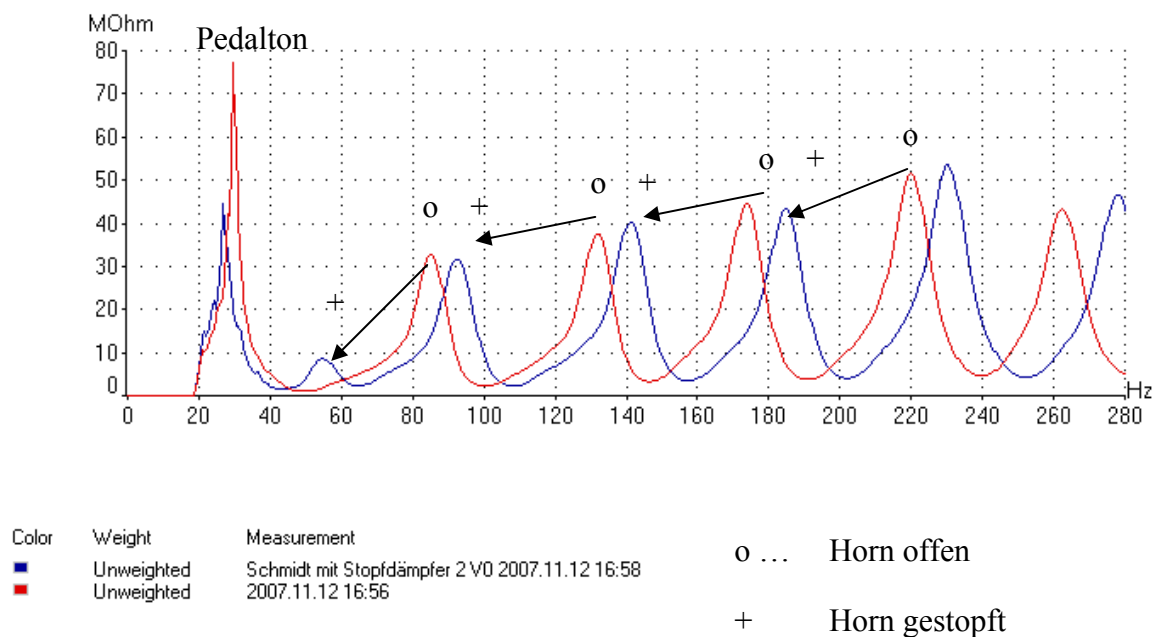
In der Abbildung 123 ist die Eingangsimpedanz des Hornes mit Stopfdämpfer dem offenen Horn gegenüber gestellt. Nach dem Pedalton ergibt sich beim Horn mit Stopfdämpfer eine Resonanzfrequenz bei ca. 55 Hz (grüner Kreis). In seiner Diplomarbeit bezeichnet Matthias Bertsch<sup>110</sup> diese Resonanzfrequenz als eine Helmholtzresonanz des Dämpfers. Wenn laut Bertsch angenommen wird, dass die Resonanzfrequenz bei 55 Hz die Helmholtzresonanzfrequenz des Stopfdämpfers ist, so liegt die Interpretation nahe, dass sich die Resonanzfrequenzen im Impedanzverlauf nach rechts verschieben, der Ton beim Stopfen also erhöht wird.

<sup>110</sup> Vgl. Bertsch, Matthias: *Der Einfluss des Dämpfers an das akustische Verhalten und der Klangfarbe der Trompete*, Diplomarbeit 1993, Seite 35, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.



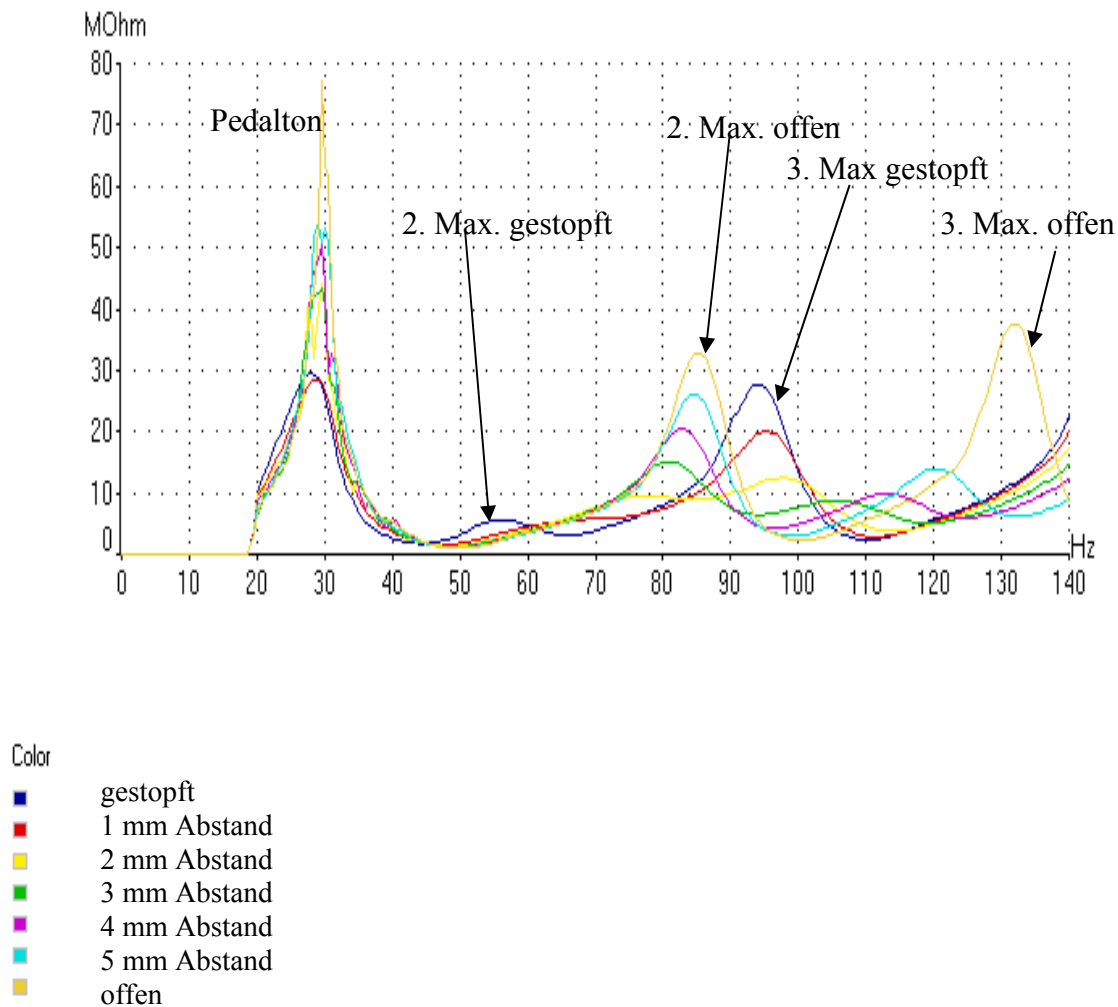
**Abbildung 123 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn offen (rot), Ton erhöht sich beim Stopfen

Wird aber die Resonanzfrequenz bei 55 Hz als die zweite Resonanzfrequenz des gestopften Hornes angenommen, so sind die gestopften Resonanzfrequenzen jeweils tiefer zu den offenen Resonanzfrequenzen (Abbildung 124). Das bedeutet, dass sich die Resonanzfrequenzen im Impedanzverlauf nach links verschieben und der Ton tiefer wird.



**Abbildung 124 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn offen (rot), Ton erniedrigt sich beim Stopfen

Aus der statischen Betrachtung des Impedanzverlaufs kann nicht eindeutig geschlossen werden, ob der Ton beim Stopfen höher oder tiefer wird. Um den Übergang zwischen gestopftem und offenem Horn zu betrachten, wurde eine Reihe von Eingangsimpedanzen gemessen, indem der Stopfdämpfer in Millimeterschritten aus dem Horn geführt wurde. Bei dieser Messreihe konnte gezeigt werden, dass die gestopfte Resonanzfrequenz (55 Hz) aus der zweiten Resonanzfrequenz des offenen Horns (85 Hz) entstehen. In Abbildung 125 ist eine dynamische Betrachtung des Stopfens dargestellt. Die Eckpunkte markieren den Verlauf des gestopften und des offenen Hornes. Dazwischen sind die Messergebnisse mit zunehmender Entfernung des Stopfdämpfers dargestellt. Die blaue Kurve ist der Impedanzverlauf des gestopften Hornes. Bei der roten Impedanzkurve wurde der Stopfdämpfer einen Millimeter aus dem Horn geführt. Zwischen 2 und 3 mm Abstand des Stopfdämpfers zur Schallbecheröffnung kippt der gespielte Ton vom offenen zum gestopften Bereich. Das zweite offene wie auch alle weiteren Maxima wandern auf der Frequenzachse bis zum gestopften Betrieb nach links.



**Abbildung 125 :** Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn gestopft, Stopfdämpfer 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, und 5 mm von Schallbecher entfernt, Horn offen

In Kapitel 7.1 wurde mit Hilfe des Softwareprogramms Optimierer ein vereinfachtes Modell des gestopften Hornes gebildet. Die Modellbildung zeigt, dass durch Verengung der Rohröffnung am Ende des Hornes die Resonanzfrequenzen bis zu einem bestimmten Endwert erniedrigt werden konnten.

Eine valide Annäherung an den Impedanzverlauf des gestopften Hornes erreicht man im Modell durch Verlängerung des Instruments durch ein zylindrisches Rohr, das an der verbleibenden Öffnung eingebracht wurde. Der Resonanzfrequenzverlauf verschiebt sich daher auf der Frequenzachse weiter nach links.

Die dynamische Betrachtung des Stopfvorganges zeigt sowohl in der Messreihe als auch in der Modellbildung eine zunehmende Verschiebung der Resonanzfrequenzen



nach links, die einer Senkung der jeweiligen Tonhöhe entspricht. Der Ton wird beim Stopfen also nicht höher, sondern tiefer.

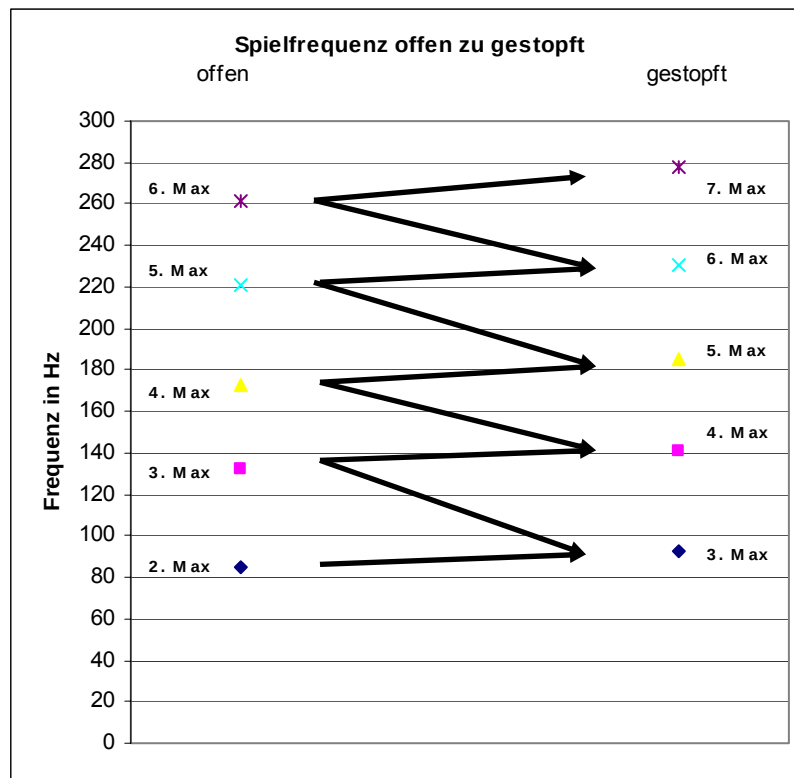
### ***Springt der Ton beim Stopfen?***

Wird der Stopfdämpfer in der Versuchsanordnung in Millimeterschritten aus dem Horn geführt, erhöhen sich die Resonanzfrequenzen (ausgenommen erstes Maximum, Pedalton) kontinuierlich bis zu einer fixen Position (die Position, in welcher der Stopfdämpfer aus dem Bereich des Schallbechers herausragt, Horn offen). Es ist kein Sprung ersichtlich.

In der Spielpraxis spricht der Hornist oder die Hornistin durch die von ihm oder ihr erzeugte Lippenschwingung die gewünschte Resonanzfrequenz an. Wird die rechte Hand beim Hornspiel eingeführt, wird der Ton tiefer, solange die erzeugte Lippenschwingung die zugehörige Resonanzfrequenz anregt. Ab einem bestimmten Punkt kann die bestehende Lippenschwingung die bisherige Resonanzfrequenz nicht mehr anregen, stattdessen gewinnt die nächstliegende Resonanzfrequenz an Gewicht und der Spieler muss die Lippenspannung den akustischen Gegebenheiten anpassen. Dabei springt der gespielte Ton.

Wird im Hornspiel die zweite Resonanzfrequenz gespielt (kleines c in F) und dann der Ton gestopft, so beginnt die Lippenschwingung die dritte Resonanzfrequenz des gestopften Hornes anzuregen. Durch den Wechsel von der zweiten zur dritten Resonanzfrequenz wird der gespielte Ton höher. Die zweite Resonanzfrequenz des gestopften Horns ist zu gering ausgebildet, um die Luftsäule in Schwingung zu bringen. Das Horn wird nicht bis zum gestopften Bereich kontinuierlich tiefer, da die Resonanzfrequenzen immer geringer ausgebildet werden. Daher muss der Ton wegen der zu geringen Resonanzamplituden springen.

