

---

# **MASTERARBEIT**

---

Fr.  
**Mai Lan Luong-Pein**

**Überprüfung der Linearität der  
Übertragungsfunktion bei Wänden  
aus Kalksandstein  
(Prognoseverfahren für  
Körperschallquellen gemäß DIN  
7396)**



# **MASTERARBEIT**

---

## **Überprüfung der Linearität der Übertragungsfunktion bei Wänden aus Kalksandstein (Prognoseverfahren für Körperschallquellen gemäß DIN 7396)**

Autor:

**Mai Lan Luong-Pein**

Studiengang:

Ingenieurakustik

Seminargruppe:

IA17w1-M

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing.Jörn Hübelt

Zweitprüfer:

N.N.

Mittweida, 2022



---

## **Bibliografische Angaben**

Luong-Pein, Mai Lan: Überprüfung der Linearität der Übertragungsfunktion bei Wänden aus Kalksandstein (Prognoseverfahren für Körperschallquellen gemäß DIN 7396), 63 Seiten, 51 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Ingenieurwissenschaften

Masterarbeit, 2022

**Referat**



---

# I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	II
Tabellenverzeichnis .....	III
Vorwort .....	IV
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik zur Linearität der Übertragungsfunktion .....	3
2.1 Erkenntnisse über Prognoseverfahren mit Übertragungsfunktionen .....	3
2.2 Erkenntnis über die Nichtlinearität des Verlustfaktors und der Schalldämmung in Abhängigkeit zur Anregungsart .....	4
2.3 LTI-System, Übertragungsfunktion, Nichtlineare Verzerrung .....	6
3 Konzept für das weitere Vorgehen .....	11
3.1 Defizit im Kenntnisstand- Ziel der Untersuchung .....	11
3.2 Umsetzung .....	11
4 Messung .....	13
4.1 Messaufbau .....	13
4.1.1 Prüfstand .....	13
4.1.2 Messgeräte .....	15
Zur Anregung .....	15
Zur Signalaufnahme .....	16
4.1.3 Anregung .....	17
Stationäre Anregung .....	17
Transiente Anregung .....	18
4.2 Messwertverarbeitung und Auswertung .....	18
4.2.1 Datenimport .....	20
4.2.2 Synchronisationskorrektur .....	20
Stationäre Anregung .....	20
Transiente Anregung .....	21

---

4.2.3 Mittelwertbildung und Terzmittelung der Nutzsignale .....	21
4.2.4 Berechnung der Übertragungsfunktionen und weiterer Bewertungsparameter .....	23
Stationäre Anregung .....	23
Transiente Anregung .....	24
4.3 Plausibilitätsprüfung .....	25
4.3.1 Verhältnis zwischen dem Beschleunigungspegel $L_a$ auf der Trennwand und dem Schalldruckpegel $L_p$ im Empfangsraum .....	25
4.3.2 Verhältnis zwischen dem Anregungskraftpegel $L_F$ und dem mittleren Schalldruckpe- gel $L_p$ im Empfangsraum .....	28
5 Bewertung der Ergebnisse .....	31
5.1 Auswahl von Messdaten .....	31
5.2 Bewertung der Linearität .....	32
5.2.1 stationäre Anregung .....	33
5.2.2 Transiente Anregung .....	40
5.2.3 Vergleich zwischen stationärer und transientser Anregung .....	48
6 Fazit .....	55
A Ablauf der Datenverarbeitung für Messungen mit Shaker-Anregung, mittels Funktio- nen und Datenstrukturen .....	57
B Ablauf der Datenverarbeitung für Messungen mit Hammer-Anregung, mittels Funk- tionen und Datenstrukturen .....	59
Literaturverzeichnis .....	61

## II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema des Prognoseverfahrens mit Übertragungsfunktion nach EN ISO 10848-1 ..	4
2.2	Verlustfaktor eines 24 cm KS Wand, 5 mm Putz, Wandprüfstand PTB; 4 verschiedene Hämmer 150 - 950 g (H), 2 Shaker mit verschiedenen Größen und Kraftbereichen (S) [4] .....	5
2.3	gemessener Verlustfaktor einer Kalksandstein-Wand, Anregungen mit Hammer und Shaker verschiedener Stärken [4] .....	5
2.4	Nichtlinearität bei Messungen von Transferfunktion bei Hammer-Anregung [4] .....	6
2.5	Nichtlinearität bei Schalldämm-Maß bei der Anregung mit Schreckschusspistole [4] ..	7
2.6	Reaktion des LTI-Systems auf ein Eingangssignal .....	9
2.7	Beispiel an Linearisierung .....	10
3.1	Anregung der Wand mit einer Körperschallquelle .....	12
3.2	Schema der Umsetzung .....	12
4.1	Messaufbau im Wandprüfstand (Aufsicht) .....	14
4.2	Messaufbau im Empfangsraum .....	14
4.3	Messaufbau mit dem Midi-Hammerwerk an die Trennwand .....	15
4.4	Messaufbau mit dem Schwingerreger an die Trennwand .....	16
4.5	Messplan .....	19
4.6	interpoliertes Störsignal, korrigiertes Messsignal im Vergleich zu dem FFT-Eingangssignal (hierbei: Trennwand , Shakeranregungsstärke 3, ohne Putz, Input 5) .....	21
4.7	Unterschiedliche Spektrumbesetzung des Nutzsignale bei $L_{Fmitt}$ , $L_{amitt}$ , $L_{pmitt}$ : Messung mit Shakeranregung mit Putz an der Trennwand, Anregungsstärke 1, Terzbänder von 100 Hz bis 630 Hz .....	22
4.8	TerzSelect .....	23
4.9	Vergleich zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel $L_p$ und dem aus $L_a$ berechneten, abgestrahlten Schalldruckpegel, Messung an der Trennwand - Shakeranregung, mit Putz .....	27

4.10 Vergleich zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel $L_p$ und dem aus $L_a$ berechneten, abgestrahlten Schalldruckpegel, Messung an der Trennwand - Hammeranregung, mit Putz .....	27
4.11 Vergleich zwischen $L_{Fsoll}$ und $L_{FBlock}$ , Messung an der Trennwand, Hammerwerk-anregung, ohne Putz .....	30
4.12 Differenz zwischen $L_{Fsoll}$ und $L_{Fmess}$ , $\Delta L_F = L_{Fsoll} - L_{Fmess}$ , Messung an der Trennwand, Shakeranregung, ohne Putz .....	30
5.1 Trennwand, stationäre Anregung mit Putz, Anregungstäke 1 .....	31
5.2 Trennwand, transiente Anregung mit Putz, Anregungsart AH1 (-3 dB, 2 Hz) .....	32
5.3 Trennwand, transienente Anregung ohne Putz, Anregungsart AH1 (-3 dB, 2 Hz) .....	33
5.4 Längswand, transiente Anregung, Anregungsart 5 (+3 dB, 10 Hz) .....	34
5.5 gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz .....	35
5.6 gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz ....	36
5.7 gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Längswand, Shaker-Anregung .....	36
5.8 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz .....	38
5.9 Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta L_{Hp\_ASS}$ , $\Delta L_{Ha\_ASS}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz .....	38
5.10 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz .....	39
5.11 Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta L_{Hp\_ASS}$ , $\Delta L_{Ha\_ASS}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz .....	39
5.12 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung mit und ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken .....	40
5.13 Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta L_{Hp\_ASS}$ , $\Delta L_{Ha\_ASS}$ für die Trennwand, Shaker-Anregung mit und ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken .....	41
5.14 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Längswand, Shaker-Anregung .....	41
5.15 Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta L_{Hp\_ASS}$ , $\Delta L_{Ha\_ASS}$ für die Längswand, Shaker-Anregung	42
5.16 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz .....	42
5.17 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz ....	44
5.18 Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Längswand, Hammer-Anregung .....	44
5.19 Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta L_{Hp\_ASS}$ , $\Delta L_{Ha\_ASS}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz .....	45

---

5.20	Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta LH_{p\_AS5}$ , $\Delta LH_{a\_AS5}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz .....	45
5.21	Übertragungsfunktionsdifferenz $\Delta LH_{p\_AS5}$ , $\Delta LH_{a\_AS5}$ für die Längswand, Hammer-Anregung .....	46
5.22	Pegeldifferenz $D_{p\_AH5}$ , $D_{a\_AH5}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz .....	46
5.23	Pegeldifferenz $D_{p\_AH5}$ , $D_{a\_AH5}$ für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz .....	47
5.24	Pegeldifferenz $D_{p\_AH5}$ , $D_{a\_AH5}$ für die Längswand, Hammer-Anregung .....	47
5.25	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ der Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung mit Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken .....	49
5.26	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ der Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken .....	50
5.27	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ der Längswand , Hammer- und Shaker-Anregung, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken .....	51
5.28	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung mit Putz, ausgewählte Anregungsstufen .....	52
5.29	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung ohne Putz, ausgewählte Anregungsstufen .....	52
5.30	Übertragungsfunktion $L_{Hp}$ , $L_{Ha}$ für die Längswand , Hammer- und Shaker-Anregung, ausgewählte Anregungsstufen .....	53



---

## III. Tabellenverzeichnis

4.1	Eingabe der elf Messeingänge der Multianalysator OROS .....	17
4.2	Einstellung des Multisinus-Signals für die stationäre Anrerung .....	18
4.3	Einstellung des Hammerwerks für die transiente Anregung .....	18
4.4	Blockierte Kraft $L_{Fb,eq,stm}$ des Midi-Hammerwerks als Pegel re $F_0 = 10^{-6}$ N, horizon- tale Anregung, Schlagfrequenz 10 Hz, Quelle [9], Tabelle 1 .....	25
5.1	stationäre Anregungen mit dem Shaker, gekennzeichnet durch den mittlere Terzpegel bei 1000 Hz der Anregungskraft $L_{F\_1000Hz}$ .....	34
5.2	Transiente Anregungen mit dem Midi-Hammerwerk.....	40
5.3	Der Bezugswert $F_{500Hz}$ für den Vergleich der Übertragungsfunktionen der schwächs- ten und stärksten Anregungsstufen der transienten und stationären Anregungen .....	49



## IV. Vorwort

Zunächst gilt mein Dank der Arbeitsgruppe 1.72 der P.T.B mit der Leitung von Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Wittstock, in der ich als externer Student die Masterarbeit durchführen konnte. Die fachliche Betreuung von Herrn Dr.- Ing Wittstock und Herrn Dr.Schmelzer sowie die technische Unterstützung bei Messungen durch Herrn Kevin Picker bilden die wesentliche Grundlage für diese Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Zwischen Planung des Vorhabens und Abschluss dieser Arbeit liegen zwei meiner Schwangerschaften, eine Geburt, mehrere Corona-Lockdowns mit Homeoffice und Betreuung meines älteren Sohnes im Homeschooling und weitere Herausforderungen. Der Einsatz meines Mannes, meiner Schwiegereltern, meiner Eltern und die Geduld meiner Kinder haben die privaten Rahmenbedingungen für diese Arbeit gelegt.

Zuletzt möchte ich mich beim Herrn danken. Ohne seinen Segen für Kraft und Mut hätte ich das Studium nicht bis zu diesem Ziel gebracht.

Abschließend richte ich meinen Dank an alle die Menschen, die mich in meinem Master-Studium unterstützt haben: Hon.-Prof. Dr.-Ing. Volker Wittstock, Dr. Martin Schmelzer, Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübel, Kevin Picker, Dr.Joschua Merlis, Dr.Thomas Reiber, Stephan Preiss, Christoph Kluge, Familie Förster, meine Schwiegereltern Angelika und Ulrich Pein, meine Eltern Luong The Dung und Nguyen Thi Minh Huan, mein Ehemann Thomas Pein und meine Kinder Josua, Philipp und das Baby im Bauch.



# 1 Einleitung

Der Schallschutz ist in Deutschland ein verpflichtender Bestandteil der bauakustischen Planung, die beim Neubau oder Umbau von Gebäuden erforderlich ist. Mit der DIN 4109-1 wird vom Gesetzgeber ein Standard für die Bauakustik festgelegt. Die Empfehlungen und Anforderungen der DIN 4109-1 werden in den Schutz gegen Luftschall sowie gegen Körperschall - je nach Bauteil und Nutzungssituation - aufgeteilt. Als Grundlage für die Implementierung der DIN 4109-1 werden weitere Teile der DIN 4109 und der DIN EN 12354 verwendet. Die Luftschalldämmung zwischen Räumen wird für alle Trennbauteile wie Decken, Wände oder Türen geregelt und berechnet, während bei Trittschalldämmung nach aktuellem Stand nur die trittbelasteten Bauteile, wie Decken, Treppen und Podeste relevant sind. Zum Beispiel liefert bei der Planung von Treppen im Gebäude die DIN 4109-2 ausschließlich Angaben zur Bewertung der Trittschalldämmungsmaßnahme von Treppenlauf und Podest (gilt für Stahlbetonpodest oder -treppenlauf mit einer Dicke  $d \geq 120$  mm). Außer dem Hinweis auf die massive Ausführung der Treppenwand und der Entkopplung des Treppenlaufs von der Wand wird die Übertragung durch die Wand nicht bewertet. Die Anregung von Wänden durch Körperschallquellen für solche Planungssituationen wird jedoch zunehmend in Betracht gezogen. Deshalb werden Konzepte entwickelt, die Trittschalldämmung von Wänden durch Wand-Trittschallpegel zu charakterisieren.

