



---

# PROJEKTBERICHT

---

Herr/Frau  
**Sina Buchholz**  
**Lorenz Ebisch**  
**Oliver Gehler**

**Antischallsystem (ANC) an  
Schalldämpfern - Versuchs-  
stand**

2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b> .....	<b>2</b>
2.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$ .....	2
2.2 Durchgangsdämpfungsmaß $D_{TL}$ .....	3
2.3 Messnormen .....	3
<b>3 Methodik</b> .....	<b>6</b>
3.1 Vorüberlegungen.....	6
3.2 Durchführung .....	7
3.2.1 Instandsetzung des Versuchsstandes.....	7
3.2.2 Testbetrieb und Probemessungen .....	8
3.2.3 Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes $D_{IL}$ .....	9
3.2.4 Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes $D_{TL}$ .....	10
<b>4 Messergebnisse</b> .....	<b>11</b>
4.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$ .....	11
4.2 Durchgangsdämpfungsmaß $D_{TL}$ .....	14
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>16</b>
5.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$ .....	16
5.2 Durchgangsdämpfungsmaß .....	17
<b>6 Fazit &amp; Ausblick</b> .....	<b>18</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Anlagen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung</b> .....	<b>VII</b>

## Abkürzungsverzeichnis

$v_1$	Messwinkel 1
$v_2$	Messwinkel 2
ANC	Active Noise Cancellation
$D_{IL}$	Insertion Loss, Einfügungsdämpfungsmaß
$D_{TL}$	Transmission Loss, Durchgangsdämpfungsmaß
$L_{Pn}$	Schalldruckpegel
$L_{W0}$	Schalleistungspegel ohne eingebauten Schalldämpfer
$L_{Wges}$	Gesamtschalleistungspegel
$L_{Wm}$	Schalleistungspegel mit eingebautem Schalldämpfer
$L_{Wn}$	Schalleistungspegel
$L_{Zeq}$	äquivalenter Dauerschalldruckpegel
$L_{ZFmax}$	Taktmaximalpegel
$L_{ZFmin}$	Taktminimalpegel
$P_0$	Schalleistung ohne eingebauten Schalldämpfer
$P_m$	Schalleistung mit eingebautem Schalldämpfer
$P_{x=0}$	Schalleistung vor dem Schalldämpfer
$P_{x=L}$	Schalleistung nach dem Schalldämpfer
$r_0$	innerer Radius des Rohres
$r_k$	Radius der Hüllfläche hinter der Ebene
$r_s$	Radius der Hüllfläche vor der Ebene
$S_0$	Bezugsfläche
$S_1$	Hüllfläche hinter der Mündung
$S_2$	Hüllfläche vor der Mündung
$\Delta L_W$	Differenz der Schalleistungspegel

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Messorte im Kanalsystem für die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes (Hübelt, 2019).....	2
Abbildung 2 Messorte im Kanalsystem für die Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes (Hübelt, 2019) .....	3
Abbildung 3 Ansicht zur Veranschaulichung der Messpunkte bei Messung nach DIN 45 635 (DIN 45 635 - Geräuschmessung an Maschinen, Teil 47, 1985).....	4
Abbildung 4 Schalldämpferprüfstand vor Instandsetzung (links) und danach (rechts) ..	8
Abbildung 5 Mikrofonpositionen bei den Messungen in Anlehnung an DIN 45 635 (links, Mitte) und mittig der Mündung (rechts).....	9
Abbildung 6 Mikrofonpositionen für die Bestimmung des $D_{TL}$ hinter dem Schalldämpfer (links) und vor dem Schalldämpfer im Rohr (rechts).....	10
Abbildung 7 Schalleistungspegel in dB am Ausgang des Schalldämpfers bei Messung in Anlehnung an DIN 45 635 .....	11
Abbildung 8 Schalleistungspegel in dB am Ausgang des Schalldämpfers bei Messung mittig der Mündung.....	12
Abbildung 9 Einfügungsdämpfungsmaß in dB des Schalldämpfers mit und ohne ANC-System, ermittelt durch Messung mittig der Mündung und in Anlehnung an die DIN 45 635.....	13
Abbildung 10 Differenzen der Ergebnisse der Messmethoden mittig der Mündung und in Anlehnung an DIN 45 635 bei der Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes..	14
Abbildung 11 Durchgangsdämpfungsmaß in dB des Schalldämpfers mit und ohne ANC-System .....	15

# 1 Einleitung

Schalldämpfer dienen zur Schallemissionsminderung in Kanalsystemen wie z.B. Belüftungsanlagen. Grundsätzlich gibt es zwei Schalldämpfersysteme.

## **Passive Systeme**

Passive Systeme erzielen durch ihre Bauform / -geometrie und Dämmmaterial eine schallmindernde Wirkung. Dies kann aber sehr kostenintensiv und platzraubend ausfallen.

## **Aktive Systeme**

Aktive Systeme erzielen ihre schallmindernde Wirkung nicht nur durch ihre Bauform, sondern auch durch ein eingebautes Beschallungssystem. Dieses Beschallungssystem arbeitet mit der Theorie der Schallauslöschung. Das heißt, dass der Schall der Schallquelle aufgenommen und phaseninvertiert im Schalldämpfer durch einen Lautsprecher wiedergegeben wird. Die Signale der Quelle und des Lautsprechers löschen sich somit aus. Damit ist es möglich platzsparendere Schalldämpfer zu konstruieren.

Das Ziel dieses Projektes ist es, die Wirksamkeit eines Active Noise Cancellation-Systems (ANC-Systems) im Vergleich zu einem passiven Schalldämpfersystem nachzuweisen.

Dazu soll ein Versuchsstand entwickelt und ein Messverfahren konzipiert werden, die später für Hochschul-Praktika Verwendung finden sollen.

Die Einleitung und die Theorie wurden von Lorenz Ebisch bearbeitet, die Methodik von Oliver Gehler und Ergebnisse, Diskussion und das Fazit von Sina Buchholz.

## 2 Theorie

Grundlegend zur Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämpfern sind das Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{IL}$  und das Durchgangsdämpfungsmaß  $D_{TL}$ .

### 2.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$

Das Einfügungsdämpfungsmaß oder auch Insertion Loss ( $D_{IL}$ ) wird aus der Differenz der Schalleistung eines Systems ohne Schalldämpfer und diesen Systems mit Schalldämpfer gebildet. Wichtig hierbei ist, dass sich die Gesamtlänge des Systems durch den Einbau des Schalldämpfers nicht verändert.

In der folgenden Abbildung 1 wird dargestellt an welchen Orten im Kanalsystem die Schalleistungen zur Bestimmung von  $D_{IL}$  gemessen werden.