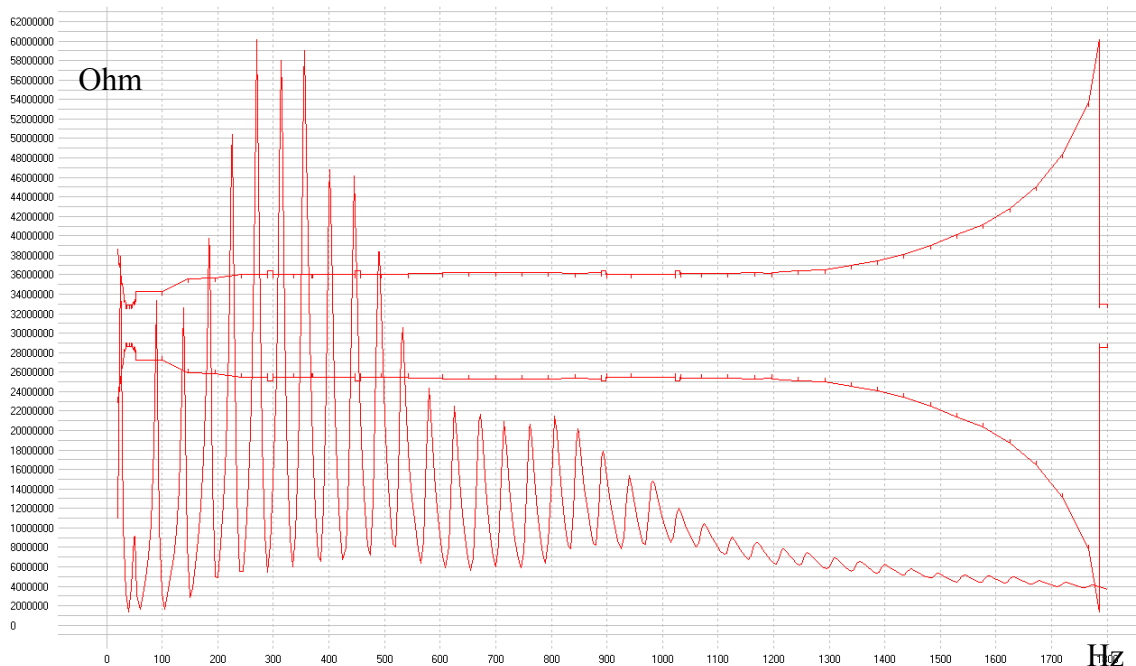
In der Abbildung 126 sind die Spielfrequenzen des offenen Hornes (zweiten bis fünften Resonanzfrequenz) dem gestopften Horn (dritten bis sechsten Resonanzfrequenz) des Spielers gegenüber gestellt. Der Spieler kann mit seiner Lippenspannung zwischen den beiden benachbarten gestopften Resonanzfrequenzen entscheiden. Außer bei der 13. und 15. Resonanzfrequenz des offenen Hornes befindet sich die nächst höhere gestopfte Resonanzfrequenz näher an der offenen als an der tiefer liegenden Resonanzfrequenz.



**Abbildung 126 :** Spielfrequenz  $F$  Horn, Ventilstellung 0, Vergleich 2., 3., 4., 5., 6. Resonanzfrequenz Horn offen zu den 3., 4., 5., 6., 7. Resonanzfrequenzen Horn mit Stopfdämpfer

### ***Durch welche Adaption kann der Effekt des Stopfens erreicht werden?***

Wird die Hornöffnung des Hornes ohne Schallbecher um 92,3% des Durchmessers verkleinert und ein zylindrisches Rohr von 0.8 % der Instrumentenlänge an das Horn angebracht, erreicht das Horn den Effekt des Stopfens. In der Abbildung 127 ist das Horn ohne Schallbecher mit angeschlossenem zylindrischem Rohr und die zugehörige Impedanzkurve dargestellt. Durch das Anbringen eines zylindrischen Rohres werden die Resonanzfrequenzen soweit erniedrigt, dass die Resonanzfrequenzen die gleiche Position wie im Impedanzverlauf des gestopften Hornes besitzen.



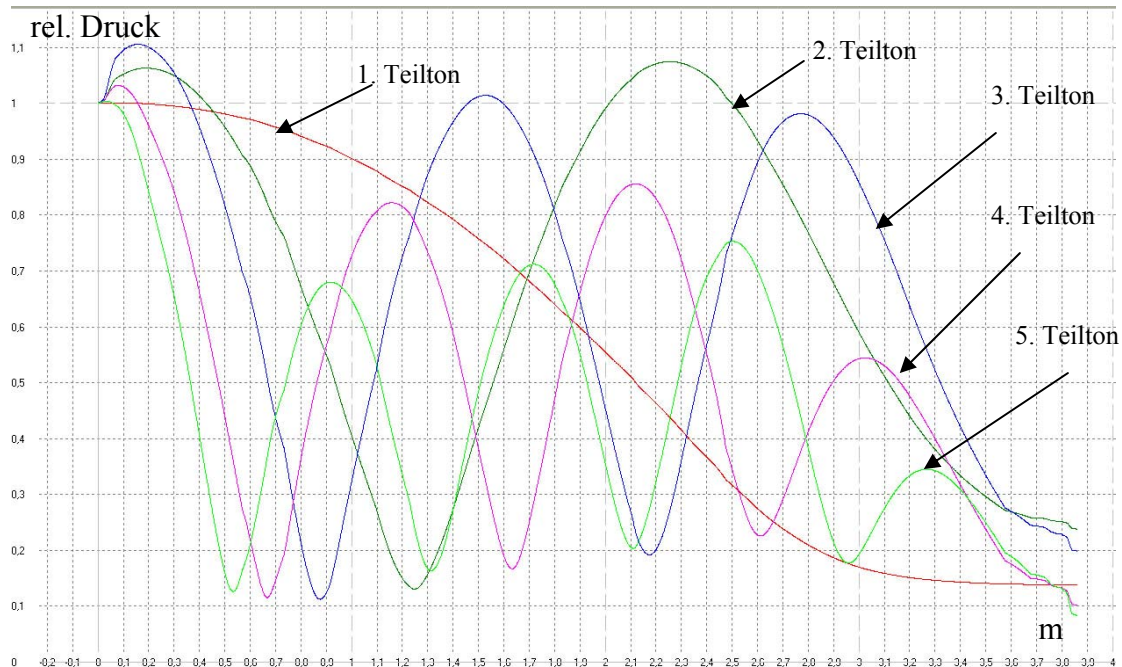
**Abbildung 127 :** Impedanzverlauf F Horn mit Mundstück und zylindrischem Rohr ( $l = 30 \text{ mm}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ )

### ***Was ereignet sich im gestopften Horn?***

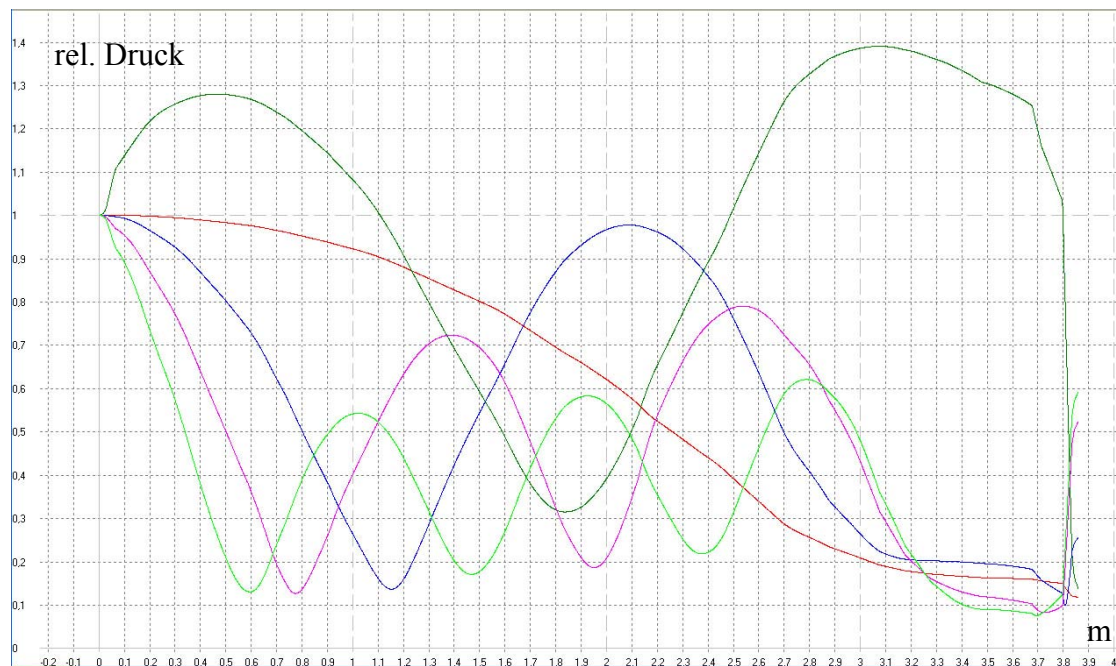
Um das Innenleben des Hornes im gestopften Bereich zu untersuchen, musste der Druckverlauf im Instrument berechnet werden. In Abbildung 128 und 145 ist der Druckverlauf des F Hornes ohne Hand (A) mit dem F Horn mit Stopfdämpfer (B) gegenübergestellt. In der Darstellung sind jeweils die ersten fünf Teiltöne im Instrument abgebildet. Beim Horn ohne wie auch beim Horn mit Stopfdämpfer liegen alle Teiltöne am Mundstückrand bei einem relativen Druck von eins (Druckbauch). Am Schallbecherrand besitzen alle Teiltöne beim offenen Horn ein Druckminimum (Druckknoten). In der Abbildung 129 besitzen nur die ersten zwei Naturtöne am Ende des Instruments einen Druckknoten. Bei den weiteren Naturtönen steigt der Druck am Ende des Instruments, da durch die Verengung des Stopfdämpfers die Ausgangsimpedanz (Abbildung 101) deutlich erhöht ist.

Die Impulsantwort der Eingangsimpedanz aus der Abbildung 122 zeigt eine akustische Verkürzung der Länge des gestopften Hornes, was einer Erhöhung der Tonhöhe entspricht. Da die zweite Resonanzfrequenz bei 55 Hz beim gestopften Horn (Abbildung 124), im Vergleich zu allen weiteren Resonanzfrequenzen zu gering ausgebildet ist, bewirkt diese Resonanzfrequenz ein zu geringes Gewicht in der inversen

Fouriertransformation. Die berechnete Impulsantwort zeigt fälschlicherweise eine Verkürzung der akustischen Länge des gestopften Hornes.



**Abbildung 128 :** Druckverlauf F Horn ohne Hand, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta), 5. Teilton (hellgrün)



**Abbildung 129 :** Druckverlauf F Horn mit Stopfdämpfer, 1. Teilton (rot), 2. Teilton (dunkelgrün), 3. Teilton (blau), 4. Teilton (magenta), 5. Teilton (hellgrün)

## 8 Zusammenfassung - Ausblick

Der Forschungsbereich musikalischer Akustik, im speziellen der Instrumentenakustik, ist seit Jahren ein Bereich erfolgreicher Forschungstätigkeit. So wurden Einschwingvorgänge, Eingangsimpedanzen verschiedener Hörner erforscht. Das „gestopfte Horn“ ist seit einigen Jahren Gegenstand des wissenschaftlichen Diskurses, insbesondere in der Fachzeitschrift „Horn Call“. Fundierte Messungen bzw. Berechnungen lagen bislang jedoch nicht vor. Am Institut für Wiener Klangstil gelang es nun, sich dieses Forschungsbereichs anzunehmen. Das gestopfte Horn wurde durch Impedanz- und Übertragungsfunktionsmessungen akustisch untersucht. Mit einem speziellen Messaufbau konnte des weiteren der Stopfvorgang dynamisch betrachtet werden. Die Position der Druckbäuche und Knoten berechnete das Software – Programm „Optimierer“. Mit dieser Software konnte abschließend ein vereinfachtes Modell des gestopften Hornes konstruiert werden. Ergebnisse dieser Untersuchungen und Simulationen sind zentrale Erkenntnisse zu physikalischen Vorgängen im Instrument. Die Tonhöhe erniedrigt sich beim Stopfen und beim Übergang zwischen dem offenen und gestopften Horn gibt es keinen Sprung. In der Spielpraxis ist jedoch ein Sprung wahrzunehmen, da die Lippen- spannung klein ausgebildete Resonanzen nicht anregen kann und daher zur nächstliegenden Resonanzfrequenz springen muss, die meistens eine höhere Frequenz besitzt.

Im Forschungsbereich „Horn“ ergeben sich noch weitere offene Forschungsfelder, die in weiteren wissenschaftlichen Bearbeitungen untersucht werden können. Die Fragestellungen können lauten:

- Wie verhält sich die Lippen- spannung von offen zu gestopftem Horn?
- Erklärungsmodelle zur Interpretation der Übertragungsfunktion und des Druckverlaufs eines gestopften Horns
- Modalanalyse eines gestopften Horns
- Untersuchungen zur Konstruktion eines optimalen Stopfdämpfers
- Klanganalyse des gestopften Horns

## 9 Literaturverzeichnis

**Aebi, Willi:** *Stopped Horn*, in: The Horn Call Vol. 6, No. 2, Seite 47 - 49, Mai 1976.

**Aebi, Willi:** *Das Waldhorn und seine innere Akustik*, in: Schweizer Bauzeitung, 87. Jahrgang, Heft 38, Seite 1 - 9, 18.9.1969.