Für die Bestimmung des Norm- Trittschallpegels einer Wand gibt es aktuell zwei Ansätze: die direkte Methode durch Messung und die indirekte Methode durch Berechnung mit der Übertragungsfunktion.

Die direkte Messung ist im Ansatz ähnlich, wie die Messung des Norm-Trittschallpegels einer Deckenkonstruktion, nur mit speziellen Hammerwerken, welche sich in horizontaler Richtung betreiben lassen. Für die Prüfung von vorhandenen Wandaufbauten ist die direkte Methode gut geeignet.

Für die Planung ist jedoch ein einfaches Prognoseverfahren notwendig. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kann die indirekte Methode dies erfüllen. Dabei wird aus der Übertragungsfunktion, welche bei Anregung durch einen Schwingerregers gemessen wird, und der ermittelten Kraft des Hammerwerks der Norm-Trittschallpegel berechnet.

Die indirekte Methode ist nur anwendbar, wenn die Übertragungsfunktion einer Wand linear ist. Auf einer homogenen Betonplatte wurde dies bestätigt, für andere Wandbauarten ist es jedoch noch unbekannt, ob die Linearität der Übertragungsfunktion auch vorliegt.



## 2 Stand der Technik zur Linearität der Übertragungsfunktion

### 2.1 Erkenntnisse über Prognoseverfahren mit Übertragungsfunktionen

In Rahmen der Entwicklung einer neuen Norm zur Messung des Trittschallpegels von Wänden wurde die Abschlussarbeit "Bestimmung des Norm- Trittschallpegels durch direkte Messung und mit Übertragungsfunktionen" [7] angefertigt. In dieser Arbeit wurden Messverfahren zur Bestimmung des Norm-Trittschallpegels durch direkte Messung mit einem Hammerwerk und indirekt durch Prognose mittels gemessener Übertragungsfunktion untersucht. Unter anderen Vergleichsversuchen wurden die Ergebnisse beider Methoden miteinander verglichen, um heraus zu finden, ob und mit welcher Genauigkeit die Prognose der indirekten Methoden funktioniert.

Für die Prognose des Schalldruckpegels in einem Empfangsraum wird die Raumübertragungsfunktion  $D_{RTF,ik}$  angewendet:

$$D_{RTF,ik} = L_{w,inst,k} - L_{p,ik} \quad (2.1)$$

- $L_{w,inst,k}$ : der Schalleistungspegel der Anregung an einem Punkt  $k$
- $L_{p,ik}$ : der Schalldruckpegel als Antwort an der Empfängerposition  $i$

Für die Prognose des Schnellepegels auf einer Platte wird die Strukturübertragungsfunktion  $D_{STF,ik}$  angewendet:

$$D_{STF,ik} = L_{w,inst,k} - L_{v,ik} \quad (2.2)$$

- $L_{w,inst,k}$ : der eingeleitete Körperschalleistungspegel der Anregung an einem Punkt  $k$
- $L_{p,ik}$ : der Schallschnellepegel als Antwort an der Empfängerposition  $i$  auf der Platte

Als Eingangsgröße dient die eingeleitete Körperschalleistung  $L_{w,inst,k}$  eines Hammerwerks, ermittelt aus der gemessenen blockierten Kraft oder der berechneten Kraft des Hammerwerks. Die Versuchsmessung wurde auf einer homogenen Empfangsplatte aus Beton durchgeführt. Die Übertragungsfunktionen wurden nach EN ISO 10848-1 gemessen. Eine Prüfung mit einem Impulshammer bestätigte die Linearität der Messung der Übertragungsfunktion auf dieser Platte. Die Ergebnisse des Vergleichsversuchs haben gezeigt, dass die Prognose mit den Übertragungsfunktionen mit einer guten Genauig-

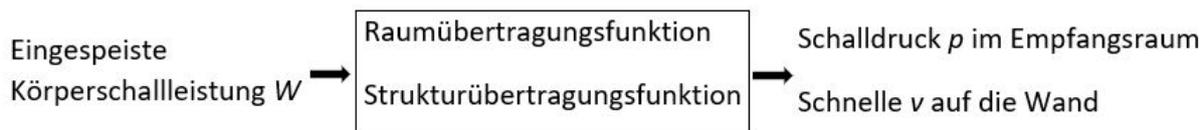


Abbildung 2.1: Schema des Prognoseverfahrens mit Übertragungsfunktion nach EN ISO 10848-1

keit funktioniert. Die Abweichungen der Einzulangaben von etwa 1 dB sind sehr gering. Daraus lässt sich schließen, dass, solange die Linearität besteht, die Prognosemethode mit Übertragungsfunktionen geeignet ist, um den Trittschallpegel ausreichend genau zu bestimmen.

## 2.2 Erkenntnis über die Nichtlinearität des Verlustfaktors und der Schalldämmung in Abhängigkeit zur Anregungsart

Aus dem Standardprognoseverfahren für die Schalldämmung einschaliger Bauteile ist bekannt, dass die Schalldämmung eines Bauteiles maßgeblich von dem Verlustfaktor des jeweiligen Baustoffs abhängt [6], [8]:

$$R = f(\eta) \quad (2.3)$$

Diese Grundbeziehung setzt die Linearität voraus, so dass der Verlustfaktor nicht von der Anregungsstärke, sondern allein von der Materialeigenschaft abhängt.

In der Veröffentlichung "Loss factor measurement and indications for nonlinearities in sound insulation" [4] der PTB Braunschweig wurde diese Voraussetzung überprüft. Dabei wurden Vergleichsmessungen an verschiedenen Wandarten mit transienten und stationären Anregungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bei der transienten Anregung mit Hammer eine Nichtlinearität bei der Ermittlung des Verlustfaktors auftritt. Der ermittelte Verlustfaktor ist höher bei der Hammer-Anregung als bei der Shaker-Anregung, besonders in den mittleren Frequenzbereichen zwischen 200 Hz und 2000 Hz. Dabei erhöhen sich die Messwerte mit der Anregungsstärke des Hammers. Andererseits ist die Nichtlinearität bei der stationären Anregung mit Standard-Schwingerreger (unter 8 kg) nicht sichtbar. Es sind keine klaren Unterschiede der Messwerte bei Variation der Anregungsstärke zu erkennen (Abbildung 2.2). Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass der Kraftbereich der Hammeranregung viel höher als bei der Shaker-Anregung liegt. Erst beim Einsatz eines sehr großen Schwingerregers (250 kg) nähert sich der Messwert des Verlustfaktors den Werten mit Hammeranregung. Bemerkenswerterweise liefert die Shaker-Anregung mit der größten Kraft den gleichen Verlustfaktor wie die Hammeranregung mit der kleinsten Kraft (Abbildung 2.3). Durch

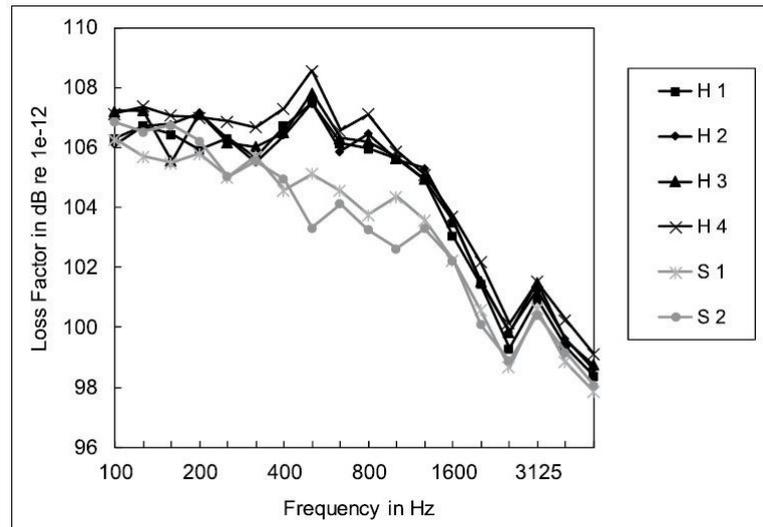


Abbildung 2.2: Verlustfaktor eines 24 cm KS Wand, 5 mm Putzt, Wandprüfstand PTB; 4 verschiedene Hämmer 150 - 950 g (H), 2 Shaker mit verschiedenen Größen und Kraftbereichen (S) [4]

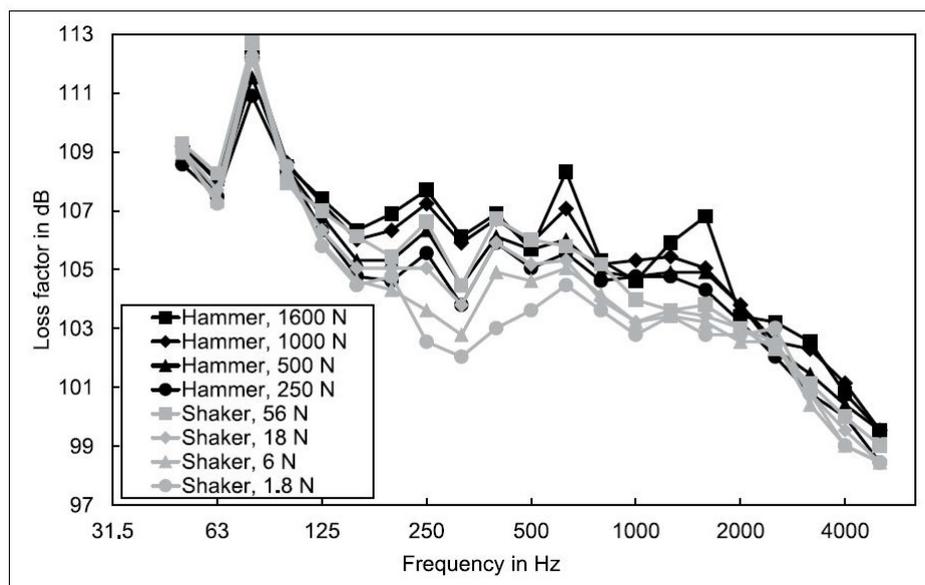


Abbildung 2.3: gemessener Verlustfaktor einer Kalksandstein-Wand, Anregungen mit Hammer und Shaker verschiedener Stärken [4]

den Vergleich der Transferfunktionen ist nochmal deutlich zu erkennen, dass die Linearisierung der Messung bei der Anregung mit Hammer nicht mehr gewährt wird (Abbildung 2.4). Außerdem wurde bei den Vergleichsmessungen an einer Kalksandsteinwand, einer Stahlbetonwand und einer Holzständerwand festgestellt, dass die Nichtlinearität aufgrund der hohen Anregungskraft einer Körperschallquelle nur bei der Kalksandsteinwand vorkommt, und nicht bei den beiden anderen Wandarten.

Es wurde ebenfalls der Einfluss der Anregungsstärke von Luftschallquellen auf die Linearität der Schalldämmung untersucht. An dem Wandprüfstand mit der Trennwand aus

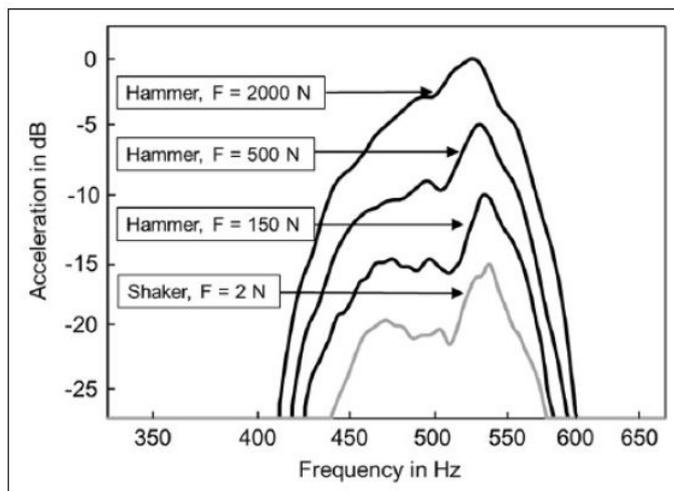


Abbildung 2.4: Transferfunktion bei verschiedenen Anregungen (Für den Vergleich wird die Kraft jeweils bei 500 Hz als Bezug genommen) [4]

24 cm Kalksandstein wurde die Schallpegeldifferenz mit verschiedenen Luftschallquellen gemessen. Bei dem Einsatz von Lautsprechern mit verschiedenen Schalldruckpegeln bis zu 125 dB ändern sich die ermittelten Schallpegeldifferenzen der Trennwand nicht abhängig von der Lautstärke. Bei der Anregung mit einer Schreckschusspistole mit Schalldruckpegeln von 125 dB bis 134 dB ist die Nichtlinearität sichtbar: Die Schallpegeldifferenz zwischen Empfangs- und Senderraum steigt mit dem Schalldruckpegel im Senderraum (Abbildung 2.5). Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Messergebnisse der Verlustfaktoren der Kalksandsteinwand bei Anregung mit Shaker oder Hammer voneinander abweichen. Diese Nichtlinearität der Verlustfaktoren ist ausschließlich bei der Kalksandsteinwand zu beobachten, bei den Wandarten Stahlbeton oder Leichtbauwand weichen die Ergebnisse der genannten Varianten nicht voneinander ab. Ebenso wird eine Nichtlinearität bei Anregung mit der Schreckschusspistole festgestellt. Ab 125 dB erhöht sich dabei die Schalldruckdifferenz zwischen Empfangs- und Senderraum mit der Stärke des Anregungssignals im Senderraum. Diese Erkenntnisse sind relevant für Messungen von Verlustfaktoren, Transferfunktionen, die Flankenübertragung und den Trittschallpegel auf Wänden und somit bei Prognoseverfahren mit diesen Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

## 2.3 LTI-System, Übertragungsfunktion, Nichtlineare Verzerrung

In der Theorie der Signal- und Systemanalyse wird ein System als linear und zeitinvariant (LTI-System) betrachtet, wenn die Beziehungen zwischen den Koordinaten in dem System linear und von der Zeitverschiebung unabhängig sind. Die Linearität des Systems besteht, wenn aus einer Linearkombination von Eingangssignalen die selbe Linearkombination in den Ausgangssignalen ermittelt wird.