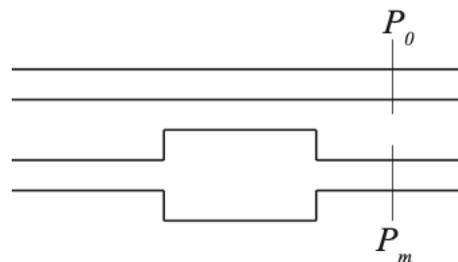


Abbildung 1 Messorte im Kanalsystem für die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes (Hübel, 2019)

$P_0$  entspricht der Schalleistung ohne eingebauten Schalldämpfer.

$P_m$  entspricht der Schalleistung am gleichen Ort, mit eingebautem Schalldämpfer.

Folgende Formel dient zur Berechnung von  $D_{IL}$ :

$$D_{IL} = L_{W0} - L_{Wm}$$

$$D_{IL} = 10 \log \left( \frac{P_0}{P_m} \right) \text{ dB}$$

## 2.2 Durchgangsdämpfungsmaß $D_{TL}$

Das Durchgangsdämpfungsmaß oder auch Transmission Loss ( $D_{TL}$ ) wird mit der Differenz der Schalleistung vor dem Schalldämpfer im System und der Schalleistung nach dem Schalldämpfer im System bestimmt.

In der folgenden Abbildung 2 wird dargestellt an welchen Orten im Kanalsystem die Schalleistungen zur Bestimmung von  $D_{TL}$  gemessen werden.

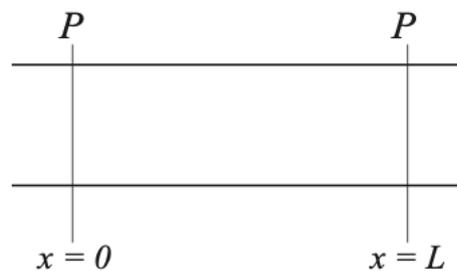


Abbildung 2 Messorte im Kanalsystem für die Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes (Hübelt, 2019)

$P_{x=0}$  entspricht der Schalleistung vor dem Schalldämpfer.

$P_{x=L}$  entspricht der Schalleistung nach dem Schalldämpfer.

Folgende Formel dient zur Berechnung von  $D_{TL}$ :

$$D_{TL} = 10 \log \left( \frac{P_{x=0}}{P_{x=L}} \right) dB$$

## 2.3 Messnormen

Zur Berechnung von  $D_{TL}$  und  $D_{IL}$  werden die jeweilig oben genannten Schalleistungen benötigt. Für die Messung der Schalleistungen wurde angedacht nach einem genormten Verfahren zu arbeiten.

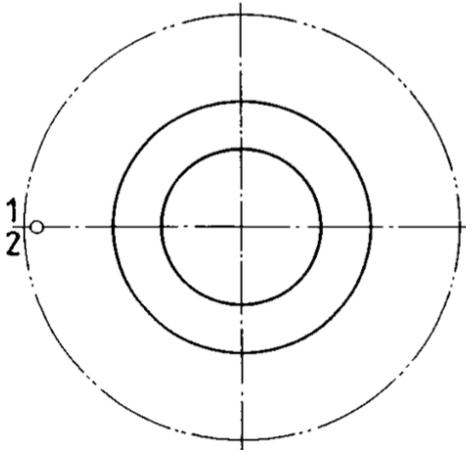
Dazu sollte die DIN ISO EN 3740 (Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen) als Orientierung zur Auswahl eines Verfahrens dienen, jedoch wurde festgestellt, dass der Prüfraum bzw. die Prüfumgebung absolut unzureichend die Voraussetzungen der Norm erfüllen.

Es wurde daher entschieden annähernd der Norm DIN 45 635 (Geräuschmessung an Maschinen) zu arbeiten.

Diese sieht vor, eine Messung nach Hüllflächenverfahren durchzuführen. Dazu sind zwei Hüllflächen an der Mündung des Kanals vorgesehen.

Folgende Abbildung 3 dient zur Veranschaulichung.

Draufsicht:



Seitenansicht:

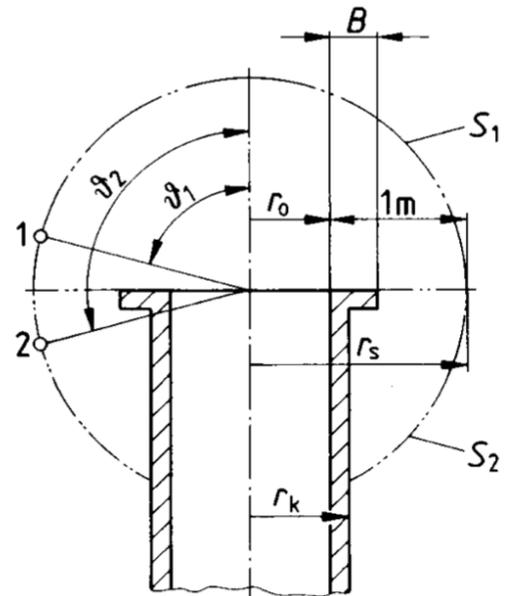


Abbildung 3 Ansicht zur Veranschaulichung der Messpunkte bei Messung nach DIN 45 635 (DIN 45 635 - Geräuschmessung an Maschinen, Teil 47, 1985)

Wie in der Abbildung zu sehen, wird an zwei Punkten gemessen.

Punkt 1 (1) ist der Messpunkt auf der oberen Hüllfläche ( $S_1$ ), Punkt 2 (2) ist der Messpunkt auf der unteren Hüllfläche ( $S_2$ ). Die Messpunkte werden mit den Winkeln  $\nu_1$  und  $\nu_2$  zur Längsachse des Kanals aufgeschlagen.

Die Hüllflächen berechnen sich wie folgt:

$$S_1 = 2\pi r_s^2$$

$$S_2 = 2\pi r_s \cdot \sqrt{r_s^2 - r_k^2}$$

mit

$$r_s = r_0 + 1m$$

Aus den gemessenen Schalldruckpegeln können dann die Schallleistungen der einzelnen Hüllflächen bestimmt werden.

Dazu wird folgende Formel verwendet:

$$L_{Wn} = L_{Pn} + 10 \lg \left( \frac{S_n}{S_0} \right)$$

mit

$$S_0 = 1 \text{ m}^2$$

Der Gesamt-Schalleistungspegel berechnet sich aus der Summe der Schalleistungspegel der einzelnen Hüllflächen:

$$L_{Wges} = 10 \lg \sum_{n=1} 10^{\frac{L_{Wn}}{10 \text{ dB}}} \text{ dB}$$

## 3 Methodik

### 3.1 Vorüberlegungen

Mit Orientierung an den Zielen des Projektes war es primär erforderlich, den Aufbau des vorhandenen, prototypischen Schalldämpferprüfstands voranzutreiben. Notwendig hierfür war die Konzipierung von Gestellen für die Lagerung des bereits vorhandenen, passiven und des hinzukommenden, aktiven Schalldämpfers. Ebenfalls gefertigt werden sollte ein passendes Übergangsstück, um den gegebenen Durchmesser von Rohr auf Schalldämpfer zu überwinden.