**Ahrens, Christian:** *Geschichte des Horns, seiner Spieltechnik und musikalischen Nutzung*, Die Musik in Geschichte und Gegenwart, Allgemeine Enzyklopädie der Musik, Band 4, Seite 375 – 395, Stuttgart 1996.

**Anglmayer, Paul:** *Messung der akustischen Eingangsimpedanz von Blechblasinstrumenten*, Diplomarbeit 2001, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

**Ayers D. R., Eliason L. J., Mahgerefteh D.:** *The conical bore in musical acoustics*, in: American Association of Physics Teachers, Vol. 53, Seite 528 - 537, Juni 1985.

**Benade, A. H.:** *Equivalent circuits for conical waveguides*, in: Acoustical Society of America, Vol. 83, Nr. 5, Seite 1764 - 1769, Mai 1988.

**Benade, A. H.:** *On the Propagation of Sound Waves in a Cylindrical Conduit*, in: Acoustical Society of America, Vol.44, Nr. 2, Seite 616 - 623, April 1968.

**Bertsch, Matthias.:** *Der Einfluss des Dämpfers an das akustische Verhalten und der Klangfarbe der Trompete*, Diplomarbeit 1993, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

**Carral, Sandra:** *Relationship between the physical parameters of musical wind instruments and the psychoacoustic attributes of the produced sound*, PhD Dissertation 2005, University of Edinburgh.

**Earnest, Christopher:** *The Horn: Stopped, Muted, and Open*, in: The Horn Call, Vol. 7, Nr. 2, Seite 34 - 46, 1977.

**Emmerich, Bianka:** *Der Einfluss des Mundstücks auf die Intonation beim Wiener F Horn*, Diplomarbeit 1999, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

- Fletcher N. H., Rossing T. D.:** *The Physics of Musical Instruments*, New York 1998.
- Fröhlich, Joseph:** *Hornschule*, Hamburg 1810.
- Holmes, Peter:** *Frühgeschichte, Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, Allgemeine Enzyklopädie der Musik, Band 4, Seite 361 - 368, Verlag Bärenreiter Metzler, Stuttgart 1996.
- Janetzky, Kurt:** *Zur Problematik des Hornblasens in der Clarinlage, Aus der Werkstatt eines Hornisten*, Seite 87 – 92, Wien 1993.
- Kausel, Wilfried:** *A Musical Acoustician's Guide to Computational Physics*, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, Wien 2003.
- Keefe, Douglas H.:** *Acoustical wave propagation in cylindrical ducts: Transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions*, in: Acoustical Society of America, Vol. 75, Nr. 1, Seite 58 -62, 1984.
- Kuttruff, Heinrich:** *Akustik, eine Einführung*, Stuttgart 2004.
- Mapes-Riordan, Dan:** *Horn Modeling with Conical and Cylindrical Transmission - Line Elements*, in: Audio Eng. Soc. Vol 41, No. 6, Seite 471 - 481, Juni 1993.
- Morley, R. Pegge:** *The French Horn*, New York 1973.
- Merewether, Richard:** *"Bad Notes" in Horns*, in: The Horn Call Vol. 7, No. 1, Seite 45 - 59, Mai 1975.
- Merewether, Richard:** *Even more about open & stopped Horns*, in: The Horn Call Vol 7, No. 1, Seite 28, November 1976.
- Meyer, Jürgen:** *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Frankfurt am Main 1972.
- Mozart W. A:** *Briefe u. Aufzeichnungen*, Kassel 1962-75.
- Pyle, Robert:** *Audiopyle, Factitious Tones and Hand - Stopping*, in: The Horn Call, Vol. 21, Nr. 1, Seite 36 – 43, Oktober 1990.

**Pyle, Robert:** *Effective length of horns*, in: Acoustical Society of America Vol. 57, No. 6, Part. 1, Seite 1309 - 1317, Juni 1975.

**Schütz, Iris:** *Jagdhorn, Wiener Horn, Doppelhorn – in der Geschichte des Wiener Waldhornvereins*, Diplomarbeit 1983, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien.

**Walstijn van, Maarten:** *Discrete- Time Modelling of Brass and Reed Woodwind Instruments with Application to Musical Sound Synthesis*, PhD Dissertation 2002, University of Edinburgh.

**Widholm, Gregor:** *Akustik der Horninstrumente, Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, Allgemeine Enzyklopädie der Musik, Band 4, Seite 395 – 414, Stuttgart 1996.

**Widholm, Gregor:** *The Vienna Horn – a historic relict successfully used by top orchestras of the 21. century*, in: Forum Acousticum, Budapest 2005.

**Winkler, Klaus:** *Physik der Musikinstrumente*, Heidelberg 1988.

### **Handbuch**

**BIAS:** *Brass Instrument Analysis System Handbuch*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.

**Optimierer:** *Handbuch Optimierer*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2002.

**VIAS:** *Versatile Instrument Analysis System Handbuch*, Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien 2007.

### **Notenmaterial**

**Beethoven van, Ludwig:** *Sinfonie Nr. 3 op. 55 -Eroica-*, Hrsg. Igor Markevitch, Frankfurt am Main 1872.

**Beethoven van, Ludwig:** *Sinfonie Nr. 7 op. 92*, Edition C.F.Peters, Hrsg. Igor Markevitch, Frankfurt am Main 1872.



**Wagner, Richard:** *Der fliegende Holländer*, Romantische Oper in drei Aufzügen - Urfassung 1841 (WWV 63), Hrsg. Isolde Vetter und Egon Voss, Bad Bramstedt.

**Wagner, Richard:** *Lohengrin*, Oper in 3 Akten WWV 75, Frankfurt am Main, 1914.

**Wagner, Richard:** *Rienzi, der Letzte der Tribunen*, Große tragische Oper in fünf Akten, WWV 49 (1838 - 1840), Mainz.

**Wagner, Richard:** *Tannhäuser und der Sängerkrieg auf Wartburg*, Oper in 3 Akten WWV 70, Mainz 1875.

**Wagner, Richard:** *Tristan und Isolde*, Oper in 3 Akten WWV 90, Frankfurt am Main, 1914.

### Webseite

**Konzertplakat:** Robert Ostermayer Musikedition, aufgerufen am 10.3.2008  
<http://www.corno.de/leipzig/2331843.htm>.

**Labialpfeife:** Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/2/25/Schema\\_Labialpfeife-2.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/2/25/Schema_Labialpfeife-2.jpg).

**Polsterpfeife:** Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Polsterpfeife.jpg>.

**Stehende Welle:** Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Stehendewelle.PNG>.

**Lingualpfeife:** Freundeskreis Kollegiorgel Schwyz, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://www.kollegiorgel.ch/lexikon\\_uebersicht.html?&tx\\_rhuglossary\\_pi1%5Bentry%5D=248&cHash=ca3288aea7](http://www.kollegiorgel.ch/lexikon_uebersicht.html?&tx_rhuglossary_pi1%5Bentry%5D=248&cHash=ca3288aea7).

**Stopfdämpfer:** Wikipedia, die freie Enzyklopädie, aufgerufen am 24.6.2008  
[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer\\_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Waldhornstopfer_querliegend.jpg&filetimestamp=20061218132038).

**Stopfdämpfer:** aufgerufen am 7.7.2008, [http://www.musiktirol.com/tom\\_crown\\_waldhorn\\_stopfdaempfer\\_messing\\_webshop\\_art\\_430028.html](http://www.musiktirol.com/tom_crown_waldhorn_stopfdaempfer_messing_webshop_art_430028.html).

**Holzdämpfer:** aufgerufen am 7.7.2008 [http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1.html](http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182_1.html).

**Straight Dämpfer:** aufgerufen am 7.7.2008 [http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1.html](http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182_1.html).

**Übungsdämpfer 5530:** aufgerufen am 7.7.2008 [http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182\\_1-2.html](http://www.musicworldbrilon.de/metallblasinstrumente/Daempfer---182_1-2.html).

**Übungsdämpfer Silent Brass:** aufgerufen am 7.7.2008  
[http://www.woodwindandbrass.co.uk/acatalog/yamaha\\_sb3-9\\_frenchhorn.jpg](http://www.woodwindandbrass.co.uk/acatalog/yamaha_sb3-9_frenchhorn.jpg).

## 10 Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1 : Cor de chasse - trompe de chasse - Parforcehorn, ab 1680.....                                                | 3  |
| Abbildung 2 : Inventionshorn mit verschiedenen austauschbaren Stimmzügen, um 1800<br>.....                                 | 5  |
| Abbildung 3 : Orchester-Waldhorn mit mehreren Inventionsbögen.....                                                         | 5  |
| Abbildung 4 : Naturtonreihe, 1. bis 16. Teilton .....                                                                      | 6  |
| Abbildung 5: Offen (links) und gestopft (rechts).....                                                                      | 7  |
| Abbildung 6: Wolfgang Amadeus Mozart, Ausschnitt aus der G - Dur Sinfonie, Satz<br>Scherzo/Trio KV 550, Horn 1 und 2 ..... | 7  |
| Abbildung 7 : Guiseppe Verdi, Ausschnitt aus Don Carlo, 1. Akt, Horn 1-4.....                                              | 9  |
| Abbildung 8: Pumpventil von Stölzel, 1818 .....                                                                            | 10 |
| Abbildung 9 : Konzertplakat der Brüder Lewy .....                                                                          | 12 |
| Abbildung 10 : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 4, 1. Satz, 1. Horn ....                                     | 13 |
| Abbildung 11 : Carl Maria von Weber Ausschnitt aus dem 1. Klarinettenkonzert, Horn<br>1-3 .....                            | 14 |
| Abbildung 12 : Stopfdämpfer .....                                                                                          | 15 |
| Abbildung 13 : Holzdämpfer 5554, Firma Denis Wick .....                                                                    | 16 |
| Abbildung 14 : Straight Dämpfer 5524 , Firma Denis Wick.....                                                               | 16 |
| Abbildung 15 : Übungsdämpfer 5530, Denis Wick .....                                                                        | 17 |
| Abbildung 16 : Übungsdämpfer Silent Brass .....                                                                            | 17 |
| Abbildung 17 : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 7, 2. Satz, Horn 1-4 ..                                      | 18 |
| Abbildung 18 : Gustav Mahler, Ausschnitt aus der Sinfonie Nr. 9, 1. Satz, 2. Horn ....                                     | 19 |
| Abbildung 19 : Alexander Porfirjewitsch Borodin, Ausschnitt aus den Plowitz Tänze<br>von Fürst Igor, 4. Horn .....         | 19 |
| Abbildung 20 : F Horn mit Mundstück .....                                                                                  | 20 |
| Abbildung 21 : Lippenpfeife .....                                                                                          | 21 |
| Abbildung 22 : Zungenpfeife .....                                                                                          | 21 |
| Abbildung 23 : Funktionsprinzip einer Polsterpfeife .....                                                                  | 22 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 24 : Funktionsschema Musikinstrument.....                                                                              | 22 |
| Abbildung 25 : Stehende Welle bei geschlossenem Ende.....                                                                        | 23 |
| Abbildung 26 : Druckverlauf links geschlossene zyl. Rohr, rechts offenes zyl. Rohr...                                            | 31 |
| Abbildung 27 : Schnelleverlauf offene – gedeckte Pfeife.....                                                                     | 32 |
| Abbildung 28 : Übertragungsfunktion zylindrisches Rohr .....                                                                     | 33 |
| Abbildung 29 : Thermische Verluste im zylindrischen Rohr.....                                                                    | 34 |
| Abbildung 30: Konisches Rohr .....                                                                                               | 34 |
| Abbildung 31 : Druckverlauf Links offenes konisches Rohr, rechts geschlossenes<br>konisches Rohr .....                           | 37 |
| Abbildung 32 : Übergang vom zylindrischen zu konischen Rohr .....                                                                | 37 |
| Abbildung 33 : Übertragungsfunktion konisches Rohr.....                                                                          | 38 |
| Abbildung 34 : Ausbreitungskonstante $\Gamma$ für zylindrisches Rohr (a) und konisches Rohr<br>(b) .....                         | 39 |
| Abbildung 35 : Thermische Verluste (Betrag der Übertragungsfunktion) im konischen<br>Rohr .....                                  | 40 |
| Abbildung 36 : Scheibenmodell an einem Schallbecher, mit zylindrischen<br>Rohrelementen (a) und konischen Rohrelementen (b)..... | 41 |
| Abbildung 37 : Übertragungsfunktion zylindrisches und konisches Rohr.....                                                        | 42 |
| Abbildung 38 : Besselhorn 0 bis 2. Ordnung .....                                                                                 | 43 |
| Abbildung 39 : Impedanzverlauf im Horn .....                                                                                     | 44 |
| Abbildung 40 : Horngleichungen des Schallbechers.....                                                                            | 45 |
| Abbildung 41: Funktionsprinzip Eingangsimpedanzmessung mittels hochohmiger<br>Quelle .....                                       | 47 |
| Abbildung 42 : Ersatzschaltbild Eingangsimpedanzmessung.....                                                                     | 47 |
| Abbildung 43 : Funktionsprinzip Übertragungsfunktionsmessung.....                                                                | 48 |
| Abbildung 44 : BIAS Messkopf.....                                                                                                | 49 |
| Abbildung 45 : Messkopf Innenleben .....                                                                                         | 50 |
| Abbildung 46 : Messaufbau BIAS .....                                                                                             | 50 |
| Abbildung 47 : Beispiel einer Impulsantwort .....                                                                                | 51 |