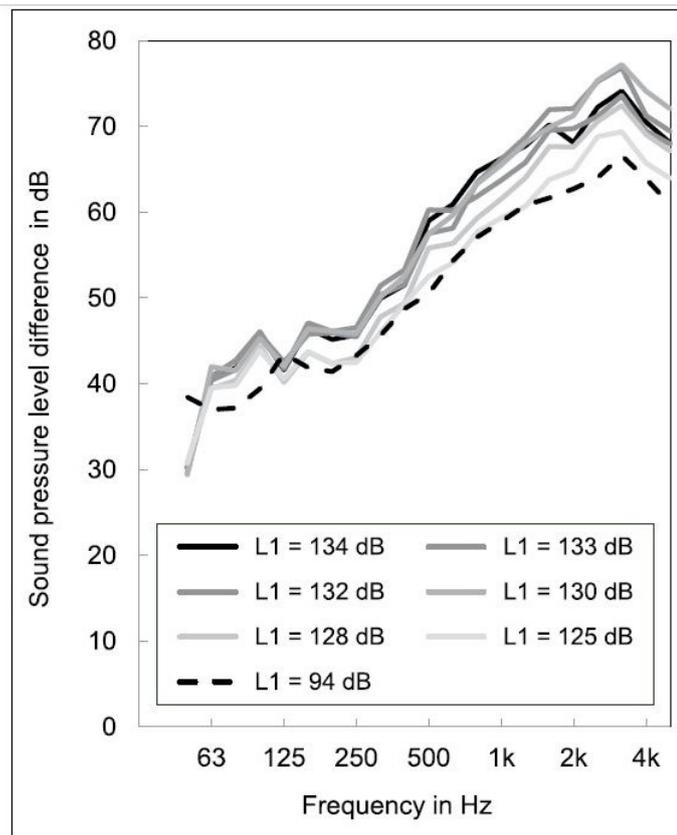


Abbildung 2.5: Schalldruckpegeldifferenz zwischen Sende- und Empfangsraum bei verschiedenen Sendepiegeln (L1 entspricht jeweils dem Sendepiegel bei 1 kHz, ab dem Pegel von L1 = 125 dB wird das Signal von der Schreckschusspistole emittiert und mit der Zeitbewertung 'Fast' erfasst) [4]

Schematisch lässt sich ein System mit linearer Übertragungskennlinie wie folgt beschreiben:

$$x_a(t) = a x_e(t) \quad (2.4)$$

Daraus wird aus einem Eingangssignal von:

$$x_e(t) = p \cos \omega_1 t + q \cos \omega_2 t \quad (2.5)$$

ein Ausgangssignal von:

$$x_a(t) = a p \cos \omega_1 t + a q \cos \omega_2 t \quad (2.6)$$

entstanden.

Im Fall, dass die Übertragungskennlinie nicht linear ist, wird die Übertragungsfunktion in eine Potenzreihe entwickelt:

$$x_a(t) = a x_e(t) + b x_e^2(t) + c x_e^3(t) + \dots \quad (2.7)$$

Daraus folgt:

- Sei:  $x_e(t) = p \cos \omega_1 t$   
Dann:  $x_a(t) = ap \cos \omega_1 t + bp^2 \cos^2 \omega_1 t + cp^3 \cos^3 \omega_1 t + \dots$

Mit dem Additionstheorem  $\cos^2 a = \frac{1 + \cos 2a}{2}$   
lässt sich die Reihe umwandeln in:

$$x_a(t) = \left(\frac{bp^2}{2}\right) + \left(ap + \frac{3cp^3}{4}\right) \cos \omega_1 t + \left(\frac{bp^2}{2}\right) \cos 2\omega_1 t + \left(\frac{cp^3}{4}\right) \cos 3\omega_1 t + \dots \quad (2.8)$$

- Aus dem Eingangssignal (2.5) entsteht ein Ausgangssignal in der Form:

$$x_a(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cos \omega_i t \quad (2.9)$$

Zu dem obigen Ausgangssignal kommen die Terme  $(\cos^n \omega_1 t \cdot \cos^m \omega_2 t)$  zusätzlich hinzu. Mit dem Additionstheorem  $\cos a \cdot \cos b = \frac{\cos(a-b) + \cos(a+b)}{2}$  erhält man das Ausgangssignal  $x_a(t)$  als Summe von Termen der Form  $(A_i \cos \omega_i t)$ . [2]

Frequenz	Vorfaktor $A_i$		
	1.Ordnung(linear)	2.Ordnung(quadrat)	3.Ordnung(kubisch)
$\omega$			
[0]		$[b(p^2 + q^2)/2]$	
$\omega_1,$ $\omega_2$	$ap$ $aq$		$3q^3c/4 + 3q^2pc/2$ $3p^3c/4 + 3p^2qc/2$
$2\omega_1,$ $2\omega_2$		$bp^2/2$ $bq^2/2$	
$3\omega_1,$ $3\omega_2$			$cp^3/4$ $cq^3/4$
$\omega_1 + \omega_2,$ $ \omega_1 - \omega_2 $		$bpq$	
$2\omega_1 + \omega_2,$ $ 2\omega_1 - \omega_2 $			$3p^2qc/4$
$\omega_1 + 2\omega_2,$ $ \omega_1 - 2\omega_2 $			$3q^2pc/4$
...USW.			

Dabei sind die Terme der 2. und 3. Ordnungen die nichtlinearen Verzerrungsprodukte. Eine nichtlineare Verzerrung verursacht deshalb im Ausgangssignal zusätzliche Signalanteile des Vielfachen der ursprünglichen Eingangs-Signalfrequenz.

Das LTI-System ist ein grundlegendes Modell der System- und Signalanalyse. Dessen Eigenschaft ermöglicht, komplexe Eingangssignale mit einer Summe periodischer Signale anzunähern und dadurch das System sowie den Zusammenhang zwischen dem Ein- und Ausgangssignal im Zeit und Frequenzbereich zu analysieren. Im Zeitbereich

wird das System durch die Impulsantwort  $h(t)$ , die man durch Anregung des Systems mit dem Dirac-Stoß erhält, vollständig beschrieben; das Ausgangssignal ist dabei gleich dem Eingangssignal gefaltet mit der Impulsantwort.

Im Frequenzbereich wird das System mit der Übertragungsfunktion  $\underline{H}(\omega)$  beschrieben, welche der Fourier-Transformation der Impulsantwort entspricht. Die Übertragungsfunktion oder der Frequenzgang eines linearen Systems lässt sich dabei als das Verhältnis zwischen Ausgangssignal und Eingangssignal ermitteln.

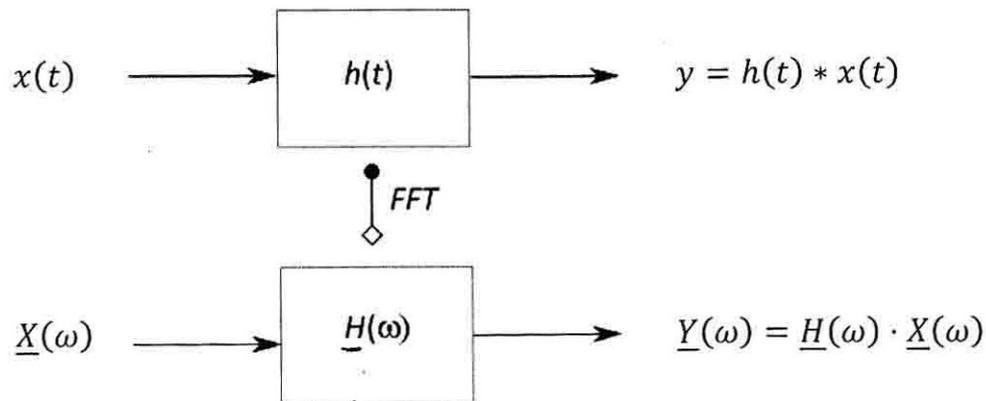


Abbildung 2.6: Reaktion des LTI-Systems auf ein Eingangssignal - Quelle [1]

Reale Systeme sind meist nichtlinear. Eine Annäherung zur Linearität ist allerdings möglich: Nichtlineare Systeme können bei kleinen Erregeramplituden näherungsweise als lineare Systeme aufgefasst werden [1]. Dabei lässt sich mit zwei Merkmalen erkennen, wenn die Linearität nicht mehr eingehalten wird. Dies ist erstens die nichtlineare Verzerrung: Am Ausgang von LTI-Systemen erscheinen nur Frequenzen, die auch im Eingangssignal vorhanden sind. Bei einer nichtlinearen Verzerrung entstehen zusätzliche Signalanteile des Vielfachen der ursprünglichen Signalfrequenz. Zweitens beschreibt die definierte Übertragungsfunktion das System unabhängig von der Stärke des Eingangssignals. Wenn der lineare Näherungsbereich überschritten wird, verändert sich dabei die ermittelte Übertragungsfunktion mit der Anregungsstärke.

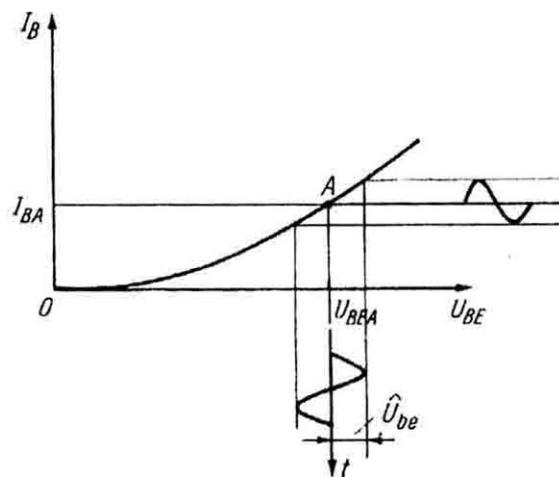


Abbildung 2.7: Beispiel für eine Linearisierung - Quelle: [3]

## 3 Konzept für das weitere Vorgehen

### 3.1 Defizit im Kenntnisstand- Ziel der Untersuchung

Wie im Abschnitt 2.1 erwähnt wurde, eignet sich das Prognoseverfahren mit der Übertragungsfunktion nach EN ISO 10848-1 für homogene Betonplatten, da dabei Linearität besteht und die Berechnungsergebnisse ausreichend genau sind. Jedoch wurde das Verfahren bisher an anderen Bauweisen nicht überprüft. Nach dem Kenntnisstand über Nichtlinearität bei Messung des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Anregungs- und Wandart (siehe Abschnitt 2.2) besteht die Vermutung, dass bei Körperschallanregung auch Nichtlinearität bei der Anregung mit dem Hammerwerk, vor allem bei der Kalksandsteinwand, auftreten kann.

Standardgemäß werden Treppenraumwände massiv ausgeführt. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der gemauerten Kalksandsteinwand, welche neben Stahlbeton eine übliche Ausführung von Treppenraumwänden in der Praxis ist. Es wird untersucht, ob die Linearität der Körperschallübertragung bei der Hammerwerk-Anregung auf Kalksandsteinwände vorliegt, so dass die Voraussetzung für die Messung der Übertragungsfunktion dabei erfüllt wird. Außerdem werden die Einflüsse von bestimmten konstruktionsbedingten Eigenschaften der Wand auf die Linearität dieser Messung überprüft.

### 3.2 Umsetzung

Für die Prognoseverfahren mit Übertragungsfunktion nach EN ISO 10848-1 dient die eingespeiste Körperschalleistung als Eingangsgröße (Abbildung 2.1). Gemäß des aktuellen Erkenntnisstands über die Nichtlinearität bei der Messung des Verlustfaktors wird die Nichtlinearität durch die Stärke der Anregungskraft verursacht (Abschnitt 2.2). Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit das Verhältnis zwischen der Anregungskraft und der entsprechenden Emission beim Empfänger direkt untersucht. Dabei wird die Anregungskraft als Vergleichsmaßstab festgelegt.