Weiterhin musste ein umfassender Kenntnisgewinn über das zu erwartende Geräusch bei Betrieb mit und ohne Schalldämpfer, die vorherrschende Raumantwort sowie mögliche Störeinflüsse errungen werden. Dahingehend sollte die Bestimmung des Grundgeräuschpegels sowie der Nachhallzeit im Prüfraum erfolgen. Mit Kenntnis über den vorherrschenden Grundgeräuschpegel ist es möglich, den erforderlichen Nutzsignalpegel per Signalverstärker so einzustellen, dass dieser mindestens 10 dB über dem Grundgeräuschpegel liegt. Hierbei bezieht sich der Nutzsignalpegel auf das Mündungsgeräusch bei Einsatz des Schalldämpfers mit ANC-System.

Eine Pegelminderung durch das ANC-System ist typischerweise im tieffrequenten Bereich zu erwarten. Dahingehend soll der zu untersuchende Frequenzbereich zwischen 50 Hz und maximal 1000 Hz liegen. Der Dynamikbereich wird durch einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand für jede Terz (in der Terzanalyse) bestimmt. Liegt der Störgeräuschpegel über dem Nutzgeräusch oder sind beide gleich groß, dann wird der Dynamikbereich an dieser Frequenz eingeschränkt.

Weitere Vorüberlegungen galten der Auswahl passender Messverfahren zur Bestimmung von Schalldruckpegeln des Mündungsgeräusches. Kritikpunkte sind hierbei Genauigkeit, Aufwand und Eignung eines Messverfahrens mit Hinblick auf die Randbedingungen des Raumes sowie des Prüfstandes. Ein übliches Hüllflächenverfahren wie beispielsweise gemäß DIN 3746 schien eher ungeeignet, da mit dieser Methode der gesamte Prüfstand hinsichtlich seiner Schalleistung abgebildet wird. Untersuchungsgegenstand soll jedoch ausschließlich der Mündungsbereich sein. Weiterhin werden die normgerechten Vorschriften zur Bildung einer Hüllfläche aufgrund der Raumdimensionen eingeschränkt. Für eine Untersuchung des Mündungsgeräusches scheint die Norm DIN 45 635 als geeignet. Diese Norm wird bei Geräuschmessungen an Schornsteinen verwendet. Die Methodik dieser Norm lässt sich auf das Mündungsgeräusch des Prüfstandes aufgrund schornsteinähnlicher Dimensionen anwenden. Ein Vorteil dieser Messmethode ist die Notwendigkeit von lediglich zwei Messpositionen, um

den Schalleistungspegel des Mündungsgeräusches zu bestimmen. Diese Messmethodik erscheint geeignet zu sein für die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes  $D_{IL}$ .

Um das Durchgangsdämpfungsmaß  $D_{TL}$  eines Schalldämpfers zu bestimmen, muss ein quantitativer sowie qualitativer Vergleich des Nutzsignals vor und hinter dem Schalldämpfer gezogen werden. Hierfür kann der Vergleich von Schalldruckpegeln herangezogen werden, die jeweils vor und hinter dem Schalldämpfer gemessen werden. Die einfachste Methode erscheint hierbei die Schalldruckpegel jeweils mittig des Leitungsrohres, beziehungsweise mittig der Mündung zu ermitteln. Die Messmethodik in Anlehnung an die Norm 45 635 kann für die Bestimmung der Schalldruckpegel vor einem Schalldämpfer nicht angewendet werden, da das Leitungsrohr ein geschlossenes System zum Schalldämpfereingang bildet.

## 3.2 Durchführung

Als Schallquelle dient ein bereits voreingebauter Lautsprecher, der mittig des Schalleitungsrohres in einem schallgedämmten Kasten sitzt. Genaue Details des Lautsprechers sind unbekannt. Angesteuert wird der Lautsprecher über einen Signalgenerator der Firma NTI AUDIO (Typ Minirator MR-Pro) sowie einen zwischengeschalteten Leistungsverstärker. Als Schallsignal wurde ein weißes Rauschen eingesetzt. Für die Messung der Schalldruckpegel kamen zwei Schallpegelmesser NTI AUDIO XL 2 sowie zugehörige Messmikrofone NTI AUDIO M4260 zum Einsatz. Die Aufzeichnung erfolgte hierbei in Terzbändern. Ausgewertet werden sollten der äquivalente Dauerschalldruckpegel ( $L_{Zeq}$ ), Taktmaximalpegel ( $L_{ZFmax}$ ) und Taktminimalpegel ( $L_{ZFmin}$ ). Da es sich um stationäre Geräusche handelt, wurde die Messdauer je Mikrofonposition mit ausreichenden 10 Sekunden festgelegt.

Die Messung der Nachhallzeit wurde mittels Impulsverfahren (platzende Luftballons) durchgeführt. Messgerät war ebenfalls ein Schallpegelmesser Typ XL2 der Firma NTI-Audio. Zu erwähnen ist, dass die Nachhallzeitmessung vorsorglich getätigt wurde. Notwendig wäre die Kenntnis der Nachhallzeit bei Anwendung eines Hüllflächenverfahrens wie beispielsweise nach DIN 3746.

### 3.2.1 Instandsetzung des Versuchsstandes

Im Rahmen des Projektes wurde der vorgefundene Versuchsstand zunächst hinsichtlich seiner physischen Gestalt aufgearbeitet. Hierfür wurden für den bereits angebrachten, passiven Schalldämpfer sowie für den hinzukommenden, aktiven Schalldämpfer Holzgestelle zur Auflagerung konzipiert. Zur Überwindung der Durchmesserdifferenz zwischen Leitungsrohr und aktivem Schalldämpfer war weiterhin ein passendes

Übergangsstück notwendig. Ursprünglich sollte ein eigens hierfür angefertigter Blechtrichter dienen. Die Umsetzung dieses Blechtrichters konnte jedoch aufgrund herstellungsbedingter Komplikationen nicht erfüllt werden, weshalb auf eine Alternative umgestiegen wurde. Als Ersatz diente nun ein aus Kunststoffstücken zusammengesetzter Trichter mit stufenweiser Durchmessererhöhung. Zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung war es notwendig einen vergleichbaren Zustand ohne Schalldämpfer zu schaffen. Als Referenz diente hierfür ein PVC-Rohr mit identischer Länge sowie gleichem Mündungsdurchmesser wie der Schalldämpfer. Um den Störgeräuschpegel zu senken, welcher unter anderem durch das schallabstrahlende Leitungsrohr entsteht, wurde dieses mit Schaumstoffmatten umspannt. Die folgende Abbildung 4 zeigt den Zustand des Prüfstandes vor und nach der Instandsetzung.