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 48 : Horn mit Stopfdämpfer und Horn mit Hand gestopft .....                                                                                          | 52 |
| Abbildung 49 : Stopfdämpfer .....                                                                                                                              | 52 |
| Abbildung 50 : Messanordnung Stopfdämpfer .....                                                                                                                | 53 |
| Abbildung 51 : Eingangsimpedanz Stopfdämpfer.....                                                                                                              | 54 |
| Abbildung 52 : Mundstück Hermann Ebner .....                                                                                                                   | 55 |
| Abbildung 53 : F/B Doppelhorn E. Schmid mit H. Ebner Mundstück .....                                                                                           | 55 |
| Abbildung 54 : Handhaltung des Horns mit der rechten Hand .....                                                                                                | 56 |
| Abbildung 55 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (rot), Horn<br>ohne Hand (blau) .....                                                  | 57 |
| Abbildung 56 : wirksame Luftsäulenlänge abhängig von der Grifflochgröße.....                                                                                   | 58 |
| Abbildung 57: Impulsantwort F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (rot) und ohne<br>Hand (blau) .....                                                        | 58 |
| Abbildung 58 : Eingangsimpedanz Ventilstellung 0, F Horn (blau), B Horn (rot).....                                                                             | 59 |
| Abbildung 59 : Horn ohne Schallbecher .....                                                                                                                    | 60 |
| Abbildung 60 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (grün),<br>Horn ohne Hand (rot), Horn ohne Schallbecher (blau) .....                   | 60 |
| Abbildung 61 : Impulsantwort F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Hand (grün), Horn<br>ohne Hand (rot), Horn ohne Schallbecher (blau) .....                      | 61 |
| Abbildung 62 : Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer .....                                                                                                   | 62 |
| Abbildung 63 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer<br>(blau), Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer (rot) .....                 | 62 |
| Abbildung 64 : Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau),<br>Horn ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer (rot) .....                   | 63 |
| Abbildung 65 : Eingangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer<br>ohne Schallbecher (blau), Horn offene Schallbecher (rot).....               | 64 |
| Abbildung 66 : Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne<br>Schallbecher (blau), Horn offene Schallbecher (rot).....                 | 64 |
| Abbildung 67 : Eingangsimpedanz, B Horn, Ventilstellung 0, Horn mit offenen<br>Schallbecher (blau), Horn mit Stopfdämpfer (rot) .....                          | 65 |
| Abbildung 68 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit<br>transponierenden Dämpfer (blau), Horn mit nicht transponierendem Dämpfer (rot)<br>..... | 66 |

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 69 : Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit nicht transponierenden Dämpfer (hellblau), Horn mit transponierendem Dämpfer (rot), Horn mit rechter Hand (blau) ..... | 66 |
| Abbildung 70 : Aufbau Messung Übertragungsfunktion .....                                                                                                                                | 68 |
| Abbildung 71 : Messkopf mit integriertem Messmikrofon .....                                                                                                                             | 68 |
| Abbildung 72 : Schaltplan Messung Übertragungsfunktion .....                                                                                                                            | 69 |
| Abbildung 73 : Übertragungsfunktion, F Horn, Ventilstellung 0 .....                                                                                                                     | 70 |
| Abbildung 74 : Übertragungsfunktion, F Horn ohne Schallbecher, Ventilstellung 0 ....                                                                                                    | 70 |
| Abbildung 75 : Übertragungsfunktion, F Horn mit Stopfdämpfer, Ventilstellung 0 .....                                                                                                    | 71 |
| Abbildung 76 : Übertragungsfunktion, F Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher , Ventilstellung 0, .....                                                                                | 71 |
| Abbildung 77 : Messaufbau Horn gestopft bis offen .....                                                                                                                                 | 72 |
| Abbildung 78 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, von gestopft bis 5 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Ausgang des Schallbechers .....                                          | 73 |
| Abbildung 79 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, von gestopft bis 25 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Ausgang des Schallbechers .....                                         | 74 |
| Abbildung 80 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, 3 D Ansicht von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers zur Schallbecheröffnung.....                                     | 75 |
| Abbildung 81 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, 3 D Ansicht von gestopft bis 30 mm Abstand des Stopfdämpfers zur Schallbecheröffnung.....                                    | 75 |
| Abbildung 82 : Resonanzmaxima (Frequenzbereich) von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Schallloch.....                                                                     | 76 |
| Abbildung 83 : Resonanzmaxima (Amplitudenbereich) von gestopft bis 9 mm Abstand des Stopfdämpfers vom Schallloch .....                                                                  | 76 |
| Abbildung 84 : Resonanzmaxima des offenen und gestopften Hornes.....                                                                                                                    | 77 |
| Tabelle 85 : Vergleich Resonanzmaxima, oben: n offen zu n gestopft, unten: n offen zu n+1 gestopft.....                                                                                 | 78 |
| Abbildung 86 : Spielfrequenz des gestopften bis offenen Hornes .....                                                                                                                    | 79 |
| Abbildung 87 : Optimierungsvorgang des Rosenbrock Algorithmus .....                                                                                                                     | 81 |
| Abbildung 88 : Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0 .....                                                                                                               | 82 |
| Abbildung 89 : Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne rechte Hand, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün).....                                             | 82 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 90 : Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher .....                                              | 83 |
| Abbildung 91 : Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer ohne Schallbecher, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün) .....  | 84 |
| Abbildung 92 : Mensurverlauf F-Horn mit Mundstück, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher .....                                                               | 85 |
| Abbildung 93 : Eingangsimpedanz, F-Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher, optimierte Impedanz (rot), gemessene Impedanz (grün).....                    | 85 |
| Abbildung 94 : Druckverlauf Horn ohne Hand .....                                                                                                                | 87 |
| Abbildung 95 : Druckverlauf Horn mit Stopfdämpfer .....                                                                                                         | 88 |
| Abbildung 96 : Druckverlauf Horn ohne Schallbecher .....                                                                                                        | 88 |
| Abbildung 97 : Druckverlauf Stopfdämpfer.....                                                                                                                   | 89 |
| Abbildung 98 : Ausgangsimpedanzmessung F Horn und Mundstück .....                                                                                               | 90 |
| Abbildung 99 : Abstrahlcharakteristik Horn mit Spieler .....                                                                                                    | 91 |
| Abbildung 100 : Ausgangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne rechte Hand .....                                                                         | 92 |
| Abbildung 101 : Ausgangsimpedanz F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer .....                                                                          | 93 |
| Abbildung 102 : Ausgangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn ohne Schallbecher .....                                                                        | 93 |
| Abbildung 103 : Stopfdämpfer .....                                                                                                                              | 94 |
| Abbildung 104 : F Horn mit zylindrischem Rohr (Länge 38 mm, Durchmesser 5,98 mm).....                                                                           | 95 |
| Abbildung 105 : Eingangsimpedanz F Horn, A: Horn mit Stopfdämpfer, B: Horn mit zylindrischem Rohr ( $l = 38 \text{ mm}$ , $d = 5,98 \text{ mm}$ ).....          | 96 |
| Tabelle 106 : Vergleich Resonanzmaxima F Horn mit Stopfdämpfer und F Horn mit zylindrischem Rohr $d = 5,98 \text{ mm}$ , $l = 38 \text{ mm}$ .....              | 97 |
| Tabelle 107 : Tabelle Resonanzmaxima F Horn mit verschiedenem zylindrischen Rohrdurchmesser (konstante Rohrlänge von 38 mm) und F – Horn mit Stopfdämpfer ..... | 98 |
| Abbildung 108 : Impedanzverlauf F Horn mit unterschiedlichem zylindrischen Rohrdurchmesser ( $l = 38 \text{ mm}$ ).....                                         | 99 |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 109 : Eingangsimpedanz F Horn mit zylindrischem Rohr ( $l = 30 \text{ mm}$ , $d = 5 \text{ mm}$ ).....                                                           | 100 |
| Tabelle 110 : Vergleich Resonanzmaxima F Horn mit Stopfdämpfer und F Horn mit zylindrischem Rohr $d = 5 \text{ mm}$ , $l = 30 \text{ mm}$ .....                            | 100 |
| Abbildung 111 : Abmessungen Konus mit zylindrischem Rohr.....                                                                                                              | 101 |
| Abbildung 112 : Eingangsimpedanz konisches ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit zylindrischem Rohr ( $l = 38 \text{ mm}$ , $d = 5,98 \text{ mm}$ )..... | 102 |
| Abbildung 113 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 103 |
| Abbildung 114 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 104 |
| Abbildung 115 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 105 |
| Abbildung 116 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 106 |
| Abbildung 117 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 107 |
| Abbildung 118 : Impedanzverlauf Konus ( $l = 3715.4 \text{ mm}$ , $d = 65,3 \text{ mm}$ ) mit unterschiedlichen zylindrischen Rohrlängen ( $d = 5, 98 \text{ mm}$ ) .....  | 108 |
| Tabelle 119 : Resonanzmaxima mit verschiedener Rohrlänge .....                                                                                                             | 109 |
| Tabelle 120 : Resonanzmaxima Konus mit verschiedenem zylindrischem Rohrdurchmesser .....                                                                                   | 110 |
| Abbildung 121 : Modell Horn mit Stopfdämpfer.....                                                                                                                          | 111 |
| Abbildung 122 : Impulsantwort, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau) und Horn ohne Hand (rot).....                                                        | 112 |
| Abbildung 123 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn offen (rot).....                                                            | 113 |
| Abbildung 124 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn mit Stopfdämpfer (blau), Horn offen (rot).....                                                            | 113 |
| Abbildung 125 : Eingangsimpedanz, F Horn, Ventilstellung 0, Horn gestopft .....                                                                                            | 115 |
| Abbildung 126 : Spielfrequenz F Horn, Ventilstellung 0.....                                                                                                                | 117 |
| Abbildung 127 : Impedanzverlauf F Horn mit Mundstück und zylindrischem Rohr ( $l = 30 \text{ mm}$ , $d = 5 \text{ mm}$ ) .....                                             | 118 |



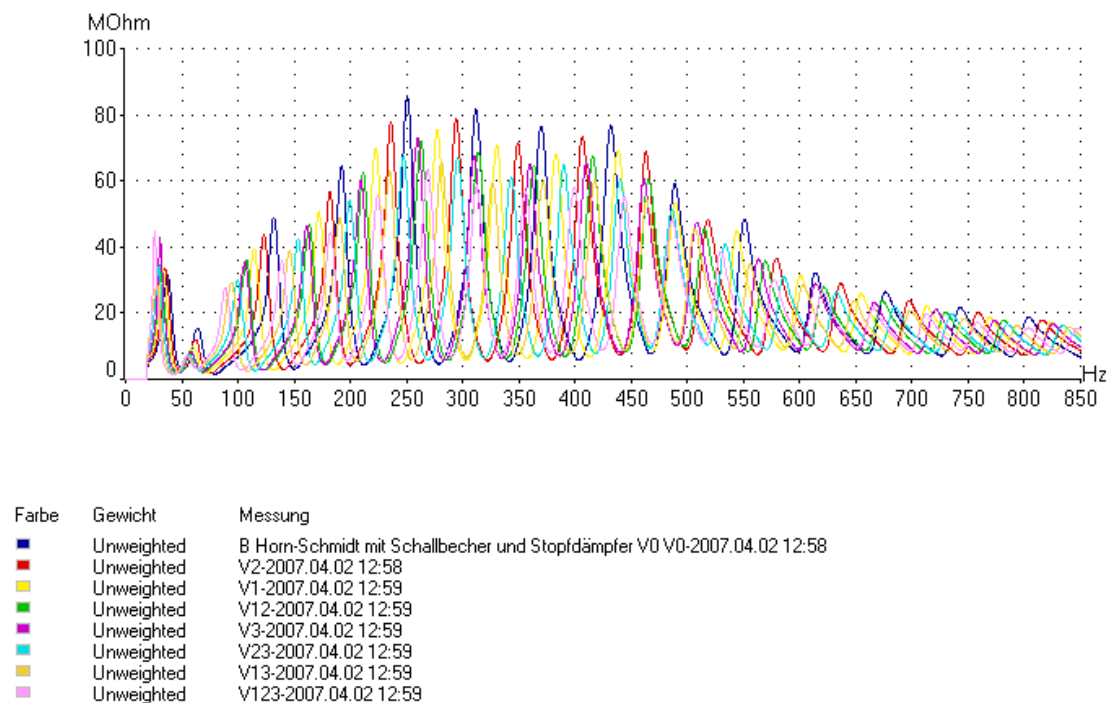
|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 128 : Druckverlauf F Horn ohne Hand.....         | 119 |
| Abbildung 129 : Druckverlauf F Horn mit Stopfdämpfer ..... | 119 |