Bei verschiedenen Stärken der Anregungskraft werden zwei Übertragungsfunktionen mit der selben Anregungsquelle und auf dem selben Empfänger ermittelt. Es wird die transient und stationäre Anregungsart untersucht. Die Übertragungsfunktion  $H_p$  beschreibt den Zusammenhang zwischen der wirkenden Kraft  $F$  am Anregungspunkt auf der Prüfwand und dem abgestrahlten Schalldruck  $p$  in dem Empfangsraum:

$$H_p = \frac{\tilde{p}}{\tilde{F}} \quad (3.1)$$

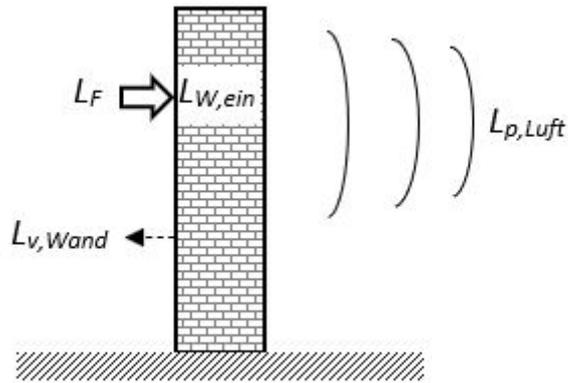


Abbildung 3.1: Anregung der Wand mit einer Körperschallquelle

in Pegelschreibweise:

$$L_{Hp} = \bar{L}_p - \bar{L}_F \quad (3.2)$$

Die Übertragungsfunktion  $H_a$  ist das Verhältnis zwischen der Anregungskraft und der resultierenden mittleren Beschleunigung  $a$  auf der Prüfwand:

$$H_a = \frac{\tilde{a}}{\tilde{F}} \quad (3.3)$$

in Pegelschreibweise:

$$L_{Ha} = \bar{L}_a - \bar{L}_F \quad (3.4)$$

Für die Bewertung der Vergleichsmessung bilden die Eigenschaften des LTI-Systems bzw. die Merkmale der Nichtlinearität im Abschnitt 2.3) die Grundlage.

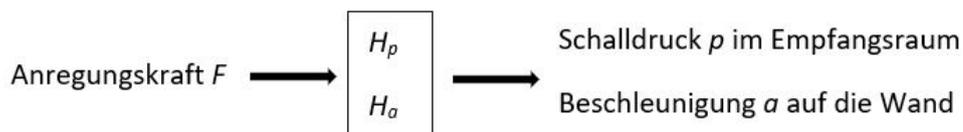


Abbildung 3.2: Schema der Umsetzung

## 4 Messung

### 4.1 Messaufbau

#### 4.1.1 Prüfstand

Die Messung findet an dem Wandprüfstand ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 10140 in der PTB Braunschweig statt. Der Prüfstand besteht aus zwei unterschiedlich großen Räumen. Bei dieser Untersuchung wird der kleine Raum mit einem Volumen von ca.  $53 \text{ m}^3$  als Senderraum und der große Raum mit einem Volumen von ca.  $58 \text{ m}^3$  als Empfangsraum festgelegt. Die Wände und Decken sind massiv. Der Übergang zwischen dem Empfangsraum und der Trennwand ist mit einer durchgehenden Trennfuge versehen.

Als Empfänger für die Anregung in der Untersuchung werden die Trennwand und die Längswand ausgesucht (Abbildung 4.1).

Die Trennwand ist 3,48 m breit, 2,77 m hoch und besteht aus einer einschaligen 24 cm starken Kalksandsteinwand mit einem speziellen Aufbau. Die Stoßfugenbildung erfolgt durch ein Nut-Feder-System, Steinrandbereiche sind - abweichend vom Standard - nicht vermörtelt. Übereinander liegende Steine sind nicht gemauert, sondern miteinander verklebt. Durch diesen speziellen Aufbau soll der individuelle Einfluss durch einen Maurer ausgeschlossen werden. Die Wand wird beidseitig mit einer 5 mm starken Putzschicht dicht verputzt. Die flächenbezogene Masse der Wand mit Putz beträgt  $440 \text{ kg/m}^2$ . Die Flankenübertragung wird mit einer Trennfuge unterdrückt.

Die Längswand besteht auch aus einer einschaligen 24 cm starken Kalksandsteinwand, welche normal gemauert und unverputzt ist.

Jeweils an der Trennwand und an der Längswand werden drei Anregungspunkte festgelegt. Die Abstände aller drei Anregungspunkte zu den Wandbegrenzungen betragen mindestens einen Meter.

Da bei der Anregung mittels Hammerwerk die Putzschicht meist verformt wird, wird der Einfluss der Putzschicht auf die Linearität der Übertragung auch einbezogen. Dafür werden die Anregungen an den Anregungspunkten auf der Trennwand jeweils inklusive und exklusive der Putzschicht durchgeführt.

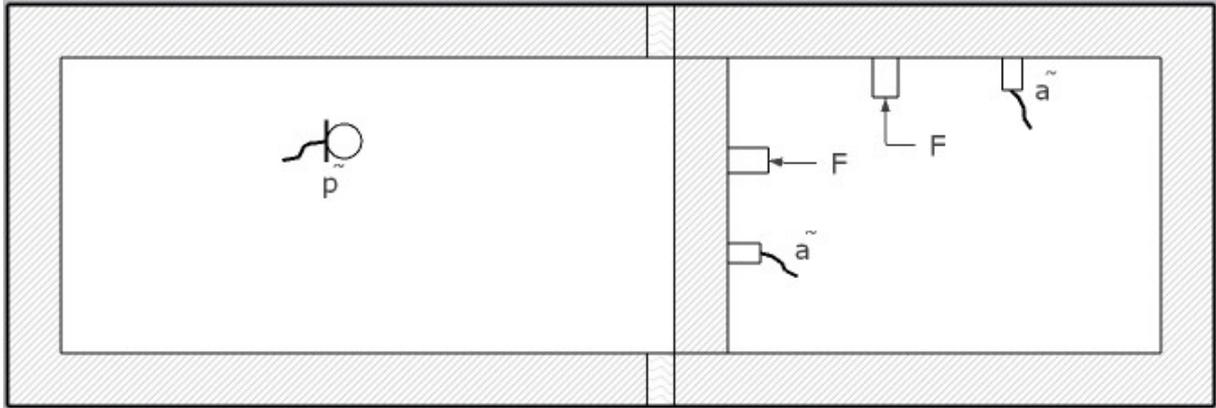


Abbildung 4.1: Messaufbau im Wandprüfstand (Aufsicht)



Abbildung 4.2: Messaufbau im Empfangsraum



Abbildung 4.3: Messaufbau mit dem Midi-Hammerwerk an die Trennwand

## 4.1.2 Messgeräte

### Zur Anregung

Die transiente Anregung erfolgt mit dem Midi-Hammerwerk der Firma Stratenschulte-Messtechnik mit verschiedenen Schlagfrequenzen und Abschwächungsstufen gegenüber dem Norm-Hammerwerk. Das Midi-Hammerwerk verfügt über einen elektromagnetischen Antrieb und ist deshalb in allen Richtungen einsetzbar. Durch das geringe Gewicht lässt sich das Gerät manuell direkt an dem Anregungspunkt festhalten.

Für die stationäre Anregung wird der Schwingerreger 4809 des Herstellers B&K eingesetzt. Mit Hilfe einer Aufhängungskonstruktion, welche zwischen der Decke und dem Boden aufgespannt wird, wird der Schwingerreger senkrecht mit einem Anregungspunkt gekoppelt. Der Schwingerreger verfügt über einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 kHz. Gemäß der technischen Dokumentation des Herstellers weist der Frequenzgang bei Anlegen einer konstanten Amplitude zwei Resonanzen auf. Die erste Resonanz liegt bei ca. 150 Hz und ist die Resonanz der Aufhängung. Im Bereich 700 Hz bis 5000 Hz bleibt der Pegel konstant. In dem gesamten angeregten Frequenzbereich der Messung von 50 Hz bis 10 kHz ist die Kraft des Schwingerregers über die Frequenzen nicht konstant. Jedoch wird das Untersuchungsziel von diesem Effekt nicht beeinträchtigt, da es sich bei der Auswertung um die Verhältnisse der Messergebnisse bei verschiedenen Amplituden der angelegten Signale und nicht absolute Werte handelt. Bei 16 kHz folgt eine scharfe Resonanzspitze, bei der es sich um die axiale Hauptresonanz des



Abbildung 4.4: Messaufbau mit dem Schwingerreger an die Trennwand

Schwingers selbst handelt. Die kritische Resonanzspitze bei 16 kHz liegt außerhalb des angeregten Frequenzbereiches und hat deshalb keinen Einfluss auf die Messungen.

### Zur Signalaufnahme

Für die Aufnahme des übertragenen Schalldruckpegels in dem Empfangsraum werden 1/2-Zoll-Messmikrofone des Herstellers B&K verwendet. Fünf Messpositionen werden in dem Raum in Anlehnung zum DIN EN ISO 10140 verteilt, so dass sich alle Messpositionen sich in dem Diffussschallfeld befinden. Zwischen dem Schwingerreger und dem Anregungspunkt wird ein Kraftaufnehmer eingebaut. Um die in die Wand eingespeiste Beschleunigung zu überwachen, wird direkt neben der Kontaktstelle eine Beschleunigungssensor aufgebracht. Auf die angeregte Wand, außerhalb des Direktschallfelds der Anregung, werden weitere vier Beschleunigungsaufnehmer installiert, um die mittlere Schnelle der Wand zu ermitteln.

Die Aufnahme der elf Eingangssignale bzw. die Steuerung der Eingangssignale in den Schwingerreger erfolgen mit dem Multianalysator OROS. Die Eingabe der elf Eingangssignalaufnehmer erfolgt wie in der Tabelle 4.1. Die Empfindlichkeit (Sensitivity) der Mikrofone und Beschleunigungsaufnehmer wurde aus der Kalibration vor der ersten Messung entnommen. Der Kraftaufnehmer Endevco 2311100 wurde nicht kalibriert. Die eingegebene Empfindlichkeit wurde aus den technischen Daten übernommen. Aus der Abschlussarbeit von Herrn Dehbozorgis [11] wurde bereits festgestellt, dass die Empfindlichkeit dieses Kraftaufnehmer 0,14503 mV/N betragen soll. Zwischen dem Kraftsignal, gemessen mit der eingegebenen Empfindlichkeit ( $E1 = 22,98 \text{ mV/N}$ ), und dem Kraftsignal mit der Soll-Empfindlichkeit ( $E2 = 0,14503 \text{ mV/N}$ ) ergibt sich ein Unterschied von:

$$\Delta L_F = 20 \lg \frac{E1}{E2} \text{ dB} = 20 \lg \frac{22,98 \text{ mV/N}}{0,14503 \text{ mV/N}} = 44 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Tabelle 4.1: Eingabe der elf Messeingänge der Multianalysator OROS

Label	Transducer	Physical qty.	Sensitivity	Range pk
Input 1	BK 4165 - 1297159	Acoustic pressure	42.286E-03 (V)/(Pa)	96.4 dB
Input 5	BK 4165 - 1120432	Acoustic pressure	44.333E-03 (V)/(Pa)	90.5 dB
Input 6	BK 4165 - 1340488	Acoustic pressure	32.855E-03 (V)/(Pa)	103.6 dB
Input 7	BK 4165 - 1002636	Acoustic pressure	47.332E-03 (V)/(Pa)	96.0 dB
Input 8	BK 4165 - 1340272	Acoustic pressure	52.5E-03 (V)/(Pa)	95.1 dB
Input 10	Endevco2311100 - 3337	Force	22.98 m(V)/(N)	2.61 N
Input 11	BK 4508002 - 30346	Accerelation	98.6 m(V)/(m/s <sup>2</sup> )	406 m/s <sup>2</sup>
Input 13	BK 4328V - 10302	Accerelation	2.7901 m(V)/(m/s <sup>2</sup> )	11.3 m/s <sup>2</sup>
Input 14	BK 4328V - 10874	Accerelation	3.2562 m(V)/(m/s <sup>2</sup> )	18.4 m/s <sup>2</sup>
Input 15	BK 4328V - 10930	Accerelation	2.8942 m(V)/(m/s <sup>2</sup> )	20.7m/s <sup>2</sup>
Input 16	BK 4328V - 10878	Accerelation	3.289 m(V)/(m/s <sup>2</sup> )	53.2m/s <sup>2</sup>

Der berechnete Unterschied  $\Delta L_F$  wird mit der Plausibilitätsprüfung (Kapitel 4.3) bestätigt und wird bei der Auswertung auf das gemessene Kraftsignal aufaddiert.

### 4.1.3 Anregung

#### Stationäre Anregung

Um die Linearität der Körperschall-Übertragung zu prüfen, eignet sich das Multisinus-Signal als Anregungssignal, welches über gleiche Amplituden bei definierten Frequenzen mit gleichen Abständen verfügt.

$$u(t) = \sum_i A \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (4.2)$$

Dadurch können sich nichtlineare Verzerrungen im Ausgangssignal gut erkennen lassen. Denn dieser Effekt erzeugt Signalanteile bei Vielfachen der ursprünglichen Signalfrequenz (siehe Abschnitt 2.2) und kann auch bei Nicht-LTI-Systemen festgestellt werden.

Das Spektrum des Multisinus-Signals soll den erweiterten Frequenzbereich der Bauakustik von 50 Hz bis 10 kHz abdecken. Ein geringer Abstand von 12,5 Hz zwischen den angeregten Frequenzen wird gewählt, damit möglichst viel Frequenzen angeregt werden. Weitererhin soll die Übersteuerung beim Starten des Anregungssignals durch zufällige Phasenverschiebung zwischen den Sinussignalen verhindert werden. Um verschiedene Anregungsstärken zu realisieren wird das Multi-Sinus-Signal in fünf Stufen verstärkt. Der Stufenabstand beträgt dabei 5 dB.