Abbildung 4 Schalldämpferprüfstand vor Instandsetzung (links) und danach (rechts)

### 3.2.2 Testbetrieb und Probemessungen

Die Aufstellung sowie Ausrichtung des Schalldämpferprüfstandes ist bedingt durch die Größe des Prüfraumes. Es ergibt sich ein minimaler Wandabstand in Längsrichtung der Apparatur, gemessen von der Schalldämpferöffnung, von maximal 1,5 m. Dieser Abstand kann allgemein als gering aufgefasst werden, hinsichtlich direkter Reflexionen des emittierten Schalls an der Wand. Um den Reflexionseinfluss möglichst niedrig zu halten wurde das der Schalldämpferöffnung gegenüberliegende Wandstück mit schallabsorbierenden Schaumstoffmatten verkleidet.

Während des ersten Testbetriebes ist aufgefallen, dass das ANC-System des Schalldämpfers nicht funktionsfähig war. Eine Analyse des ANC-Systems führte zu einer defekten Platine, welche anschließend ausgewechselt wurde. Das nun intakte ANC-System wurde durch Regelung eines Potentiometers so eingestellt, dass eine maximale Schallminderung im Vergleich zum Betrieb ohne ANC erreicht wurde.

Gemäß der DIN 45 635 wurden zwei Mikrofonpositionen unter einem Winkel von  $15^\circ$ , einmal vor und einmal hinter der Öffnungsebene, definiert. Da die Größendimensionen des Versuchstandes, insbesondere des Mündungsdurchmessers, deutlich kleiner sind als bei einem industriellen Schornstein, wurde der Messabstand von 1 m (nach Norm als Mindestabstand gefordert) auf 20 cm reduziert. Ein weiterer Grund für die Wahl eines kürzeren Messabstandes ist das Vorhandensein eines relativ hohen Störgeräuschpegels im Raum. Um möglichst nah am Nutzgeräusch, also dem Mündungsgeräusch zu sein, stellte sich ein verkürzter Messabstand von 20 cm als sinnvoll dar.

Bei der Mittig-Mündung-Messung hingegen wurde direkt in der Öffnungsebene und 10 cm vor Öffnungsebene gemessen (auch hier je fünf Messungen). Beide Messverfahren sind bei Betrieb des Versuchstandes mit und ohne Schalldämpfer durchgeführt worden (bei Schalldämpferbetrieb mit und ohne ANC). Bei der Messung ohne Schalldämpfer kam stattdessen das bereits erwähnte PVC-Rohr zum Einsatz.

### 3.2.3 Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes $D_{IL}$

Zur Bestimmung vom  $D_{IL}$  wurde die Methodik mit den Parametern der Probemessungen wiederholt durchgeführt. Jedoch erfolgte die Mittig-Mündung-Messung hier ausschließlich direkt an der Mündungsebene. Der Messablauf sah die Bestimmung der Mündungsgeräusche des Schalldämpfers mit und ohne zugeschalteten ANC sowie bei Verwendung des Kunststoffrohres anstelle des Schalldämpfers vor. Folgende Abbildung 5 zeigt die verwendeten Mikrofonpositionen bei beiden Messverfahren.



Abbildung 5 Mikrofonpositionen bei den Messungen in Anlehnung an DIN 45 635 (links, Mitte) und mittig der Mündung (rechts)

Bei den Messungen in Anlehnung an die DIN 45 635 ergaben sich insbesondere an den Mikrofonpositionen vor der Mündungsebene Stör-Nutzgeräuschabstände von weniger als 10 dB. In Folge dessen wurde das Störgeräusch an eben jenen Mikrofonpositionen

ermittelt, indem die Mündungsöffnungen verschlossen wurden. Anschließend wurde eine Störgeräuschkorrektur der Nutzgeräuschpegel durchgeführt.

### 3.2.4 Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes $D_{TL}$

Auch bei dieser Messmethodik sind die gleichen Parameter wie bereits bei den Probestimmungen umgesetzt worden. Für die Bestimmung vom  $D_{TL}$  lag der Fokus auf der Messung der Schalldruckpegel mittig der Mündung, jeweils vor und nach dem Schalldämpfer. Hierbei wurden Messungen mit und ohne ANC-System durchgeführt. Das Abgreifen der Schalldruckpegel vor dem Schalldämpfer erfolgte mithilfe eines zweiten Schallpegelmessers. Hierbei wurde ein Messmikrofon durch eine Bohrung in das Schallleitungsrohr eingeführt und dort mittig des Rohrquerschnitts positioniert, wie in Abbildung 6 zu sehen ist.

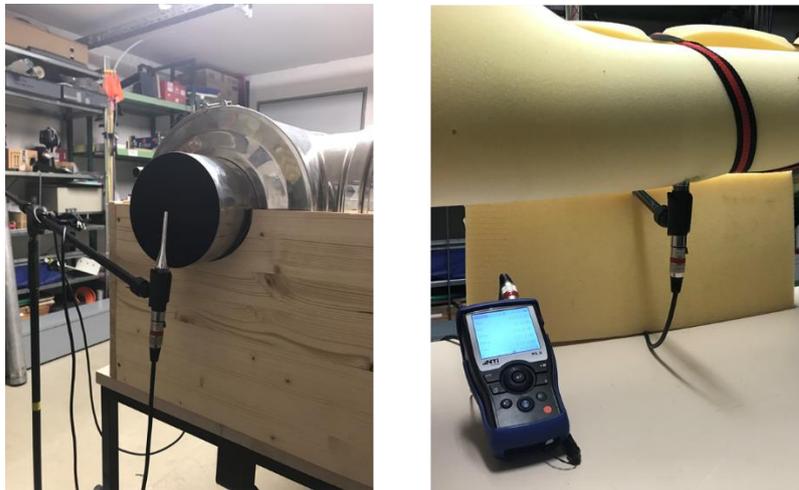


Abbildung 6 Mikrofonpositionen für die Bestimmung des  $D_{TL}$  hinter dem Schalldämpfer (links) und vor dem Schalldämpfer im Rohr (rechts)

## 4 Messergebnisse

### 4.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$

Für die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes wurden zunächst die Messwerte je Mikrofonposition energetisch gemittelt. Aus diesen Mittelwerten wurden die frequenzabhängigen Schalleistungspegel für die beiden unterschiedlichen Messmethoden jeweils nach den angegebenen Berechnungen aus 2.3 bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen in Anlehnung an die DIN 45 635 und mittig der Rohröffnung wurden in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Diese beiden Darstellungen sehen sich sehr ähnlich. Die Kurvenverläufe gleichen sich sehr stark. Es sind lediglich die errechneten Schalleistungspegel von der Messung in Anlehnung an die DIN 45 635 bei einigen Frequenzen wenige dB höher als die entsprechenden Pegel nach Messung mittig des Rohrendes (sh. Anlagen). In diesen Diagrammen ist bereits ersichtlich, dass der Schalldämpfer ohne angeschaltetes ANC-System bereits eine Pegeldifferenz von bis zu über 10 dB gegenüber dem reinen Rohr bei einer Frequenz von 100 Hz bringt. Bei etwa 200 Hz ist das Minimum der Differenz erreicht. Danach jedoch wird nahezu über den gesamten restlichen Frequenzbereich eine Pegelminderung um ca. 10 dB erreicht.