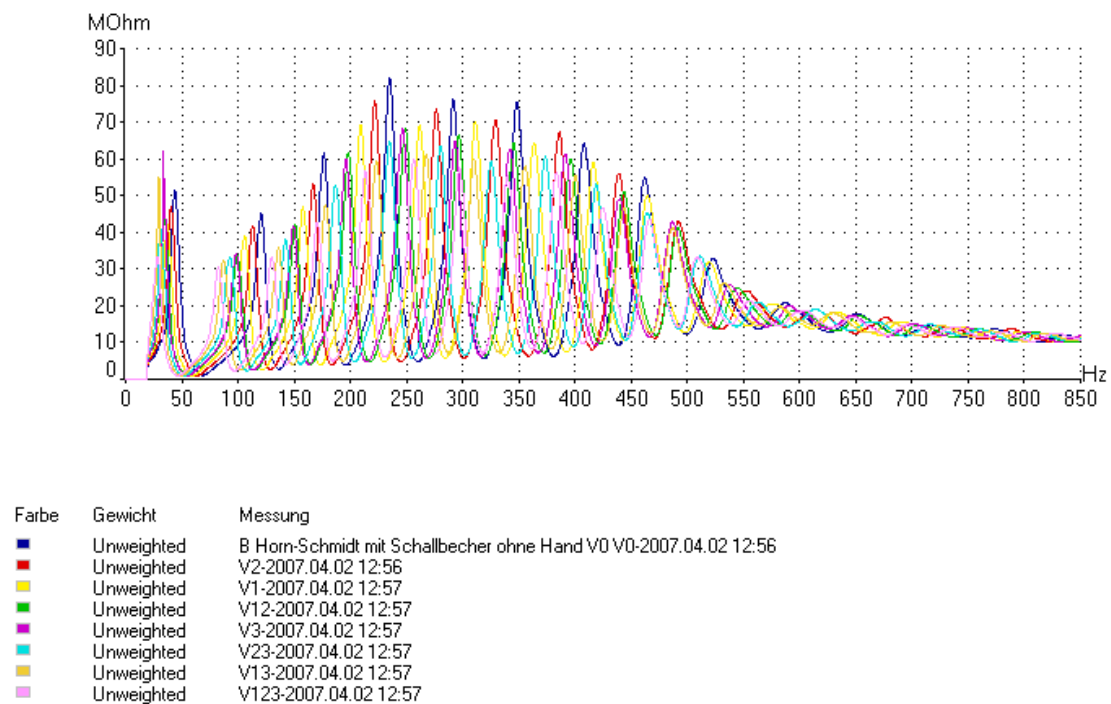
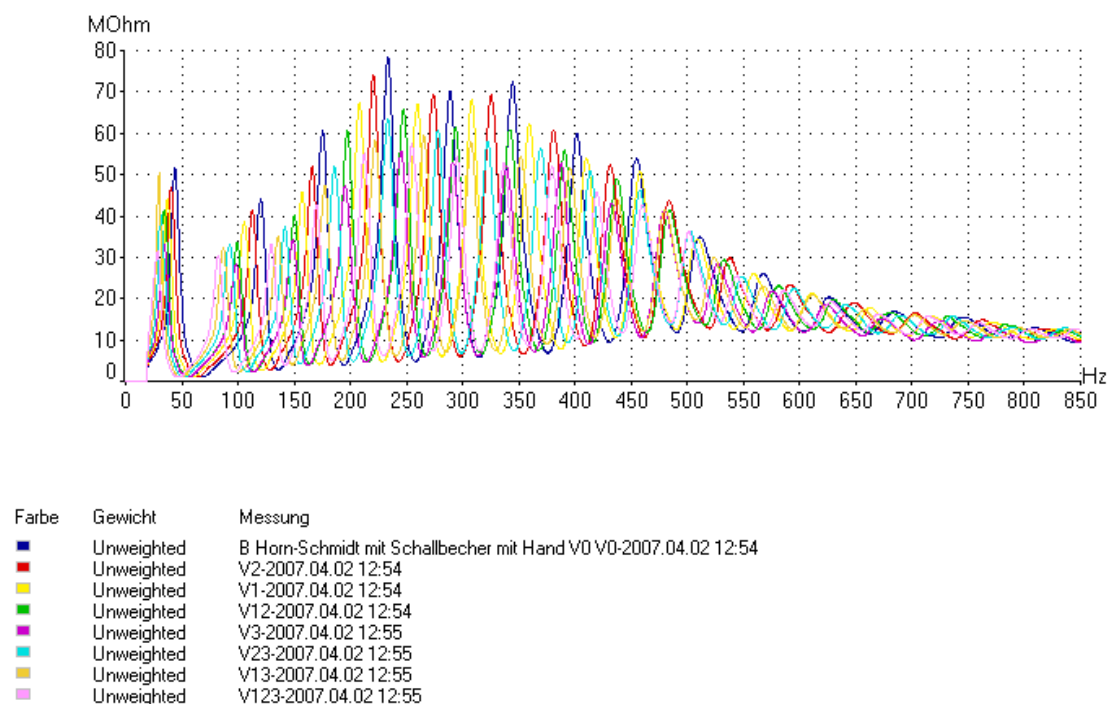
## 11 Anhang

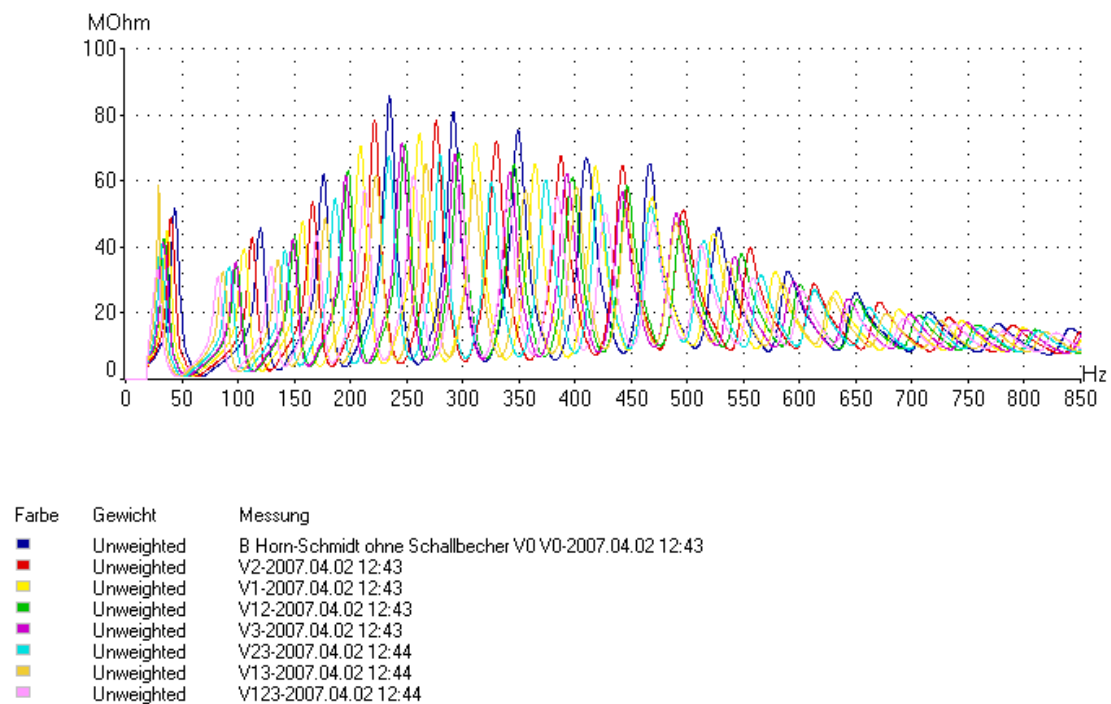
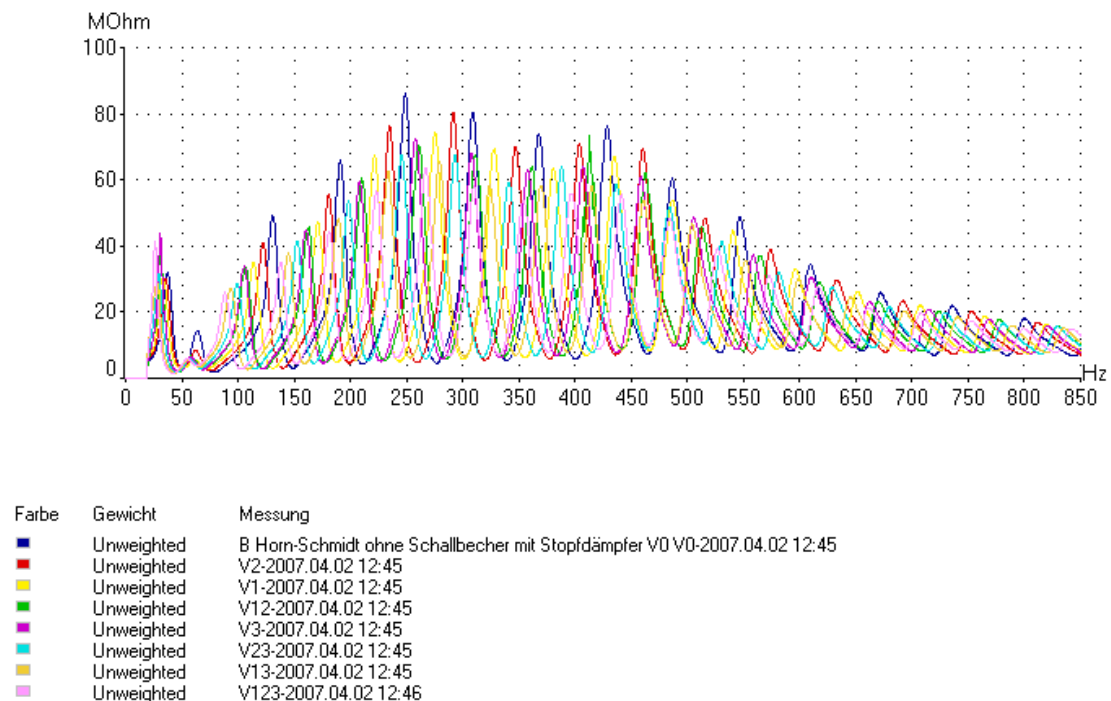
Im Kapitel 11.1 werden die Messdaten des Doppelhorns mit allen Ventilkombinationen dargestellt. In der Legende werden die Ventilkombinationen mit V0, V1, V2, V3, V12, V13, V23, V123 gekennzeichnet.

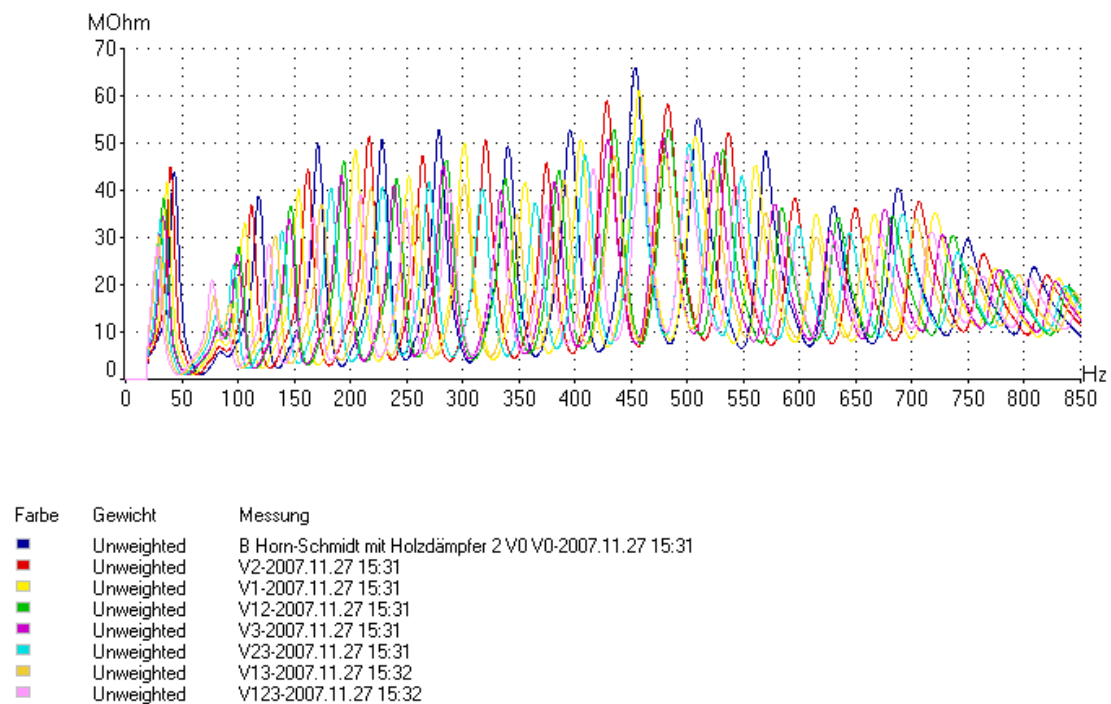
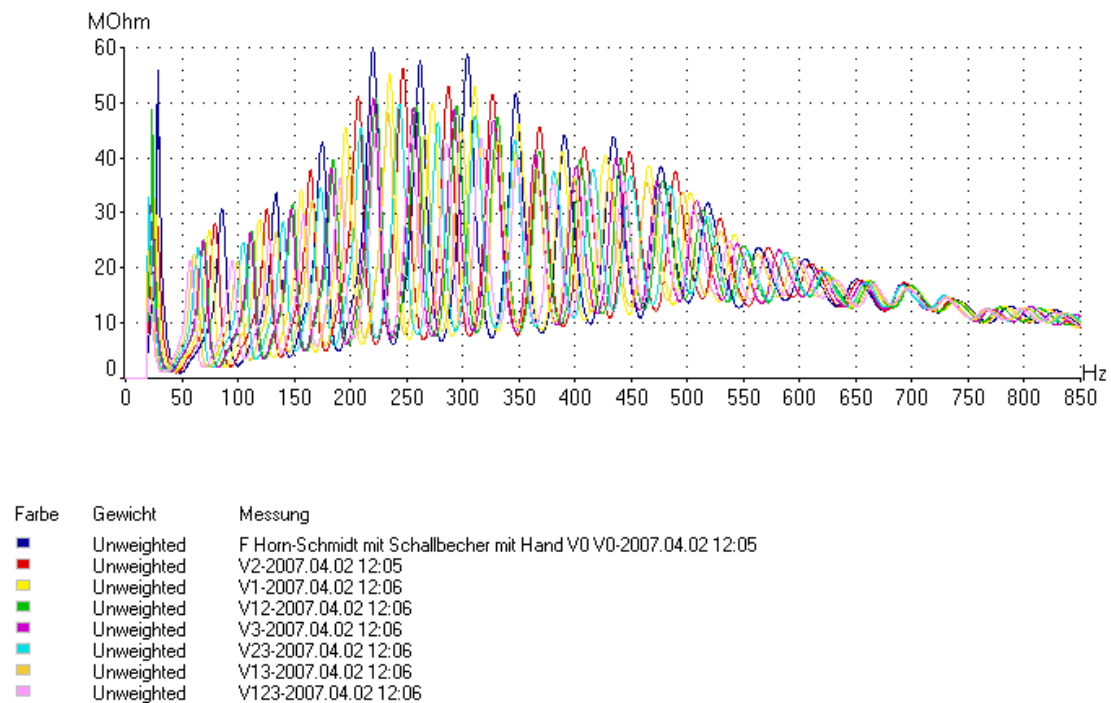
### 11.1 Messdaten Eingangsimpedanz