Tabelle 4.2: Einstellung des Multisinus-Signals für die stationäre Anregung

Spektrum	50 Hz – 10 kHz
Auflösung	12,5 Hz / 801 Lines
Phasenverschiebung	random
Verstärkungstufe	25 mV/20 mA 92,6 mV/78 mA 277,7 mV/233 mA 833,3 mV/698 mA 2500 mV/2040 mA

### Transiente Anregung

Bei der transienten Anregung mit dem Midi-Hammerwerk wird die Anregungskraft nach der Einstellungsmöglichkeit des Hammerwerks durch die Schlagfrequenz und die Schlagstärke variiert. Die Schlagfrequenz lässt sich mit 2 Hz oder 10 Hz einstellen. Die Schlagstärke wird in der Relation zum Norm-Hammerwerk in drei Stufen 0 dB, -3 dB, +3 dB angegeben. Da sich die Putzschicht oft unter dem Hammerschlag verformt, wird die Anregung an der Schlagstelle mit und auch ohne Putz realisiert, um den möglichen Einfluss der Verformung der Putzschicht zu untersuchen.

Tabelle 4.3: Einstellung des Hammerwerks für die transiente Anregung

Schlagfrequenz	2 Hz, 10 Hz
Pegelabschwächung gegenüber NHW	0 dB, -3 dB, 3 dB
Anregungsstelle	mit Putz, ohne Putz

## 4.2 Messwertverarbeitung und Auswertung

Jede Kombination des Empfängers, der Anregungsart, der Anregungsposition, der Beschaffenheit der Anregungsstelle und der Anregungsstärke entspricht einer Messung. Für beide Wände ergeben sich folglich 99 Messungen (Abbildung 4.5). Bei jeder Messung der stationären Anregungen werden elf Eingänge gleichzeitig aufgenommen: fünf Mikrofonpositionen, vier Beschleunigungsaufnehmer, ein Kraftaufnehmer und ein Beschleunigungsaufnehmer direkt am Anregungspunkt. Bei Messungen der transienten Anregungen fallen der Kraftaufnehmer und der Beschleunigungsaufnehmer direkt am Anregungspunkt weg, da der Kraftaufnehmer nicht für so große Kräfte ausgelegt ist und der Beschleunigungssensor aus Platzgründen nicht montiert werden kann. Die Aufnahme der stationären Anregung erfolgt mit dem Rechteck-Fenster und die Aufnahme der transienten Anregung erfolgt mit dem Hanning-Fenster. Die aufgenommenen Zeitsignale werden mit einer Auflösung von 6,25 Hz Fourier transformiert. Daraus werden 1601 Frequenzen von 0 bis 10000 Hz abgebildet.

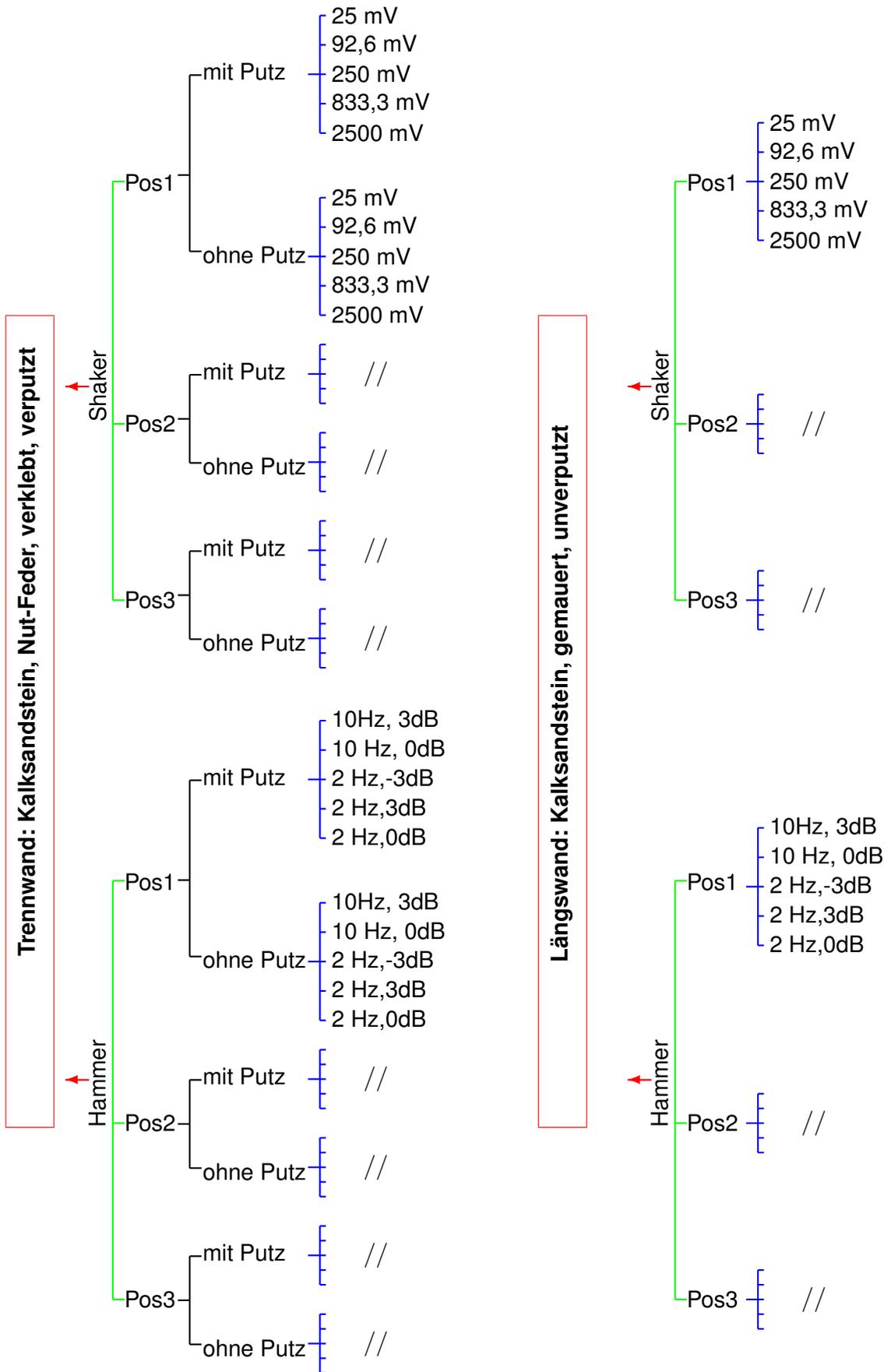


Abbildung 4.5: Überblick der Messungen an den Empfängern mit den jeweiligen Anregungsparametern

Die Auswertung erfolgt mit dem Programm Octave. Es besteht aus vier wesentlichen Schritten. Für jeden Auswertungsschritt wurden Funktionen geschrieben, um die Auswertungsprozedur möglichst zu automatisieren. Die importierten und ausgewerteten Daten werden in Datenstrukturen abgespeichert, um den Überblick bei der Auswertung zu gewährleisten und Fehler zu vermeiden.

### 4.2.1 Datenimport

Zuerst werden die Messdaten, welche im Dateiformat '.txt' gespeichert wurden, in Octave als Arrays importiert. Die Messdaten werden geplottet, um mögliche Messfehler festzustellen. Die geeigneten Messdaten werden für die weitere Verarbeitung ausgewählt.

### 4.2.2 Störsignalkorrektur

Aus den Messsignalen werden Nutzsignal und Störsignal getrennt. Die Korrektur von Störsignalen erfolgt unterschiedlich bei stationärer Anregung und transientser Anregung.

#### Stationäre Anregung

Durch das deterministische Anregungssignal können das Störsignal und das tatsächliche Antwortsignal des Systems in dem ermittelten Ausgangssignal differenziert werden. Da nur definierte Frequenzen angeregt werden ( $n$  12,5 Hz), kann das gemessene Signal bei nicht angeregten Frequenzen ( $(2n - 1)$  6,25 Hz) nur das Störsignal von der Umgebung sein. Daraus lässt sich das Störsignal des ganzen Spektrums mit linearer Interpolation kalkulieren und aus dem gemessenen Ausgangssignal extrahieren, um das tatsächliche Nutzsignal zu erhalten (siehe Abbildung 4.6). Durch den gleichmäßigen Abstand der Frequenzen entspricht die lineare Interpolation der Mittelwertbildung der benachbarten Werten. Daraus lässt sich den Störsignal in Pegelgröße wie folgt berechnen:

$$L_{stoer}(ii) = 10 \lg \left[ \frac{10^{L_{mess}(ii+1)/10\text{dB}} + 10^{L_{mess}(ii-1)/10\text{dB}}}{2} \right] \text{ dB} \quad (4.3)$$

$$L_{nutz} = 10 \lg \left[ 10^{L_{mess}/10\text{dB}} - 10^{L_{stoer}/10\text{dB}} \right] \text{ dB} \quad (4.4)$$

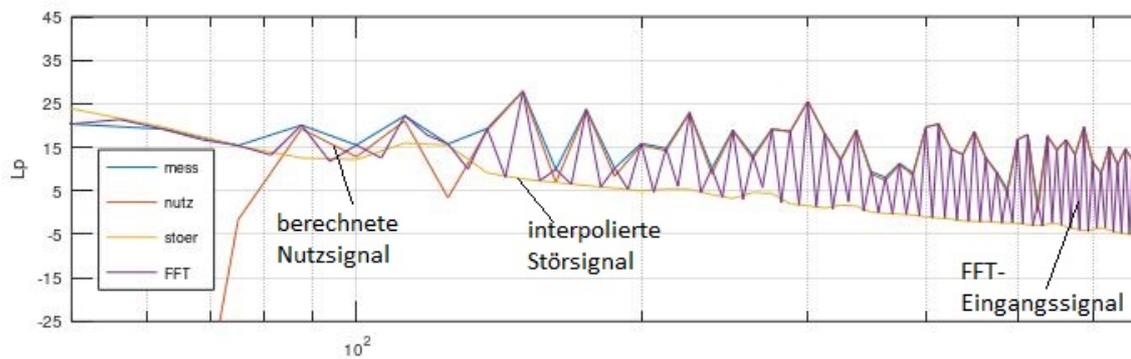


Abbildung 4.6: interpoliertes Störsignal, korrigiertes Messsignal im Vergleich zu dem FFT-Eingangssignal (hierbei: Trennwand, Shakeranregungsstärke 3, ohne Putz, Input 5)

### Transiente Anregung

Da das Anregungssignal bei transienter Anregung nicht deterministisch ist, lässt sich das Störsignal nicht aus dem Messsignal interpolieren. Stattdessen werden direkt vor den Messungen mit dem Anregungssignal die Störsignale gemessen. Nutzsinalen werden dann wie bei der Gleichung 4.4 aus gemessenen Störsignalen und Messsignalen mit Anregungen berechnet.

### 4.2.3 Mittelwertbildung und Terzmittelung der Nutzsinalen

Aus den Nutzsinalen mit ausreichendem Abstand  $\Delta L$  zu den Störsignalen (bei stationärer Anregung  $\Delta L \geq 2$  dB, bei transienter Anregung  $\Delta L \geq 6$  dB) werden Mittelwerte gebildet. Für jede Anregungsstärke bzw. Anregungsart bei jedem Messobjekt wird ein Mittelwert für jede Messgröße über alle Anregungspunkte und Aufnahmsensoren gebildet.

$$\begin{aligned}\bar{L}_p &= 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \\ \bar{L}_a &= 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{ai}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \\ \bar{L}_F &= 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Fi}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \\ \bar{L}_{aQuelle} &= 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{aQuellei}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad (4.5)\end{aligned}$$

Die Mittelwerte im Pegel wurden für alle angeregten Frequenzen berechnet. Daraus wurden die Terzwerte gebildet. Generell besteht der gesamte Terzpegel eines Terzban-