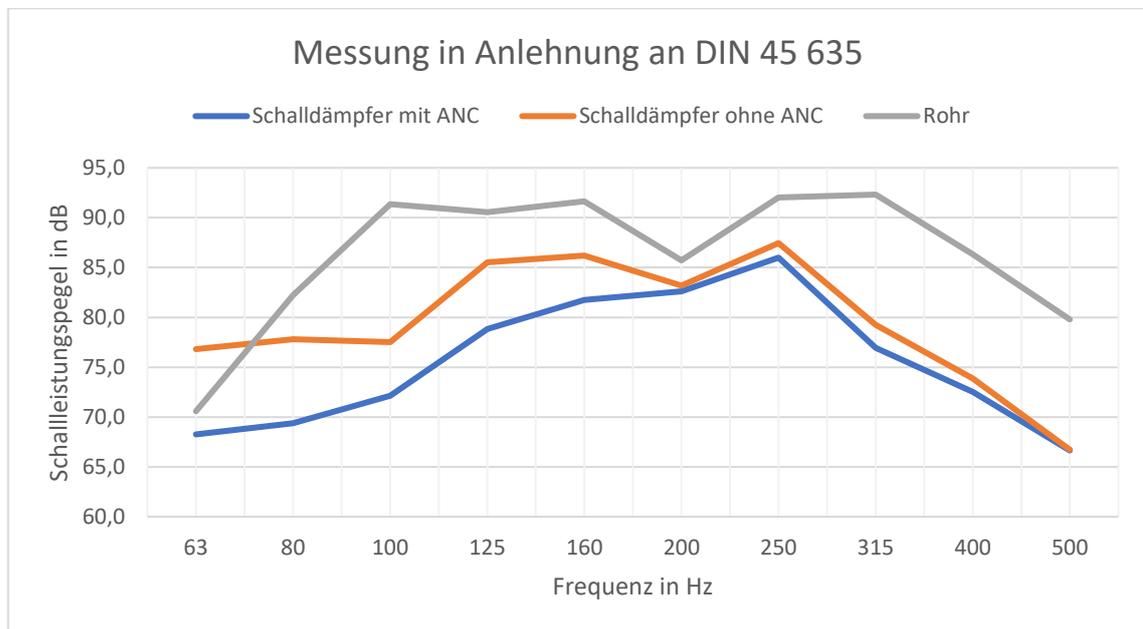


Abbildung 7 Schalleistungspegel in dB am Ausgang des Schalldämpfers bei Messung in Anlehnung an DIN 45 635

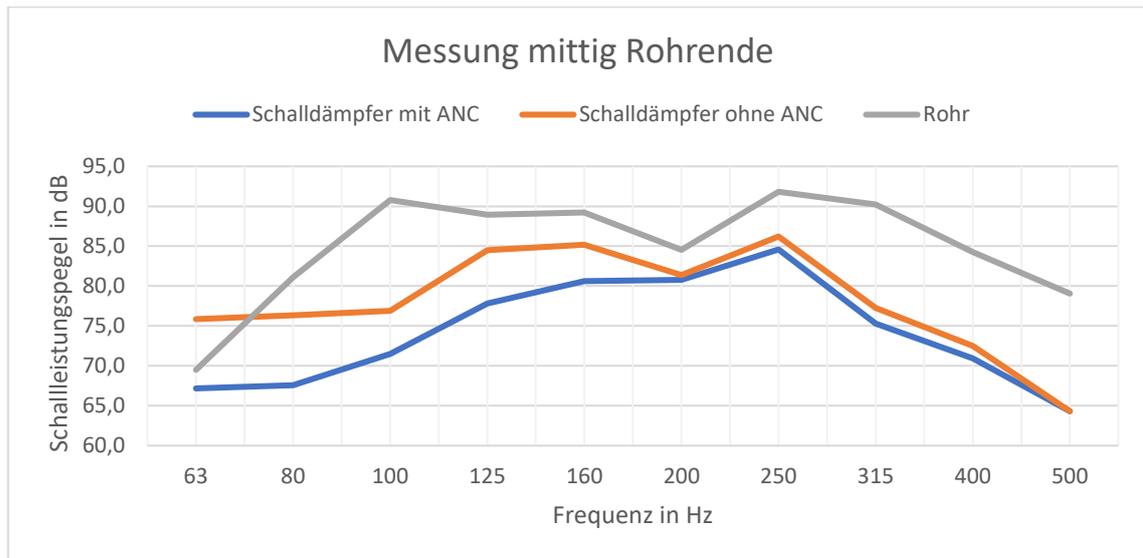


Abbildung 8 Schalleistungspegel in dB am Ausgang des Schalldämpfers bei Messung mittig der Mündung

Es ist ebenfalls in Abbildung 7 und Abbildung 8 zu erkennen, dass das ANC-System in den Frequenzen bis 160 Hz eine Wirkung besitzt. Ab 200 Hz hat das ANC-System keinen entscheidenden Einfluss mehr auf den Schalleistungspegel am Rohrende des Schalldämpfers im Vergleich zum passiven Schalldämpfer. Die genauen Werte der Wirkung des ANC-Systems sind in der folgenden Tabelle 1 dargestellt. Hierfür wurde die Differenz aus den errechneten Schalleistungspegel des passiven und des aktiven Schalldämpfers gebildet. Dies wurde beispielhaft für die Ergebnisse der Messung in Anlehnung an die DIN 45 635 durchgeführt.

Tabelle 1 Wirkung des ANC-Systems

f in Hz	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
$L_w$ ohne ANC in dB	76,8	77,8	77,5	85,5	86,2	83,2	87,5	79,2	73,9	66,7
$L_w$ mit ANC in dB	68,3	69,4	72,2	78,8	81,8	82,6	86,0	76,9	72,5	66,7
$\Delta L_w$ in dB	8,6	8,4	5,4	6,7	4,4	0,6	1,5	2,3	1,4	0,1

Das Einfügungsdämpfungsmaß wurde nun bestimmt durch die frequenzabhängige Berechnung der Differenz des Schalleistungspegels am Rohrende und an der Öffnung des Schalldämpfers, sowohl aktiv als auch passiv und in der folgenden Abbildung 9 dargestellt. Wie schon in Abbildung 7 und Abbildung 8 gesehen wurde, befindet sich bei 100 Hz eine Spitze des  $D_{IL}$  mit 14 dB ohne und nahezu 20 dB mit eingeschaltetem ANC-System (siehe Anlagen 1 und 2). Die Kurve fällt von dort aus bis 200 Hz wieder ab. Ab dieser Frequenz steigt das  $D_{IL}$  wieder auf einen Wert von bis zu 15 dB beim ANC-

System. Von dort an bleibt der Wert des  $D_{IL}$  im restlichen Frequenzbereich nahezu konstant. Zudem lässt sich in diesem Diagramm ebenfalls gut erkennen, dass das ANC-System hauptsächlich in den tiefen Frequenzen wirkt und ab 200 Hz keinen großen Einfluss mehr hat.