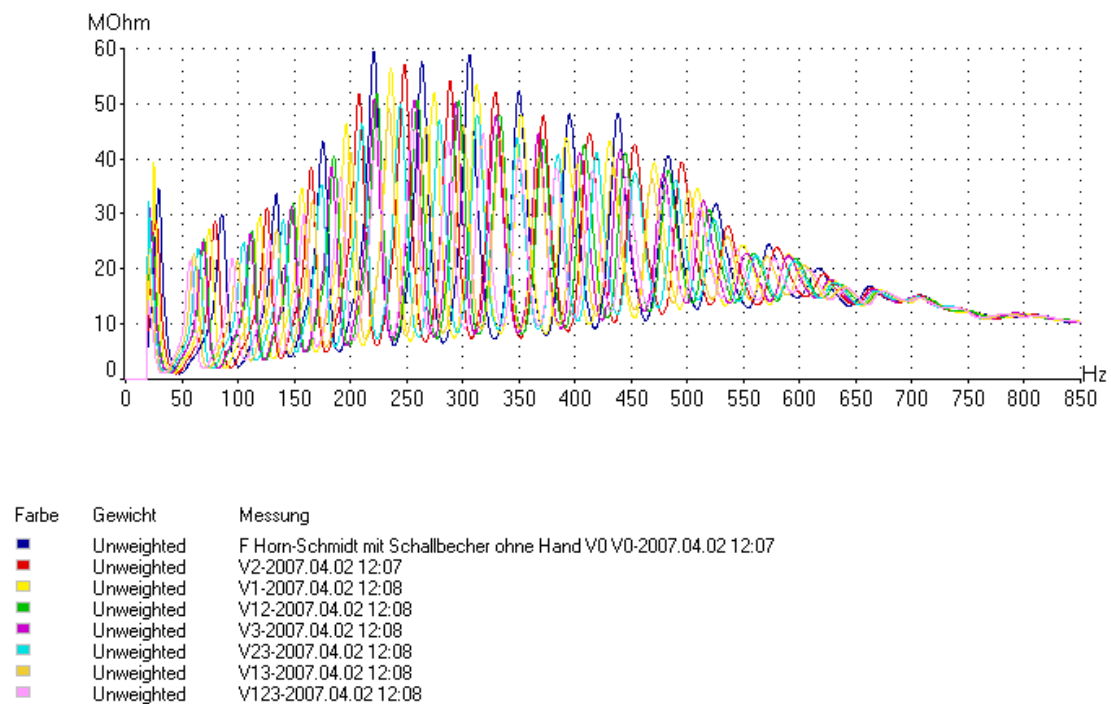
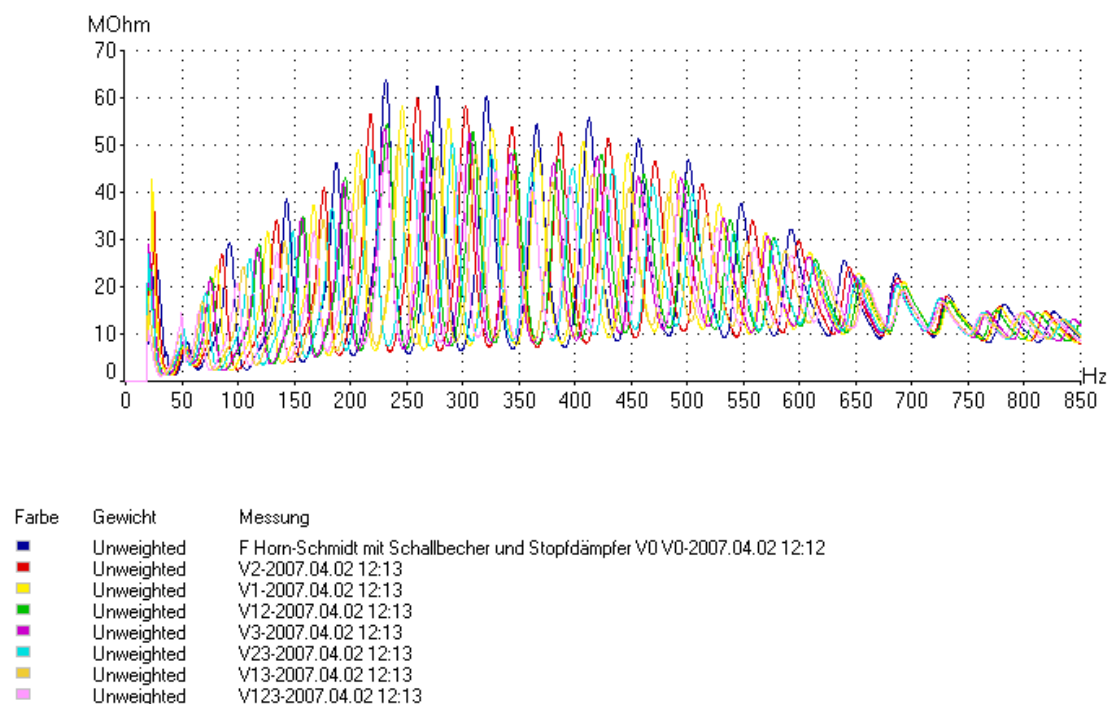
#### *B Horn Schmidt mit Schallbecher und Stopfdämpfer*

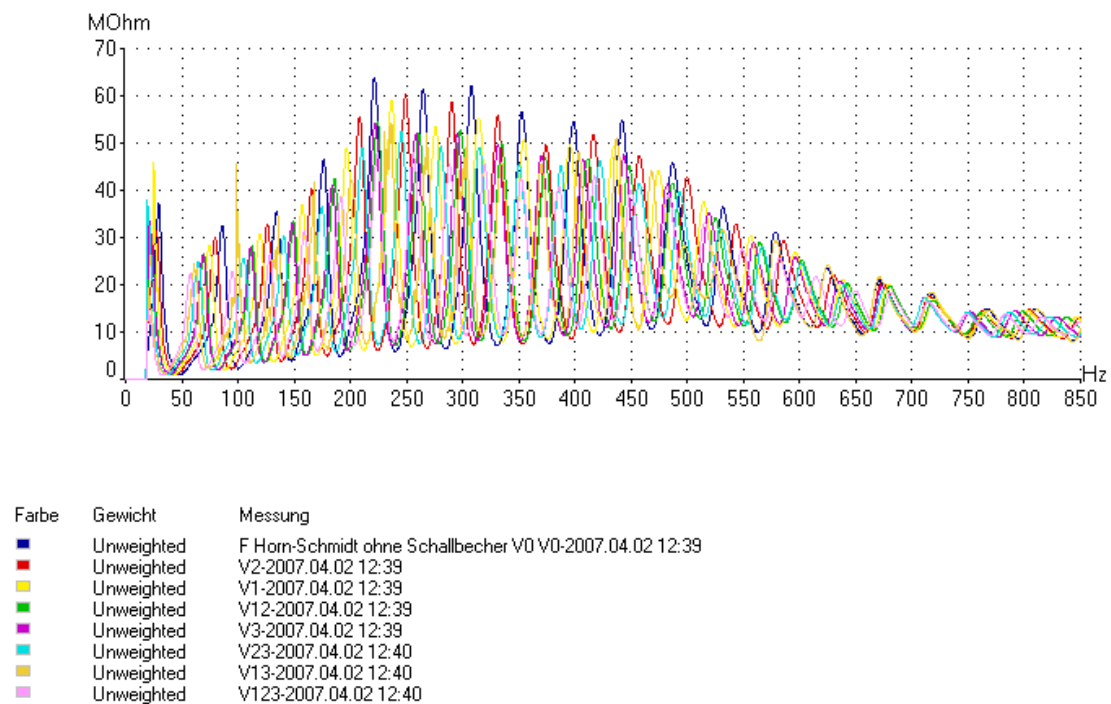
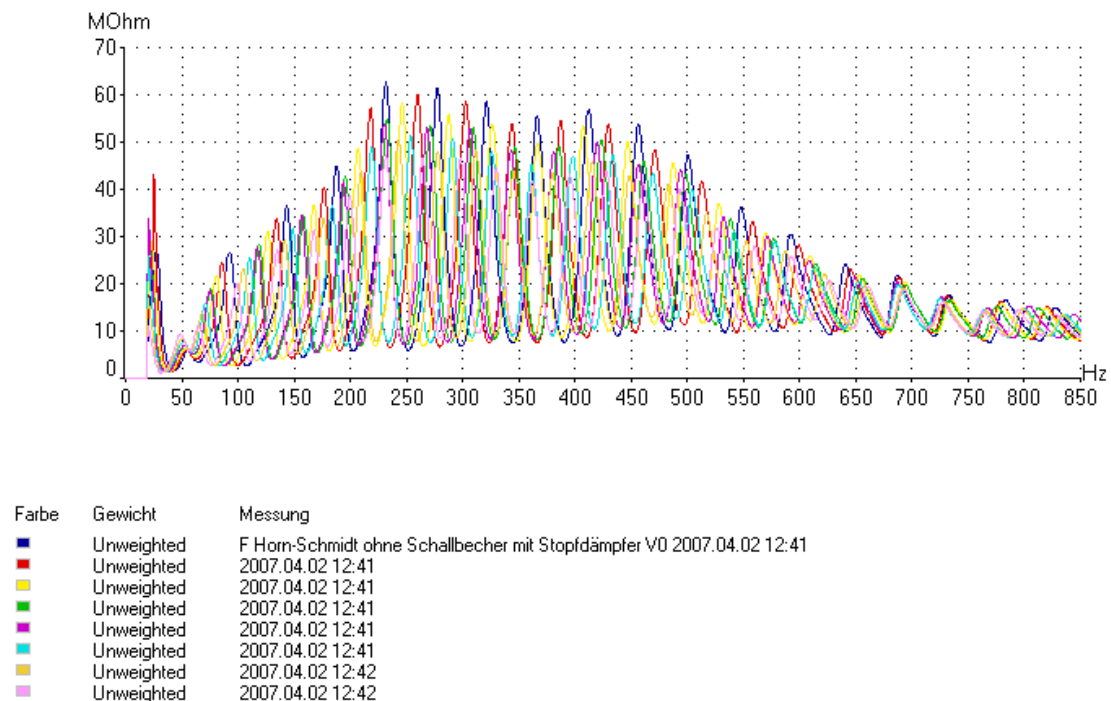


***B Horn Schmidt mit Schallbecher ohne Hand******B Horn Schmidt mit Schallbecher mit Hand***

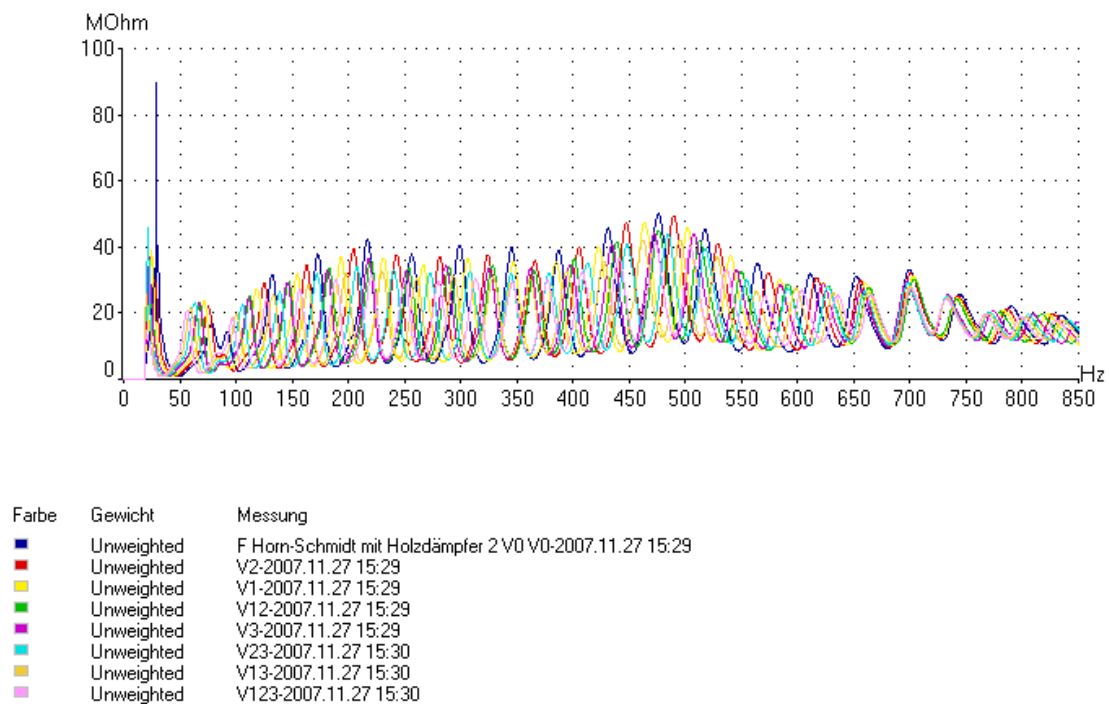
***B Horn Schmidt ohne Schallbecher******B Horn Schmidt ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer***