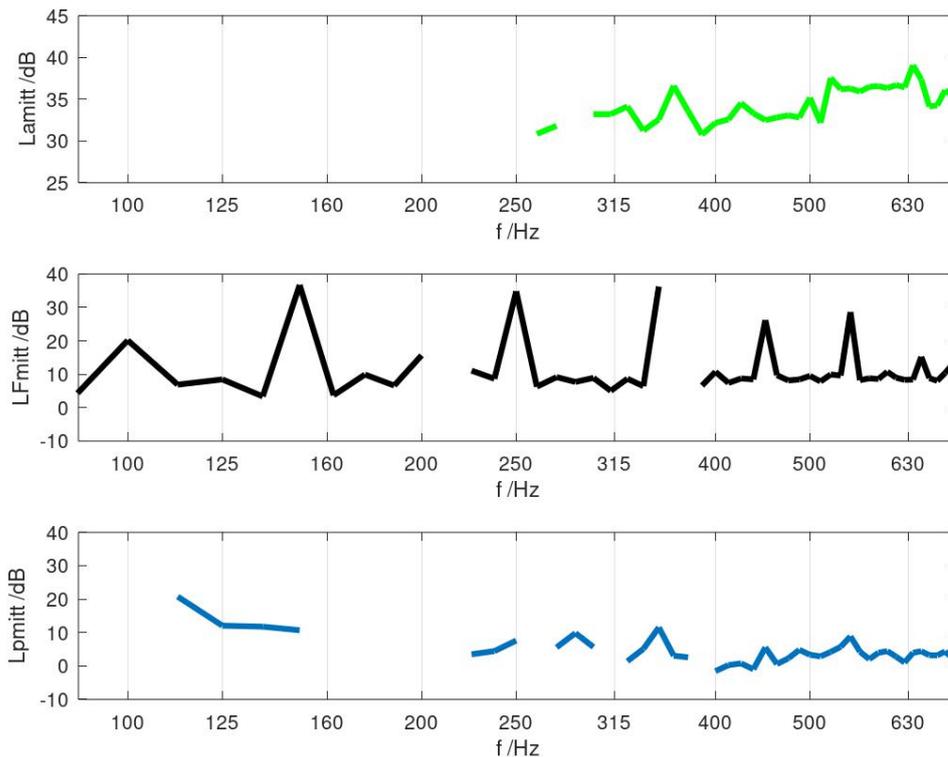


Abbildung 4.7: Unterschiedliche Spektrumbesetzung des Nutzsignale bei  $L_{Fmitt}$ ,  $L_{amitt}$ ,  $L_{pmitt}$ : Messung mit Shakeranregung mit Putz an der Trennwand, Anregungsstärke 1, Terzbänder von 100 Hz bis 630 Hz

des aus der Summe der Pegel aller Einzelfrequenzen innerhalb dieses Terzbandes:

$$L_{f_m} = 10 \lg \left[ \sum_{f_u}^{f_o} 10^{\frac{L_{f_i}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad (4.6)$$

$L_{f_m}$ : Terzpegel des Terzbandes  $f_m$

$f_m$ : Terz- Mittenfrequenz

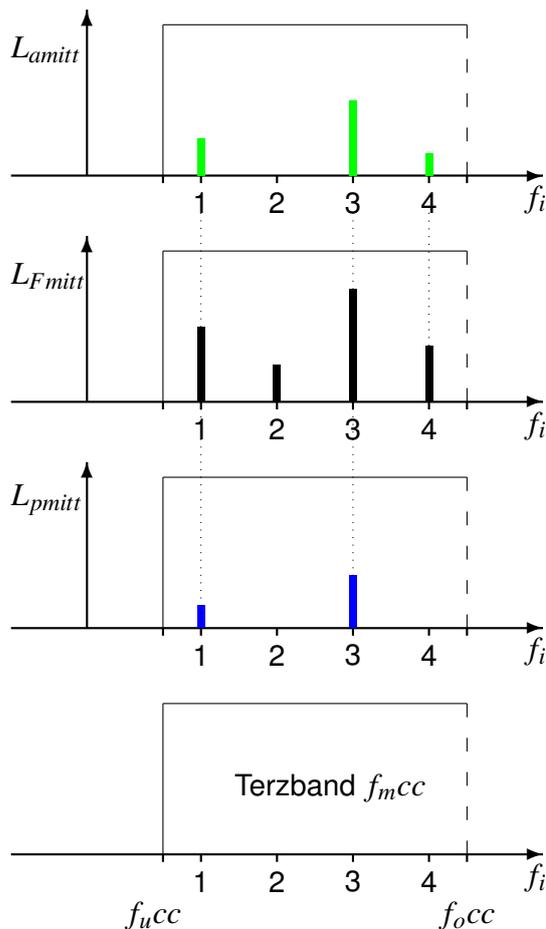
$f_u$ : Terz- untere Grenzfrequenz,

$$f_u = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}}$$

$f_o$ : Terz- obere Grenzfrequenz,

$$f_o = f_m \sqrt[6]{2}$$

Es werden 800 Frequenzen angeregt und für diese jeweils Werte für die Messgrößen erwartet. Bei stationärer Anregung ist aber die Anregungskraft so gering, dass der Abstand zwischen Nutz- und Störsignal nicht bei jeder Frequenz ausreicht, auch wenn  $\Delta L$  schon absichtlich klein gewählt wurde. Außerdem ist das Verhältnis zwischen Nutz- und Störsignal bei den verschiedenen Messgrößen unterschiedlich, sodass bei den gleichen Frequenzen nicht immer Mittelwerte bei jeder Messgröße  $L_F$ ,  $L_a$ ,  $L_p$  verfügbar sind (siehe Abbildung 4.7). Daher wird, um die Übertragungsfunktion genauer zu berechnen, bei der Anwendung der Terzpegelbildung nach der Formel 4.6 darauf geachtet, dass die Energie der Messgrößen bei jedem Terzband im Verhältnis übereinstimmt. Je nach



- Für die Berechnung der Übertragungsfunktion  $L_{Ha} = \bar{L}_a - \bar{L}_F$  (3.4):

$$L_{aTerzcc} = 10 \lg \left[ \sum_{i=1,3,4} 10^{\frac{L_{amiitt}(f_i)}{10\text{dB}}} \right] \text{ dB}$$

$$L_{FTerzcc} = 10 \lg \left[ \sum_{i=1,3,4} 10^{\frac{L_{Fmitt}(f_i)}{10\text{dB}}} \right] \text{ dB}$$

- Für die Berechnung der Übertragungsfunktion  $L_{Hp} = \bar{L}_p - \bar{L}_F$  (3.2):

$$L_{pTerzcc} = 10 \lg \left[ \sum_{i=1,3} 10^{\frac{L_{pmitt}(f_i)}{10\text{dB}}} \right] \text{ dB}$$

$$L_{FTerzcc} = 10 \lg \left[ \sum_{i=1,3} 10^{\frac{L_{Fmitt}(f_i)}{10\text{dB}}} \right] \text{ dB}$$

Abbildung 4.8: Beispiel zur Bildung des Terzpegels für die Berechnung der Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$

Berechnung von  $L_{Hp}$  oder  $L_{Ha}$  werden für jedes Terzband der Terzpegel von  $L_F$  und  $L_p$  oder  $L_F$  und  $L_a$  nur Werte bei den Einzelfrequenzen verwendet, wenn bei beiden Messgrößen ein gültiger Wert vorliegt (siehe Beispiel in Abbildung 4.8).

Bei transienten Anregungen ist diese Abstimmung nicht nötig, weil für die Berechnung der Übertragungsfunktion ein theoretischer Wert der Anregungskraft angenommen wird.

### 4.2.4 Berechnung der Übertragungsfunktionen und weiterer Bewertungsparameter

#### Stationäre Anregung

Als Bewertungsparameter werden die Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$  und  $L_{Ha}$  nach Gleichungen 3.2, 3.4 berechnet. Weiterhin werden, um die Abweichungen der Übertragungsfunktionen genauer zu betrachten, Differenzen zu der Übertragungsfunktion der

stärksten Anregung- Anregungsstärke 5 (AS5)- gebildet.

$$\begin{aligned}\Delta L_{Hp\_AS5} &= L_{Hp} - L_{Hp\_AS5} \\ \Delta L_{Ha\_AS5} &= L_{Ha} - L_{Ha\_AS5}\end{aligned}\quad (4.7)$$

Aus dem Kraftsignal  $F$  und dem Beschleunigungssignal  $a$  an dem Anregungspunkt wird die Linearität der Eingangsmobilität untersucht:

$$Y = \frac{v}{F} = \frac{a}{2\pi f F}$$

in Pegelschreibweise :  $L_Y = 10 \lg \frac{Y}{Y_0} \text{ dB} \quad (Y_0 = 0,0025 \text{ m/sN}) \quad (4.8)$

### Transiente Anregung

Die Anregung erfolgt mit zwei verschiedenen Schlagfrequenzen, 2 Hz und 10 Hz, und bei jeder Schlagfrequenz mit verschiedenen Stärken (Tabelle 4.3). Für jede Schlagfrequenz  $f_s$  werden die Differenzen  $D_a, D_p$  zwischen den gemittelten Messgrößen  $L_p, L_a$  bei verschiedenen Schlagstärken gebildet. Als Bezugswert werden die Messwerte jeweils die gleichen Schlagfrequenzen mit der Schlagstärkeeinstellung 0 dB verwendet, wie folgt:

$$\begin{aligned}D_{p\_fs\_Schlagstaerke} &= \bar{L}_{p\_fs\_Schlagstaerke} - \bar{L}_{p\_fs\_0} \text{ dB} \\ D_{a\_fs\_Schlagstaerke} &= \bar{L}_{a\_fs\_Schlagstaerke} - \bar{L}_{a\_fs\_0} \text{ dB}\end{aligned}\quad (4.9)$$

Dabei ist  $\bar{L}_p$  der mittlere Schalldruckpegel im Empfangsraum und  $\bar{L}_a$  die mittlere Beschleunigung auf der angeregten Wand.

Um das Übertragungsverhalten bei den verschiedenen Schlagfrequenzen zu vergleichen, werden Übertragungsfunktionen nach den Gleichungen 3.2, 3.4 mit Hilfe des Kurzschlusskraft-Spektrums des Midi-Hammerwerks gebildet. Bei der Annahme, dass die angeregten Wände unendlich steif sind, sodass die Anregungskraft der Kurzschlusskraft des Hammerwerks entspricht und die Linearität der Übertragung bei der Anregung besteht, lässt sich die gemessene Kurzschlusskraft des Midi-Hammerwerks aus der Untersuchung Bietz/Wittstock "Charakterisierung von Hammerwerken für horizontale Anregung" [9] übernehmen (Tabelle 4.4). Unter der Annahme, dass die Anregung des Hammers der Punktanregung entspricht, erhält man nach Cremer/Heckel [6] den Effektivwert der blockierten Kraft im Frequenzlinienabstand von  $\Delta f$  für die Anregung aus dem Impuls  $I$ , der Anzahl der Linien  $N$  im Bereich von  $\Delta f$  und der Schlagfrequenz  $f_s$ :

$$\tilde{F}_{\Delta f}^2 = 2NI^2 f_s^2 \quad (4.10)$$

Daraus lässt sich der Pegelunterschied des Kraftspektrums theoretisch berechnen, wenn der gleiche Hammer die Empfangsplatte mit einer anderen Schlagfrequenz anregt:

$$\Delta L_F = 10 \lg \left( \frac{f_1}{f_2} \right) \text{ dB} \quad (4.11)$$

Für  $f_1 = 10 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 2 \text{ Hz}$  ergibt sich einer Verschiebung um 7 dB.

In der genannten Untersuchung [9] wurde festgestellt, dass diese theoretische Verschiebung für den Frequenzbereich von 125 Hz bis 5000 Hz gut funktioniert. Die Bewertung wird deshalb auf diesen Frequenzbereich begrenzt.

Es wird außerdem untersucht, ob die Pegeldifferenz der Messgröße ( $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$ )

Tabelle 4.4: Blockierte Kraft  $L_{Fb,eq,stm}$  des Midi-Hammerwerks als Pegel re  $F_0 = 10^{-6} \text{ N}$ , horizontale Anregung, Schlagfrequenz 10 Hz, Quelle [9], Tabelle 1

Terzband mit Mittelfrequenz in Hz						
50	63	83	100	125	160	200
122,7	132,7	103,7	116,7	112,9	117	123,6
Terzband mit Mittelfrequenz in Hz						
250	315	400	500	630	800	1000
119,5	121,3	121,9	117,2	132,5	121,8	129,7
Terzband mit Mittelfrequenz in Hz						
1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
126	124,7	124,3	123,3	115,2	127	131,6

auch dem Pegelunterschied des Kraftspektrums entspricht. Dadurch wird die Linearität der Messung ebenfalls bewertet.

$$\begin{aligned} D_{p\_AH5} &= \bar{L}_{p\_AHi} - \bar{L}_{p\_AH5} \\ D_{a\_AH5} &= \bar{L}_{a\_AHi} - \bar{L}_{a\_AH5} \end{aligned} \quad (4.12)$$

- $\bar{L}_{p\_AH5}$ ,  $\bar{L}_{a\_AH5}$ : mittlere Schalldruckpegel, mittlere Beschleunigung, gemessen bei der Hammerwerkanregung Stärke AH5 (10 Hz, +3 dB)
- $\bar{L}_{p\_AHi}$ ,  $\bar{L}_{a\_AHi}$ : mittlere Schalldruckpegel, mittlere Beschleunigung, gemessen bei anderen Anregungsstärken der Hammerwerkanregung

### 4.3 Plausibilitätsprüfung

#### 4.3.1 Verhältnis zwischen dem Beschleunigungspegel $L_a$ auf der Trennwand und dem Schalldruckpegel $L_p$ im Empfangsraum

Die Anregung der Trennwand verursacht eine Schwingung der Wand, welche sich durch die mittlere Beschleunigung auf der Trennwand - Messgröße  $L_a$  - beschrieben lässt. Die-

se Schwingung verursacht wiederum einen Luftschall, der von beiden Seite der Wand mit folgender Schalleistung abgestrahlt wird:

$$P_1 = \bar{v}^2 \rho_0 c_0 S \sigma \quad [\text{W}] \quad (4.13)$$

- $\bar{v}$ : mittlere Schnelle der Wand, berechnet aus der mittleren gemessenen Beschleunigung  $\bar{a}$  auf der Wand
- $\rho_0 c_0 = 413 \text{ Ns/m}^3$ : Schallkennimpedanz der Luft bei 20°C
- $\sigma \approx 1$ : Abstrahlgrad
- $S = 9,64 \text{ m}^2$ : Abstrahloberfläche der Trennwand