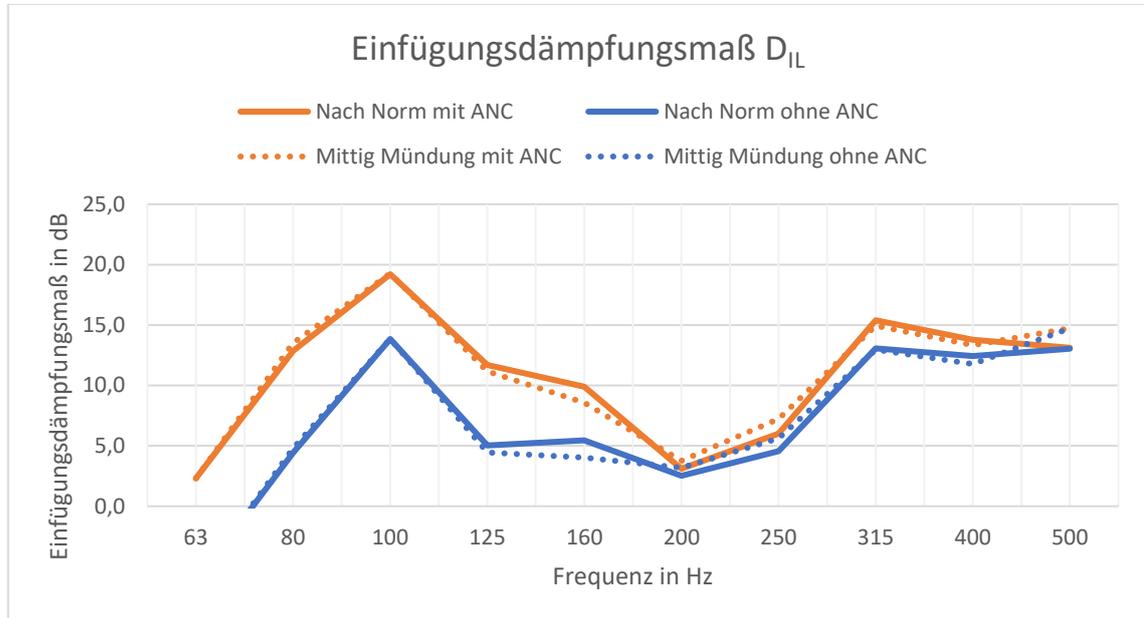


Abbildung 9 Einfügungsdämpfungsmaß in dB des Schalldämpfers mit und ohne ANC-System, ermittelt durch Messung mittig der Mündung und in Anlehnung an die DIN 45 635

Bildet man nun die Differenz der jeweils gleichfarbigen durchgestrichenen und der gestrichelten Linien aus Abbildung 9, so erhält man die Differenz der Ergebnisse, die mit den unterschiedlichen Messverfahren erhalten wurden. Diese sind in Abbildung 10 dargestellt. Es wurde ein Schlauch von  $\pm 3$  dB festgelegt, den die Differenz nicht überschreiten sollte. Dann lässt sich sagen, dass die beiden Messverfahren gleiche Ergebnisse liefern. Wie in dem Diagramm zu erkennen ist, überschreiten die Kurven weder bei der Berechnung des  $D_{IL}$  mit noch ohne ANC-System den festgelegten Schlauch. Der Unterschied der Ergebnisse der beiden Messverfahren ist nie größer als 2 dB.

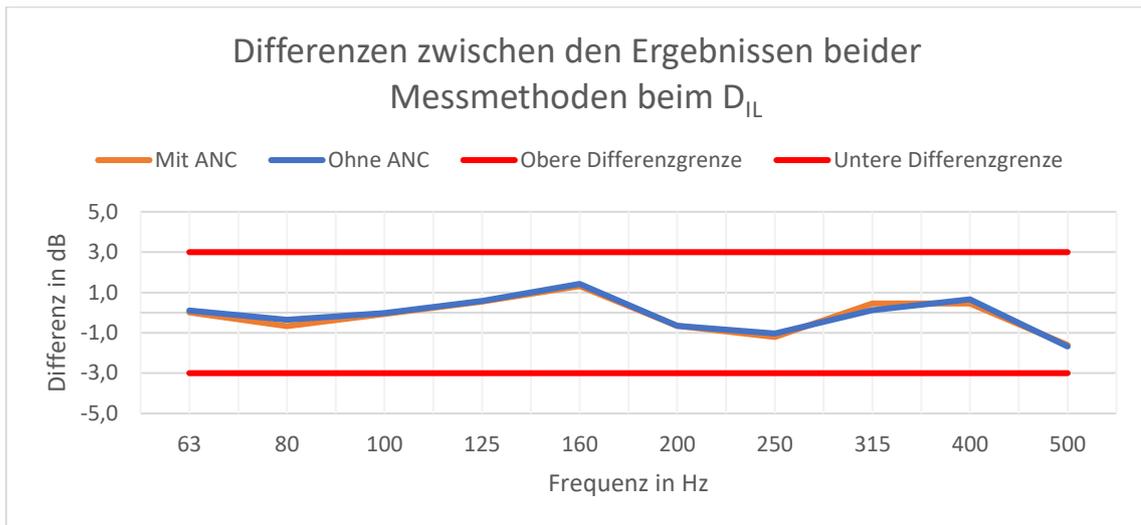


Abbildung 10 Differenzen der Ergebnisse der Messmethoden mittig der Mündung und in Anlehnung an DIN 45 635 bei der Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes

## 4.2 Durchgangsdämpfungsmaß $D_{TL}$

Für die Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes wurden die Messwerte je Mikrofonposition energetisch gemittelt. Anschließend wurde die Differenz des Mittelwerts des Schalldruckpegels vor und nach dem Schalldämpfer sowohl im passiven als auch im aktiven Zustand gebildet. Diese wurden in der folgenden Abbildung 11 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Einfügungsdämpfungsmaßes haben die Kurven des Durchgangsdämpfungsmaßes mit und ohne ANC-System keine sehr ähnlichen Verläufe. Es findet sich wieder eine Spitze von über 30 dB (siehe Anlage 3) im Bereich von 100 Hz wieder, gefolgt von einem Abfall bis 160 Hz. In diesem Bereich liegt das  $D_{TL}$  des aktiven Schalldämpfers um 10 dB über dem des passiven Schalldämpfers. In den Frequenzbereichen 160 Hz – 200 Hz und um 315 Hz ist das Gegenteil der Fall. Es lässt sich daher bei dieser Messung keine eindeutige Aussage über eine positive Wirkung des ANC-Systems treffen. Der Schalldämpfer bewirkt jedoch im kompletten Frequenzbereich eine deutliche Pegelminderung von stets mehr als 10 dB.