***B Horn Schmidt mit Holzdämpfer******F Horn Schmidt mit Schallbecher mit Hand***

***F Horn Schmidt mit Schallbecher ohne Hand******F Horn Schmidt mit Schallbecher mit Stopfdämpfer***

***F Horn Schmidt ohne Schallbecher******F Horn Schmidt ohne Schallbecher mit Stopfdämpfer***

### ***F Horn Schmidt mit Holzdämpfer***

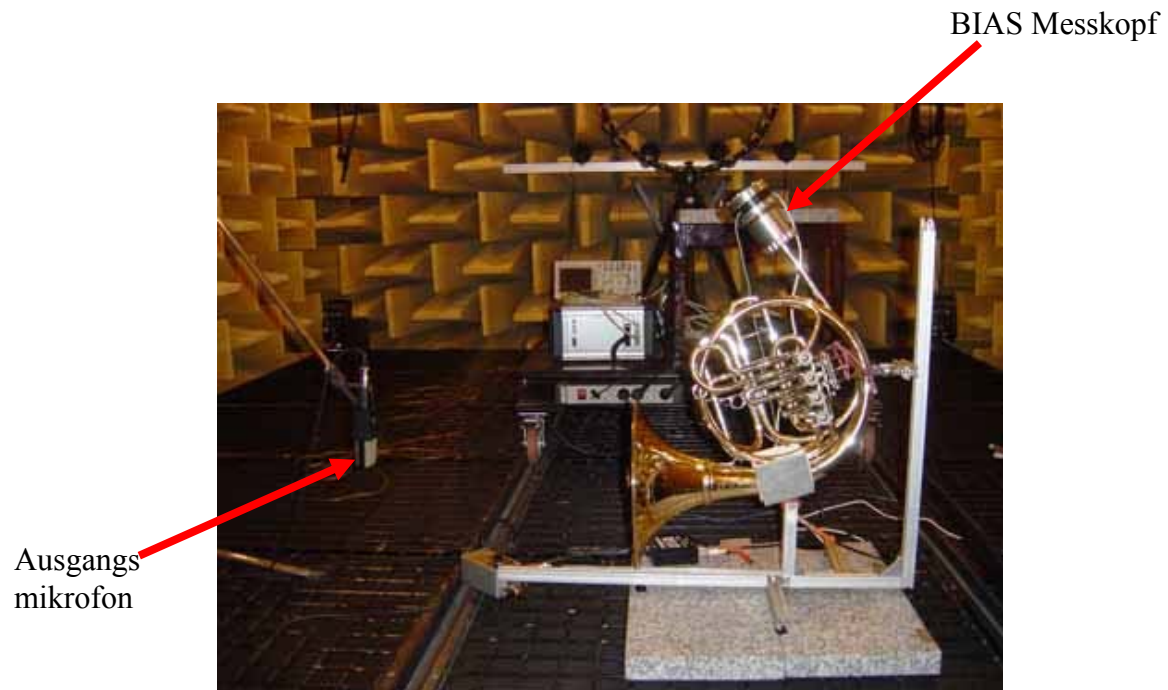


## **11.2 Versuchsaufbauten zur Messung der Übertragungsfunktion**

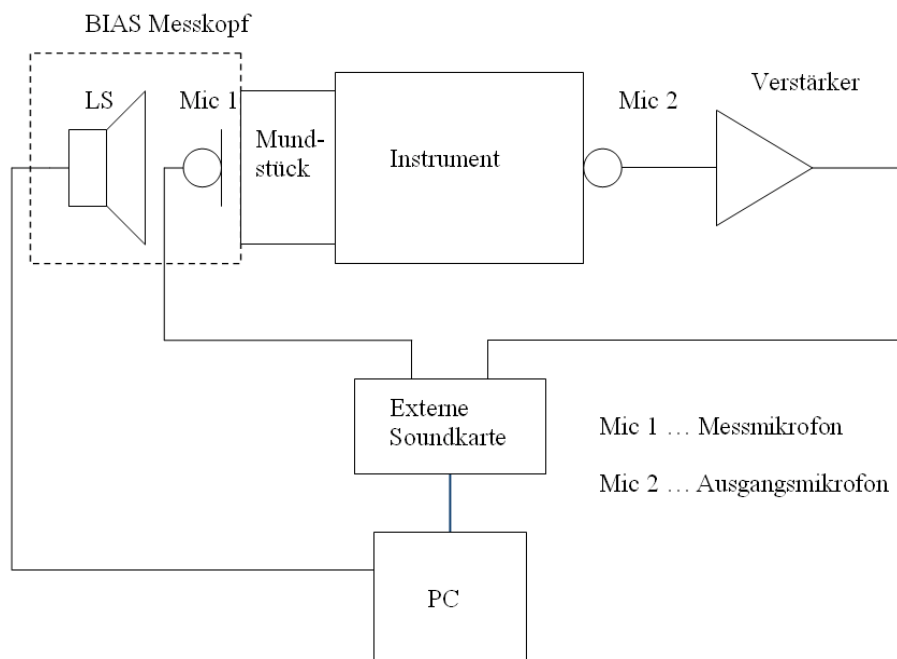
### **11.2.1 Messung mit BIAS Messkopf**

Der erste Messaufbau zur Messung der Übertragungsfunktion wurde mit einem BIAS Messkopf durchgeführt. Im Messkopf befinden sich ein Referenzmikrofon über der Lautsprechermembran und ein Mikrofon zur Messung der Eingangsimpedanz (Abbildung 45). Das Mikrofon am Mundstück wird zur Eingangssignalmessung verwendet. Am Schallbecher ist als Ausgangsmikrofon ein C414 mit einer Nieren Richtcharakteristik der Firma AKG zur Messung des Ausgangssignals platziert.





Aufbau Messung Übertragungsfunktion mit BIAS Messkopf

**Messaufbau mit BIAS Messkopf**

Schaltplan Messung Übertragungsfunktion mit BIAS Messkopf

Das Ausgangssignal am Ende des Instruments wird mit dem Verstärker Preamp mpa 2017 verstärkt. Das gemessene Messsignal am Messmikrofon Mic 1, am Eingang des Instruments, wird aus dem BIAS Messkopf separat herausgeführt und wie auch das Ausgangssignal mit der externen Audio Soundkarte verbunden. Der Lautsprecher LS (Erregersignal), sowie die externe Audio Soundkarte sind über ein USB Kabel mit dem PC verbunden.

### **Verwendete Komponenten**

|                    |                                                                |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| Mundstück          | H. Ebner                                                       |
| Instrument         | F/B Doppelhorn Engelbert Schmid                                |
| Stopfdämpfer       | Professional Products aS                                       |
| BIAS Messkopf      | Institut für Wiener Klangstil, Univ. f. Musik u. d. Kunst Wien |
| Mic2               | AKG C414 Niere                                                 |
| Verstärker         | Preamp mpa 2017                                                |
| Externe Soundkarte | Waveterminal U2A USB Audiointerface 24 bit                     |

Die Messung des Hornes mit Stopfdämpfer musste vorzeitig abgebrochen werden. Am Ausgang konnte kein brauchbares Signal gemessen werden, da das Lautsprechersignal durch das Messmikrofon am Mundstück begrenzt ist. Das gemessene Messsignal am Mundstück übersteuerte, bevor ein brauchbares Ausgangssignal ohne Rauschanteil entstehen konnte.

### **11.2.2 Messung mit Sirene**

Da das interne Mikrofon im BIAS Messkopf keine hohen Pegel erlaubte, wurde für die Anregung anstatt des Messkopfs eine Sirene mit Druckluft an das Mundstück angeschlossen.

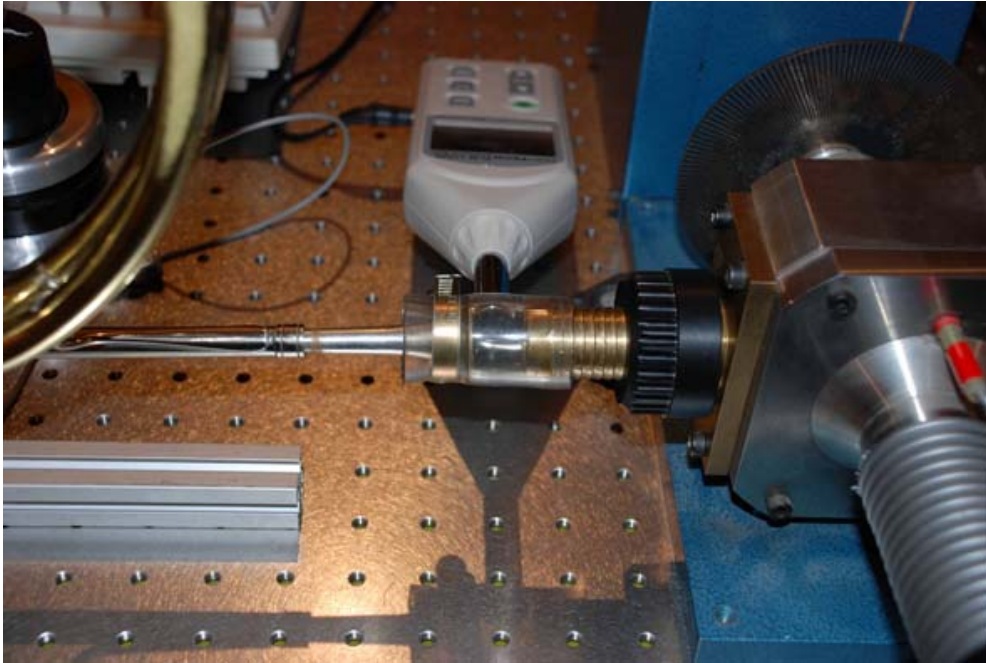


Aufbau Messung Übertragungsfunktion Sirene

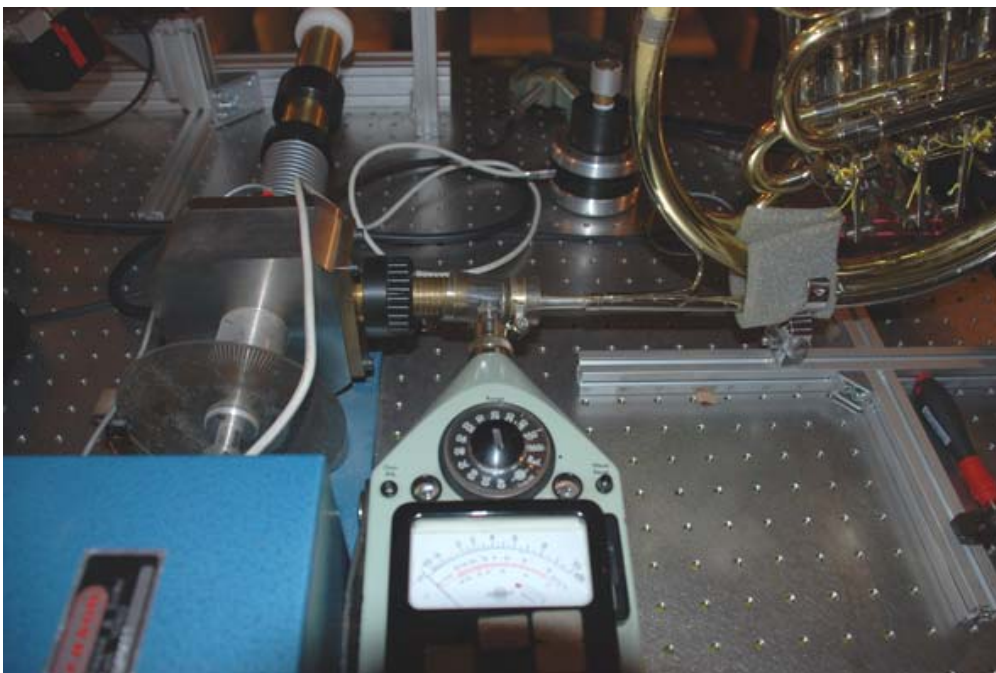


Aufbau Messung Übertragungsfunktion Sirene

Vor dem Mundstück wurde mit Hilfe eines Kunststoffrohres seitlich ein externes Eingangsmikrofon angebracht.



Hinteransicht Messmikrofon vor dem Mundstück



Vorderansicht Messung vor dem Mundstück

Um den Einfluss des Kunststoffrohres in der gemessenen Übertragungsfunktion zu überprüfen, wurde die Resonanzfrequenz des Kunststoffrohres berechnet.