Bei dieser Untersuchung soll der mittlere Schalldruckpegel im Empfangsraum - Messgröße  $L_p$  - allein von der abgestrahlten Schalleistung der Trennwand verursacht werden. Es wird deshalb überprüft, ob der gemessene Schalldruckpegel  $L_p$  im Empfangsraum tatsächlich dem abgestrahlten Schalldruckpegel der Trennwand entspricht. Der Zusammenhang zwischen einer Schalleistungszufuhr und dem Schalldruck im Diffusschallfeld eines geschlossenen Raumes ergibt sich durch:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{\bar{p}^2}{\rho_0 c_0} \frac{A}{4} \\ &= \frac{\bar{p}^2}{\rho_0 c_0} \frac{K_S V}{4T} \quad [\text{W}] \quad (4.14) \end{aligned}$$

- $\bar{p}^2$ : mittlerer Schalldruck im Diffusschallfeld des Empfangsraumes
- $A = \frac{K_S V}{T}$ : äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes, Raumvolumen  $V = 58 \text{ m}^3$ , mittlere Nachhallzeit im Raum  $T = 1\text{s}$ , Sabine-Konstante  $K_S = 0,163 \text{ m/s}$

Die Schalleistungszufuhr im Empfangsraum bei den Messungen soll allein durch die abgestrahlte Schalleistung der Trennwand erfolgen. Der daraus entstehende Schalldruck im Empfangsraum ergibt sich durch:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \\ \Rightarrow \bar{p}^2 &= \frac{\bar{v}^2 \rho_0^2 c_0^2 \sigma 4}{A} \quad (4.15) \end{aligned}$$

Die Überprüfung wurde für Messungen auf der Trennwand bei der stationären sowie transienten Anregung durchgeführt. Dabei zeigt der Vergleich zwischen den Berechnungsergebnissen und den Messergebnissen von  $L_p$  im Empfangsraum keine auffälligen Unterschiede (siehe Abbildung 4.9, 4.10). Das Verhältnis zwischen den Messgrößen  $L_a$  und  $L_p$  ist damit für plausibel erklärt.

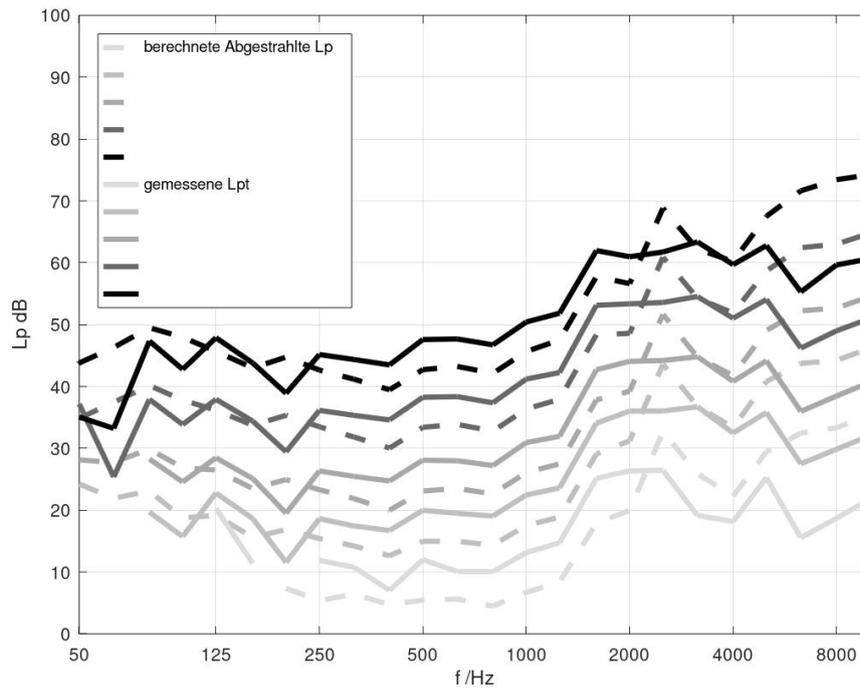


Abbildung 4.9: Vergleich zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel  $L_p$  und dem aus  $L_a$  berechneten, abgestrahlten Schalldruckpegel, Messung an der Trennwand - Shakeranregung, mit Putz

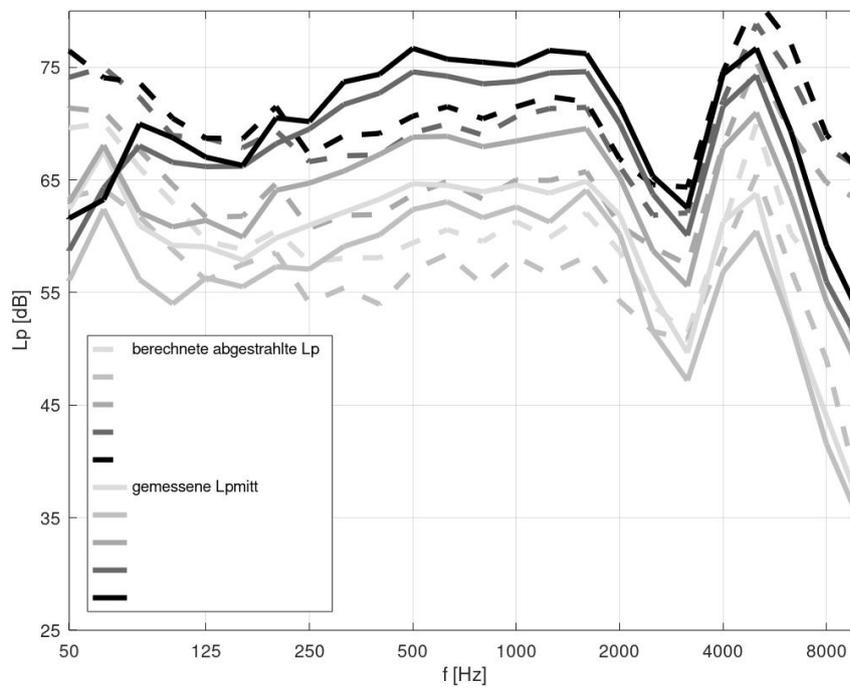


Abbildung 4.10: Vergleich zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel  $L_p$  und dem aus  $L_a$  berechneten, abgestrahlten Schalldruckpegel, Messung an der Trennwand - Hammeranregung, mit Putz

### 4.3.2 Verhältnis zwischen dem Anregungskraftpegel $L_F$ und dem mittleren Schalldruckpegel $L_p$ im Empfangsraum

Gemäß Abschnitt 4.1.2 sollte eine Korrektur um  $\Delta L_F = 44$  dB für das gemessene Kraftsignal unternommen werden. Die Plausibilität dieser Korrektur wird an Messungen an der Trennwand geprüft.

Aus dem gemessenen Schalldruck  $L_p$  im Empfangsraum wird die Soll-Ageregungskraft berechnet. Die gemessene Anregungskraft  $L_F$  bei Shakeranregung wird mit der Soll-Anregungskraft  $L_{F\text{Soll}}$  verglichen. Bei der Hammeranregung wird der berechnete Kraftpegel  $L_{F\text{Soll}}$  mit dem Pegel der blockierten Kraft  $L_{F\text{Block}}$  des Midi-Hammerwerkes [9] (Tabelle 4.4) verglichen.

Wenn die Wand mit der Kraft  $F$  angeregt wird, schwingt sie mit der Geschwindigkeit  $v$ ; die dabei entstehende mechanische Leistung ergibt sich durch:

$$P_{\text{mech}} = F v = F^2 Y \quad (4.16)$$

Dabei ist  $Y$  die mechanische Admittanz. Diese Größe beschreibt das Verhältnis zwischen der Anregungskraft  $F$  und der resultierenden Schnelle  $v$ . Der Kehrwert davon ist die Impedanz  $Z$ .

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{\hat{v}}{\hat{F}} \quad (4.17)$$

Mit der Empfangsplattenmethode [12] lässt sich die Anregung auch durch die in die Wand eingespeiste Leistung charakterisieren:

$$\begin{aligned} P_{\text{input}} &= \omega m \eta \bar{v}^2 \\ &= \omega m \eta \frac{A \bar{p}^2}{(\rho_0 c_0)^2 S \sigma 4} \end{aligned} \quad (4.18)$$

- $\omega$ : Kreisfrequenz
- $m$ : Masse der Wand [kg]
- $\eta$ : Verlustfaktor der Wand,  $\eta \approx 2\%$
- $\bar{v}$ : Mittlere Schnelle auf der Wand [m/s]

Aus Gleichung 4.15  

$$\Rightarrow \bar{v}^2 = \frac{A \bar{p}^2}{(\rho_0 c_0)^2 S \sigma 4}$$

Die mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$  der Anregung sollte der eingespeisten Körperschallleistung in die Wand  $P_{\text{input}}$  entsprechen. Die Gleichungen 4.16 und 4.18 werden gleich gesetzt. Daraus lässt sich die Anregungskraft  $F$  aus dem gemessenen Schalldruck  $p$  im Empfangsraum berechnen:

$$\begin{aligned}
 P_{mech} &= P_{input} \\
 \Rightarrow F^2 Y &= \omega m \eta \frac{A \bar{p}^2}{(\rho_0 c_0)^2 S \sigma 4} \\
 F &= \sqrt{\frac{\omega m \eta A \bar{p}^2}{Y (\rho_0 c_0)^2 S \sigma 4}} \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

Für die Berechnung wird die Admittanz einer unendlich ausgedehnten Platte, mit der Dicke und den Materialeigenschaften der Trennwand, eingesetzt. Diese charakteristische Admittanz der Trennwand ist frequenzunabhängig und stellt eine gute Näherung bei einem diffusen Körperschallfeld dar. [6]:

$$\begin{aligned}
 Z_{Pl,\infty} &= 4d^2 \sqrt{\frac{E\rho}{3}} & \bullet E: \text{Elastizitätsmodul, } E = 10^{10} \text{ N/m}^2 \\
 Y_{Pl,\infty} &= \frac{1}{Z_{Pl,\infty}} = \frac{1}{4d^2 \sqrt{\frac{E\rho}{3}}} \quad (4.20) & \bullet \rho: \text{Dichte der Platte, } \rho = 1800 \text{ kg/m}^3 \\
 & & \bullet d: \text{Plattendicke, } d = 0,24 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Der Vergleich der berechneten Soll-Anregungskraft  $L_{F\text{ Soll}}$  mit der blockierten Kraft des Midi-Hammerwerkes bei der Hammerwerkanregung zeigt eine gute Übereinstimmung. Er bestätigt damit, dass der Einsatz der charakteristischen Admittanz der Wand  $Y_{Pl,\infty}$  bei der Berechnung der Anregungskraft für die Prüfung gut geeignet ist (Abbildung 4.11). In der Abbildung 4.12 wird die Differenz  $\Delta L_F$  zwischen dem berechneten Kraftpegel  $L_{F\text{ Soll}}$  und den gemessenen Pegeln der Anregungskraft bei der Messung mit stationärer Anregung abgebildet. Bei dem hohen Frequenzbereich über 3000 Hz weicht  $\Delta L_F$  von dem Korrekturwert von 44 dB stark ab. Es lässt sich damit erklären, dass die Gültigkeit der charakteristische Impedanz  $Y_{Pl,\infty}$  nur auf Platten, die im Vergleich zur Biegewelle dünn sind, vorliegt. Bei hohen Frequenzen ist diese Voraussetzung mit der Stärke der Wand von 24 cm nicht mehr erfüllt.

Für den bauakustische Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz zeigen die Ergebnisse der Prüfung, dass der Unterschied zwischen den Pegeln der gemessenen Anregungskraft  $L_F$  und der Soll-Anregungskraft  $L_{F\text{ Soll}}$  der Korrektur  $\Delta L_F = 44$  dB entspricht. In der Auswertung wird diese Korrektur deshalb angewendet.