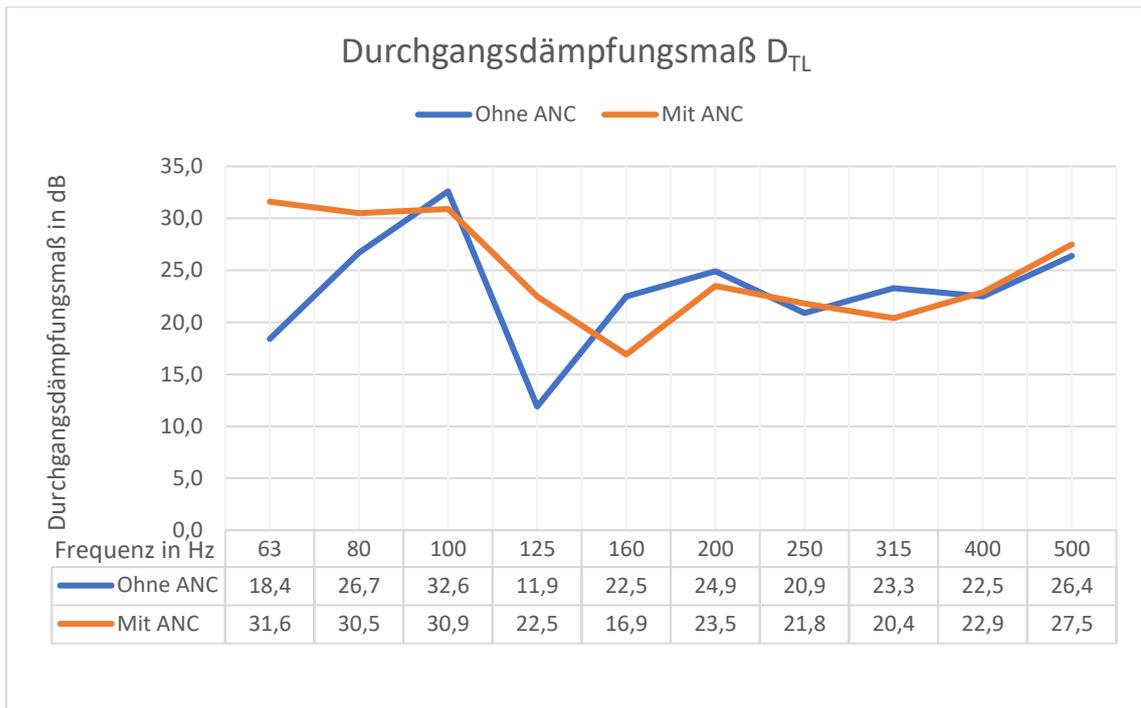


Abbildung 11 Durchgangsdämpfungsmaß in dB des Schalldämpfers mit und ohne ANC-System

## 5 Diskussion

### 5.1 Einfügungsdämpfungsmaß $D_{IL}$

Aus den Ergebnissen 4.1 lässt sich ableiten, dass bereits der Schalldämpfer im passiven Zustand eine deutliche Pegelminderung im Vergleich zum Rohr bringt. Das ANC-System bewirkt zusätzlich eine Verbesserung in den tiefen Frequenzen bis 160 Hz. Leider konnten keine Daten des Herstellers zum Einfügungsdämpfungsmaß des Schalldämpfers für einen Vergleich gefunden werden.

Der Pegelausschlag bei 100 Hz ist ungewöhnlich für diese Art Schalldämpfer. Normalerweise sollten keine Spitzen vorhanden sein. Es lässt sich vermuten, dass der Lautsprecher des Schalldämpfers als eine Art Resonanzabsorber bei 100 Hz fungiert. Bei weiteren Untersuchungen mit Änderung der Membran kann sich diese Vermutung bestätigen bzw. falsifizieren lassen. Für dieses Projekt wäre diese Untersuchung jedoch zu weitführend gewesen.

Bezüglich der beiden verwendeten Messmethoden kann gesagt werden, dass sie das gleiche Ergebnis beim  $D_{IL}$  liefern. Durch die Differenzbildung entsteht kein Unterschied, obwohl die Schalleistungspegel bei der Messung nach DIN 45 635 über alle Frequenzen hinweg einen höheren Wert haben. Es ist demzufolge bei den späteren Praktikumsversuchen irrelevant, welche Methode verwendet wird. Wenn der Messaufbau während der Messungen sehr einfach gehalten werden soll, empfiehlt sich die Messung mittig der Mündung. Der Aufbau ähnelt zudem dem der Messung des Durchgangsdämpfungsmaßes. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sich diese Messmethode nicht mehr eignet, sobald Strömung durch das Rohr geführt wird. Sollen die Studenten jedoch eine neue Messmethode kennenlernen, so ist die Messung in Anlehnung an die DIN 45 635 vorzuziehen. Diese Variante ist außerdem für Messungen mit Strömungszufuhr geeignet.

Dadurch, dass der Messabstand zu reflektierenden Ebenen teilweise weniger als einen Meter betrug, können geringe Messfehler entstanden sein. Hinzu kommt, dass der Versuchsraum aufgrund seiner Ausstattung nicht für einen Schalldämpferprüfstand ausgelegt ist. Es gibt sehr viele resonierende, reflektierende, aber auch absorbierende Objekte, denen ihre genauen Auswirkungen nicht direkt zugeordnet werden können. Zudem haben sowohl die schwarze Lautsprecherbox als auch das Rohr einen sehr hohen Störpegel erzeugt, welcher eine genaue Messung erschwert hat. Eine Fremdgeräuschkorrektur war daher unumgänglich. Eine weitere Fehlerquelle können die Messgeräte sein, die in den tiefen Frequenzen bis 63 Hz nicht immer exakt messen. Dadurch entstanden größere Messunterschiede in diesen Frequenzbereichen. Zudem können bei

der Messung mittig der Rohröffnung Stehwellen getroffen worden sein. Durch die Ähnlichkeit der Ergebnisse beider Messmethoden scheint dies jedoch keinen großen Einfluss gehabt zu haben.