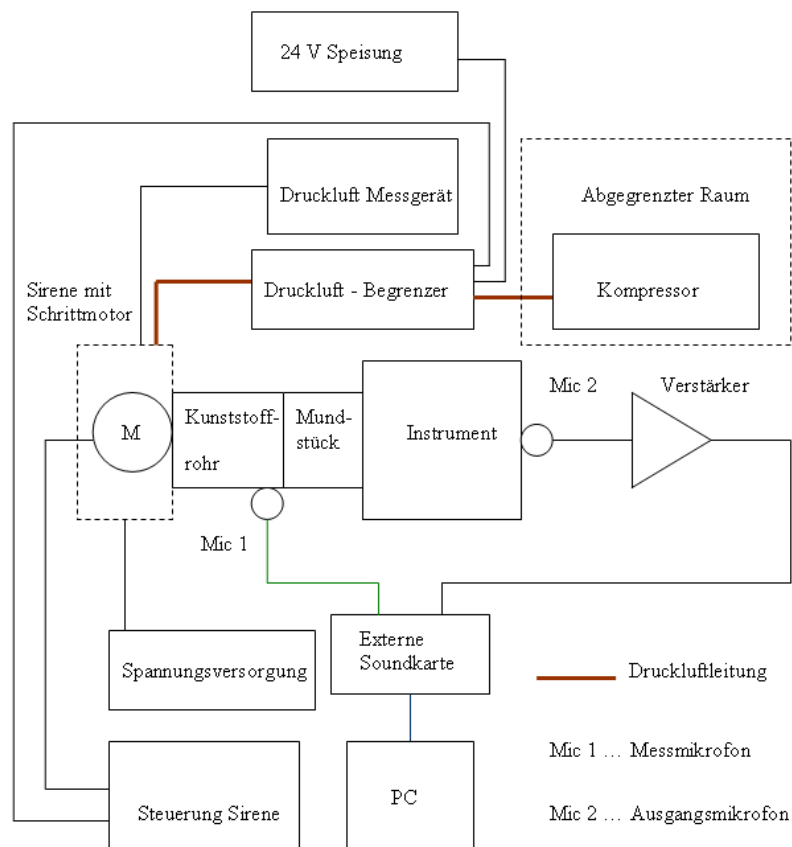
### ***Resonanzfrequenz Kunststoffrohr***

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343\text{m}}{0.03\text{m} \cdot \text{s}} = \underline{\underline{11.43\text{kHz}}}$$



Die Resonanzfrequenz (11,43 kHz) des Kunststoffrohres liegt außerhalb des gemessenen Bereichs der Übertragungsfunktion (bei 1,5 kHz). Daher hat das Kunststoffrohr keinen Einfluss auf die Messung.

### Messaufbau mit Sirene



Schaltplan Messung Übertragungsfunktion mit Sirene

Der Kompressor befindet sich im Nebenraum, der schalldicht abgeschlossen ist. Die Druckluft wird mit einer Begrenzungsschaltung konstant gehalten. Für die Positionierung des Eingangsmikrofons musste zwischen Mundstück und der Sirene ein Kunststoffrohr angebracht werden.

Das Messmikrofon im Kunststoffrohr und das Ausgangsmikrofon werden mit der externen Audio- Soundkarte am PC angeschlossen.

### **Verwendete Komponenten**

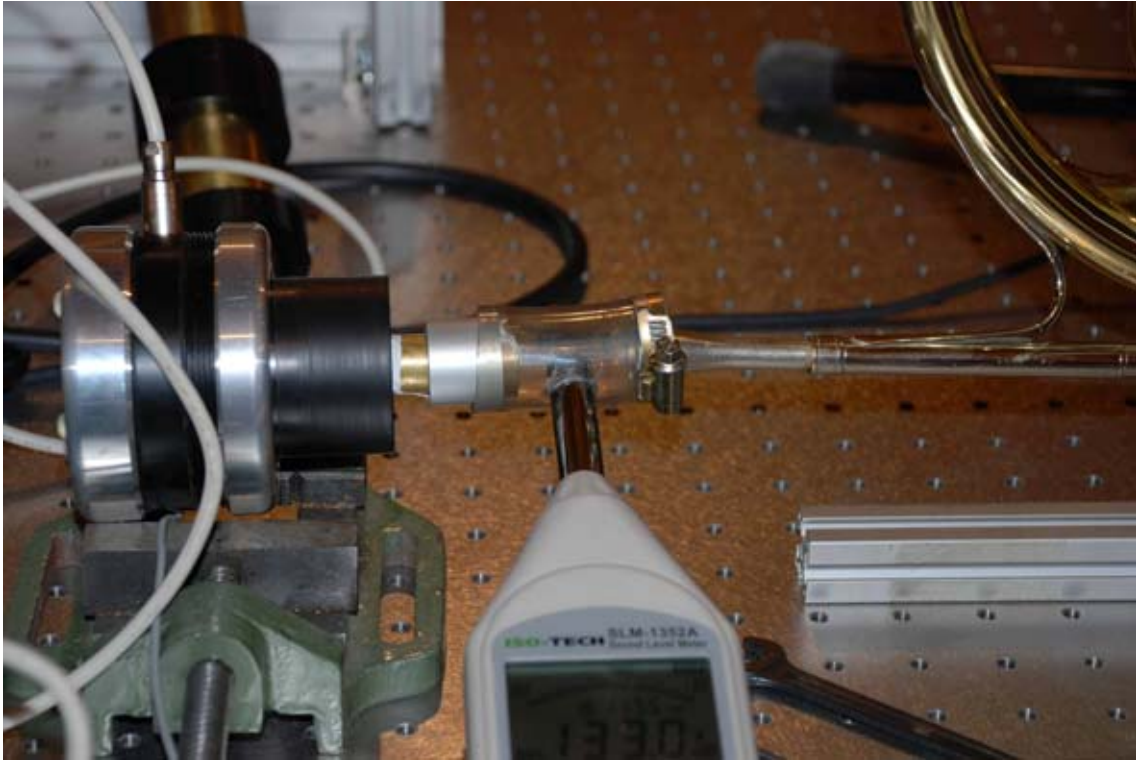
|                       |                                                  |
|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Mundstück             | H. Ebner 17.5 mm                                 |
| Instrument            | F/B Doppelhorn Engelbert Schmid                  |
| Stopfdämpfer          | Professional Products aS                         |
| Mic1                  | Sound Level Meter, RS 232, Datalogger            |
| Mic2                  | AKG C414 Niere                                   |
| Verstärker            | Preamp mpa 2017                                  |
| Externe Soundkarte    | Waveterminal U2A USB Audiointerface 24 bit       |
| Schrittmotor          | Ecson, L. Castagna & Sohn, Inv. 109022           |
| Kompressor            | AGRE Kompressor Mini-Boss 375, Inv. 430-1/2/1/95 |
| Druckluft - Begrenzer | R01-319,L.P. Gas - Regulator                     |

Im Betrieb ohne Stopfdämpfer wird die Druckluft auf 15 mBar nach dem Druckluft – Begrenzungsventil konstant gehalten. Die Messung ist nur im Frequenzbereich ab 300 Hz brauchbar, da das Signal aus dem Schrittmotor keine exakte Sinusform produziert und daher die Messsoftware VIAS im unteren Frequenzbereich ( $< 300$  Hz) Schwierigkeiten hat, das Messsignal weiter zu bearbeiten. Als Messmikrofon wird zuerst ein Sound Level Meter, RS 232, Datalogger mit einer Pegelgrenze von 130 dB SPL verwendet. Da das Signal über 130 dB SPL liegt, misst das Sound Level Meter über dem Frequenzbereich 1,2 kHz ein nichtlineares verzerrtes Signal.

Um die Übertragungsfunktion des Hornes mit Stopfdämpfer zu messen, muss die Druckluft auf 5 mBar begrenzt werden, da das Messmikrofon sonst übersteuert. Mit einer Druckluft von 5 mBar ist der Ausgangspegel aber zu gering (Signalrauschabstand S/N sehr klein), um für die Messung mit Stopfdämpfer brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

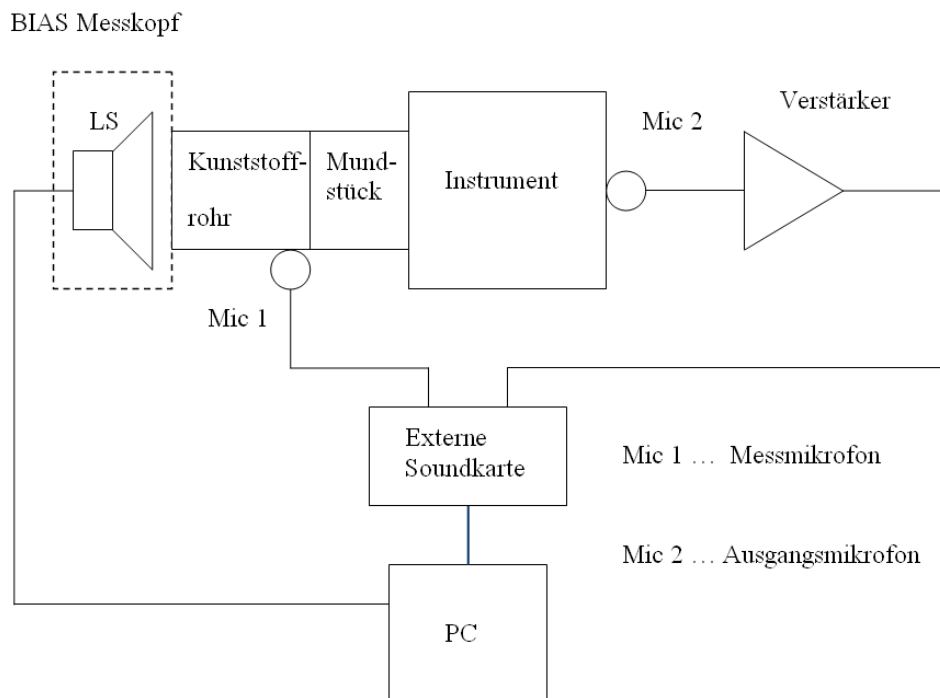
#### **11.2.3 BIAS Messung mit externem Messmikrofon**

An Stelle der BIAS Messung wird das im Messkopf integrierte Mikrofon aus Übersteuerungsgründen durch ein externes Mikrofon ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass ein übersteuerungsfestes Mikrofon eingesetzt werden kann. Zwischen Mundstück und Lautsprecher wird ein Kunststoffrohr mit 30 mm Länge angebracht, um das externe Messmikrofon vor dem Mundstück seitlich am Rand positionieren zu können.



Aufbau Messung Übertragungsfunktion mit BIAS Messkopf und externem Mikrofon

### ***Messaufbau mit BIAS und externem Messmikrofon***



Schaltplan Messung Übertragungsfunktion, BIAS Messkopf mit externem Mikrofon

Als externes Mikrofon wird ein Schallpegelmesser Type 2209 von Brüel & Kjaer mit einem maximalen Eingangsschallpegel von 160 dB SPL verwendet. Wie auch bei den früheren Messungen werden die zwei Mikrofone über eine externe Soundkarte mit dem PC verbunden. Die gemessenen Signale werden mit dem Programm VIAS verarbeitet. Als Signalgeber wird der Lautsprecher im BIAS Messkopf verwendet.

### **Verwendete Komponenten**

|                    |                                                                |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| Mundstück          | H. Ebner                                                       |
| Instrument         | F/B Doppelhorn Engelbert Schmid                                |
| Stopfdämpfer       | Professional Products aS                                       |
| BIAS Messkopf      | Institut für Wiener Klangstil, Univ. f. Musik u. d. Kunst Wien |
| Mic1               | Brüel & Kjaer Type 2209, Inv. 540-3/1/1/83                     |
| Mic2               | AKG C414 Niere                                                 |
| Verstärker         | Preamp mpa 2017                                                |
| Externe Soundkarte | Waveterminal U2A USB Audiointerface 24 bit                     |

Mit dem umgebauten BIAS Messkopf und dem externen Messmikrofon konnte noch kein optimales Ergebnis der Übertragungsfunktionsmessung erzielt werden. Ab 700 Hz war der Signalrauschabstand zu gering.



## 11.3 Lebenslauf

Name: Stefan Wachter

Anschrift: Speckbachergasse 30/27, 1160 Wien

Geburtsdatum: 07. September 1979 in Schruns

Schulbildung:

- 1986 – 1990 Volksschule in Gaschurn
- 1990 – 1994 Hauptschule in Gortipohl
- 1994 – 1998 HTL Fachschule für Elektrotechnik in Bregenz  
Abschlussprüfung
- 1998 – 2000 HTL Aufbaulehrgang für Fertigungs-  
Automatisierungstechnik in Bregenz
- 2000 Matura Schwerpunktsfach: Automatisierungstech-  
nik (Frequenzgang)
- 2000 – 2001 Vorbereitungsklasse Horn am Johann-Joseph-Fux  
Konservatorium des Landes Steiermark in Graz bei  
Mag. Peter Heckl
- seit Okt.2001 Studium Elektrotechnik – Toningenieur an der  
Technischen Universität Graz und Universität für  
Musik und darstellende Kunst Graz
- 2001 – 2005 Studium Konzertfach Horn am Johann-Joseph-Fux  
Konservatorium des Landes Steiermark in Graz bei  
Mag. Peter Heckl
- 24. Jänner 2003 1. Diplomprüfung Elektrotechnik – Toningenieur
- seit Feb.2005 Studium Konzertfach Horn an der Universität für  
Musik und darstellende Kunst Graz, Institut Ober-  
schützen bei Prof. Günter Högner und Assistent  
Mag. Hermann Ebner
- 31. Jänner 2007 2. Diplomprüfung Elektrotechnik – Toningenieur