## 5.2 Durchgangsdämpfungsmaß

Wie bereits in 4.2 angesprochen, sieht man auch beim Durchgangsdämpfungsmaß, dass der Schalldämpfer zur Pegelminderung beiträgt. Die Wirkung des ANC-Systems kann jedoch nicht eindeutig bestimmt werden. Die Ursache dafür wird der Schalldämpferprüfstand sein, an dem nur ein einziges Loch in das Rohr gebohrt ist, um das Mikrofon einzuführen. Dadurch ist es sehr wahrscheinlich, dass Rohrmoden getroffen wurden und daher keine verwertbaren Ergebnisse gemessen werden können. Diese Art der Verfälschung lässt sich nur vermeiden, wenn an unterschiedlichen Stellen im Rohr gemessen werden kann. Dafür müssten weitere Löcher in das Rohr gebohrt werden. Die Bestimmung des  $D_{TL}$  würde daher sehr viel Aufwand durch die Präparation des Versuchstands und der vielen Messpositionen in Anspruch nehmen. Es können mit dem jetzigen Versuchstand keine sinnvollen Werte gemessen werden und das  $D_{TL}$  dient vor allem dazu, unterschiedliche Schalldämpfer miteinander zu vergleichen. Daher ist die Bestimmung des Durchgangsdämpfungsmaßes für das Praktikum irrelevant. Aus diesen Gründen wird davon abgeraten, das  $D_{TL}$  im Praktikumsversuch zu versuchen zu bestimmen.

Fehlerquellen für die Messwerte hinter dem Schalldämpfer sind wie auch bei der Bestimmung des  $D_{IL}$  der Versuchsraum, der etliche reflektierende, resonierende und absorbierende Gegenstände sowie Wände enthält, deren Wirkung nicht zuordenbar sind. Zudem können ebenfalls die Messgeräte, Stehwellen in der Rohröffnung und die hohen Störpegel die Messwerte außerhalb des Rohres verfälscht haben.

## 6 Fazit & Ausblick

Das Ziel des Projektes wurde erreicht. Der gegebene Schalldämpferprüfstand wurde optimiert und ist nun für die Verwendung in Praktika bereit. Zudem wurde das ANC-System des Schalldämpfers in Stand gesetzt. An diesem Schalldämpfer wurden Messungen zur Bestimmung des Einfügungs- und des Durchgangsdämpfungsmaßes durchgeführt. Aus diesen bestimmten Maßen lässt sich deutlich erkennen, dass der Schalldämpfer eine Pegelminderung herbeiführt und auch das ANC-System bei tiefen Frequenzen eine Wirkung aufweist. Für die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes wurden dabei zwei unterschiedliche Messmethoden angewandt. Einerseits wurde in Anlehnung an die Norm DIN 45 635 gemessen und andererseits mittig der Mündung. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass es für den Praktikumsversuch irrelevant ist, welche der beiden Messmethoden verwendet wird. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Messung mittig der Mündung keine Strömung beim Versuch zugeführt werden darf. Außerdem ist es für die Studenten lehrreicher, die Messung in Anlehnung an die DIN 45 635 kennenzulernen.

Die Messung des Durchgangsdämpfungsmaßes liefert bei dem gegebenen Versuchsstand keine verwertbaren Ergebnisse. Aus diesem Grund wird davon abgeraten, das  $D_{TL}$  bei dem Praktikumsversuch zu bestimmen. Um den möglichen Einfluss von Messungen an Orten mit Rohrmoden zu entgehen, wäre es denkbar mehrere Messungen an verschiedenen Positionen in der Rohrebene durchzuführen. Hierfür wäre es jedoch notwendig weitere Löcher für die Einführung von Mikrofonen in das Rohr zu bohren.

Zukünftige Projektgruppen sollten sich der Einführung von MATLAB in den Versuchsablauf widmen. Dadurch lässt sich das Überführen der Messwerte und das Berechnen des Einfügungsdämpfungsmaßes beschleunigen. Zudem können diese Gruppen Messungen mit Strömungszufuhr durchführen. Zusätzlich wäre es sinnvoll, den Versuchsraum zu optimieren, da die Ausstattung dessen zur Verfälschung der Messergebnisse beiträgt. Eine weitere Investition wert ist die Anschaffung eines anderen Trichters, um eine optimale Impedanzanpassung von Rohr zu Schalldämpfer gewährleisten zu können.

---

## Literaturverzeichnis

DIN 45 635 - Geräuschmessung an Maschinen, Teil 47. (Juni 1985).

DIN EN ISO 3740. (August 2019).

DIN EN ISO 3744. (Februar 2011).

DIN EN ISO 3746. (März 2011).

Einbauanleitung Abgasschalldämpfer. (August 2008). Kutzner + Weber.

Georgi, T. (2014). Aufbau und Untersuchung eines Demonstrators zur aktiven Schallminderung in Abgaskanälen. Mittweida.

Hübelt, J. (10. März 2019). Lärmarme Konstruktion - Noise Protection., (S. 77). Hochschule Mittweida.

# Anlagen

**Anlage 1 - Schallleistungspegel und Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{IL}$  in dB bei Messung in Anlehnung an DIN 56 635**

	<b>f in Hz</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
<b><math>L_w</math> in dB</b>	Rohr	70,6	82,2	91,4	90,6	91,7	85,7	92,0	92,3	86,3	79,8
	ohne ANC										
	mit ANC	76,8	77,8	77,5	85,5	86,2	83,2	87,5	79,2	73,9	66,7
<b><math>D_{IL}</math> in dB</b>	ohne ANC	68,3	69,4	72,2	78,8	81,8	82,6	86,0	76,9	72,5	66,7
	ohne ANC	-6,2	4,4	13,8	5,0	5,5	2,5	4,6	13,1	12,4	13,1
	mit ANC	2,3	12,9	19,2	11,7	9,9	3,1	6,0	15,4	13,8	13,1

**Anlage 2 - Schallleistungspegel und Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{IL}$  in dB bei Messung mittig der Mündung**

	<b>f in Hz</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
<b><math>L_w</math> in dB</b>	Rohr	69,5	81,1	90,8	89,0	89,2	84,5	91,8	90,2	84,3	79,1
	ohne ANC										
	mit ANC	75,8	76,3	76,9	84,5	85,2	81,4	86,2	77,3	72,5	64,3
<b><math>D_{IL}</math> in dB</b>	ohne ANC	67,2	67,6	71,5	77,8	80,6	80,8	84,6	75,3	71,0	64,3
	ohne ANC	-6,3	4,8	13,9	4,5	4,0	3,2	5,6	13,0	11,8	14,7
	mit ANC	2,3	13,5	19,3	11,2	8,6	3,8	7,2	14,9	13,3	14,7

**Anlage 3 - Durchgangsdämpfungsmaß  $D_{TL}$  in dB**

	<b>f in Hz</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
<b><math>D_{TL}</math> in dB</b>	ohne ANC										
	ohne ANC	18,4	26,7	32,6	11,9	22,5	24,9	20,9	23,3	22,5	26,4
	mit ANC	27,3	28,6	31,6	30,5	30,9	22,5	16,9	23,5	21,8	20,4

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt haben. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 28.02.2020



---

Ort, Datum

Sina Buchholz



---

Lorenz Ebisch

Oliver Gehler