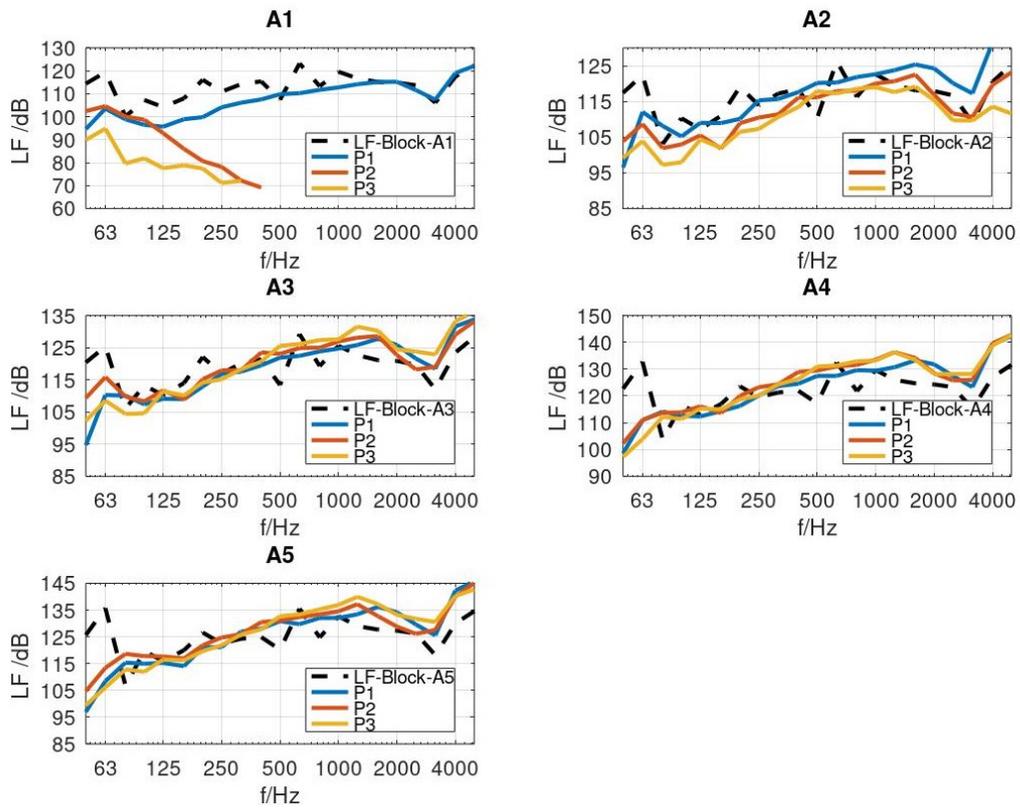


Abbildung 4.11: Vergleich zwischen  $L_{F\text{ Soll}}$  und  $L_{F\text{ Block}}$ , Messung an der Trennwand, Hammerwerk-anregung, ohne Putz

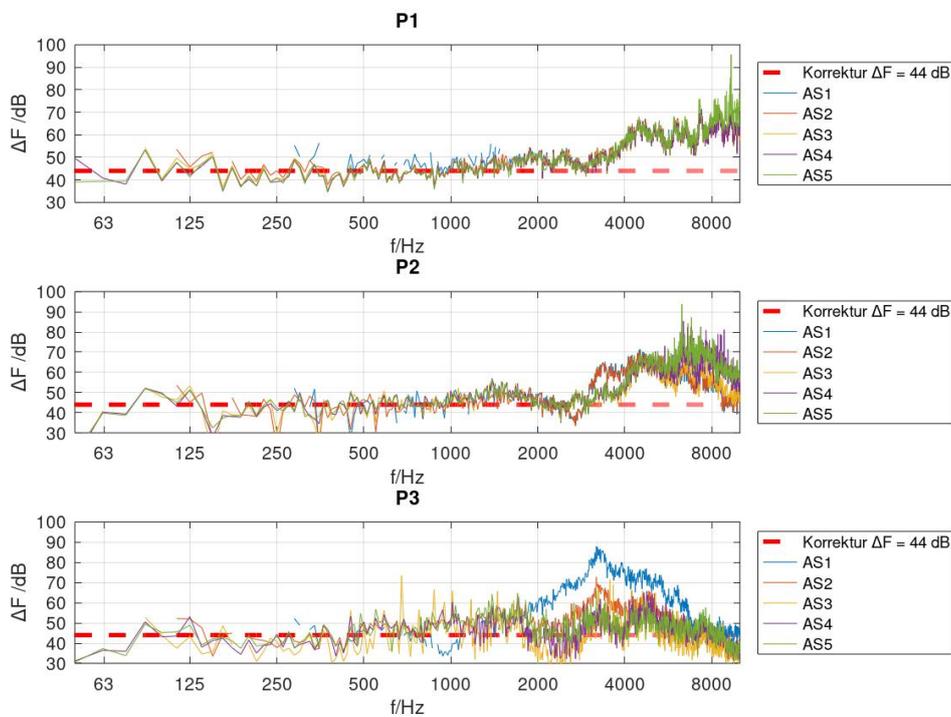


Abbildung 4.12: Differenz zwischen  $L_{F\text{ Soll}}$  und  $L_{F\text{ mess}}$ ,  $\Delta L_F = L_{F\text{ Soll}} - L_{F\text{ mess}}$ , Messung an der Trennwand, Shakeranregung, ohne Putz

## 5 Bewertung der Ergebnisse

### 5.1 Auswahl von Messdaten

Nach dem Import der Messdaten in Octave werden die Messsignale grafisch überprüft. Dazu wurde für jede Anregungsstärke ein Plot erstellt. Bei der stationären Anregung erhält jeder Plot den gemessenen Schalldruck, die Beschleunigung, die Kraft bzw. die Beschleunigung direkt am Anregungspunkt im Pegel. Bei transienten Anregungen enthält jeder Plot den gemessenen Schalldruck und die Beschleunigung in Pegelschreibweise im Verhältnis zum Störsignal. Dabei wurden Auffälligkeiten bei vier Messreihen festgestellt.

Bei der Messreihe mit der Trennwand und stationärer Anregung mit Putz der Anregungsstärke 1 zeigt die Aufnahme des Schalldruckpegels bei Anregungspunkt P1 unter 1100 Hz nur Grundrauschen vom Sensoren. Sie wird deshalb aus der Mittelung ausgeschlossen (Abbildung 5.1). Auch bei der Messung mit der Trennwand und transienter

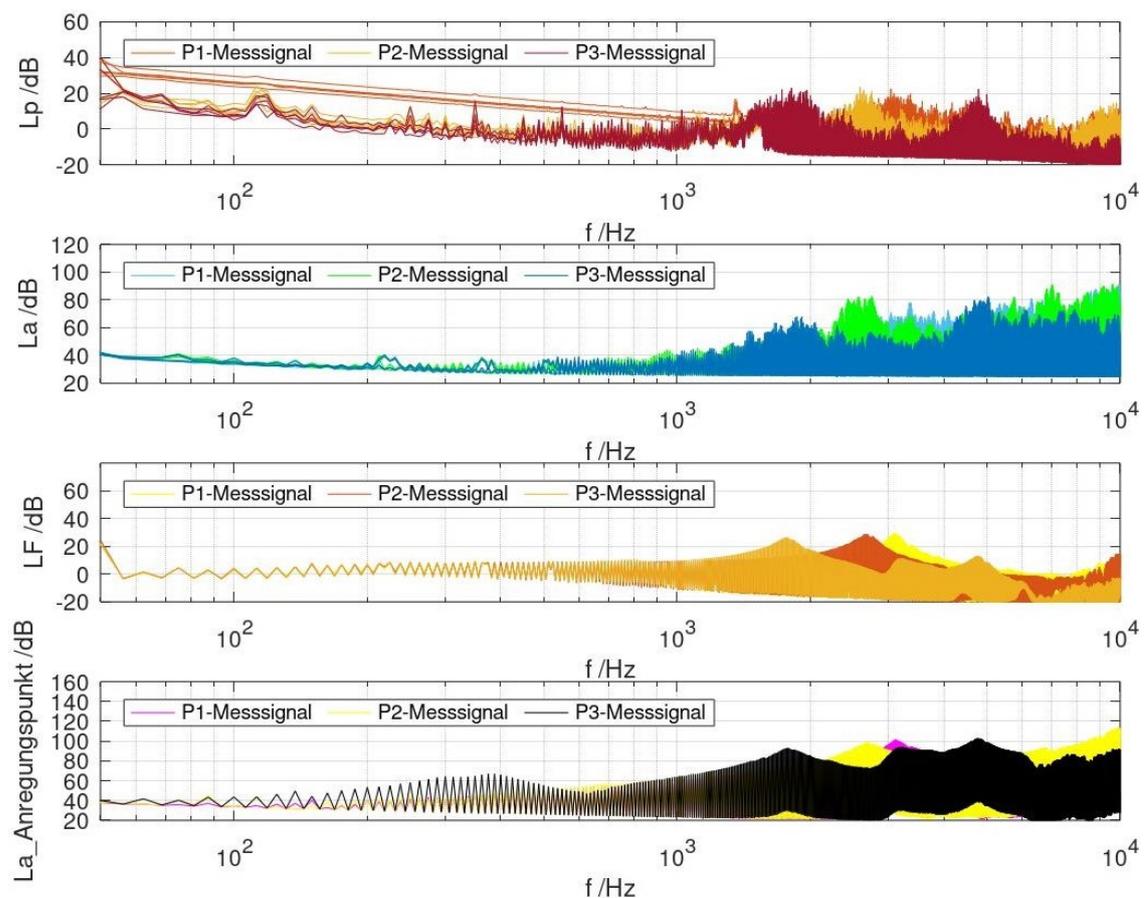


Abbildung 5.1: Trennwand, stationäre Anregung mit Putz, Anregungsstärke 1

Anregung mit Putz der Anregungsart 1 (Tabelle 5.2), beim Anregungspunkt P2 ist ein

Fehler aufgetreten. Dieser Fehler wird wahrscheinlich durch instabilen Kontakt zwischen Hammerwerk und Prüfwand während der Anregung verursacht. Beide Messgrößen  $L_p$  und  $L_a$  dieser Messreihe werden nicht in die Mittelung aufgenommen. (Abbildung 5.2) Bei Anregungspunkt 2 und 3 der gleichen Anregungsart auf der Trennwand ohne Putz

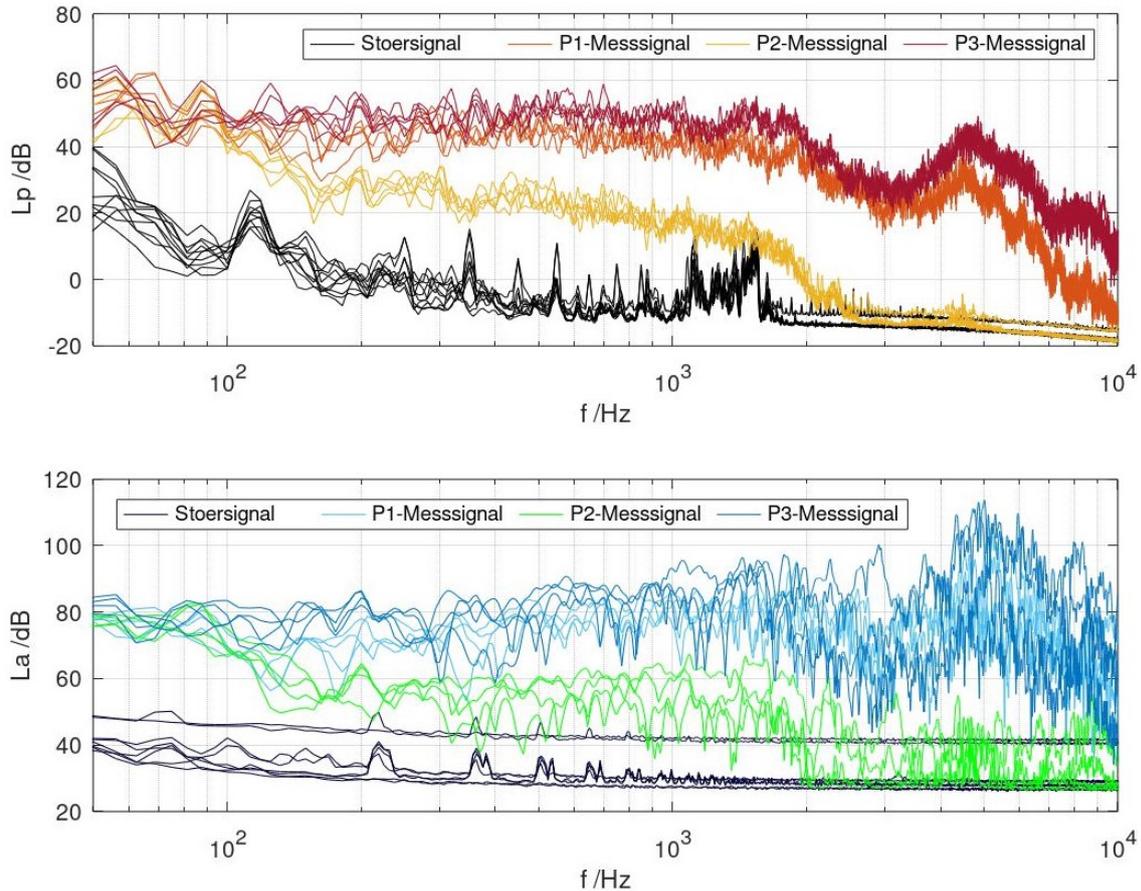


Abbildung 5.2: Trennwand, transiente Anregung mit Putz, Anregungsart AH1 (-3 dB, 2 Hz)

ist der gleiche Fehler aufgetreten. Die Messergebnisse dieser beiden Messreihen lassen sich folglich nicht für die Auswertung verwenden (Abbildung 5.3). Bei der Anregung auf der Längswand wurde kein Messfehler festgestellt. Aufgrund der geometrischen Anordnung kommen im Empfangsraum deutlich weniger Signale an als bei der Anregung auf die Trennwand, besonders bei höheren Frequenzen (Abbildung 5.4). Wie sich dieser Effekt auf die Bewertung der Linearität auswirkt, wird sich in den weiteren Auswertungsschritten zeigen.

## 5.2 Bewertung der Linearität

Die Linearität der Messung der Übertragungsfunktion bei der Kalksandsteinwand wird in drei Zusammenhängen bewertet: bei stationärer Anregung, bei transienter Anregung sowie im Vergleich beider Anregungsarten. Für die Bewertung wird für jede Bewertungsgröße ein Plot für die jeweilige Prüfwandsituation erstellt. Die drei Prüfwandsitua-

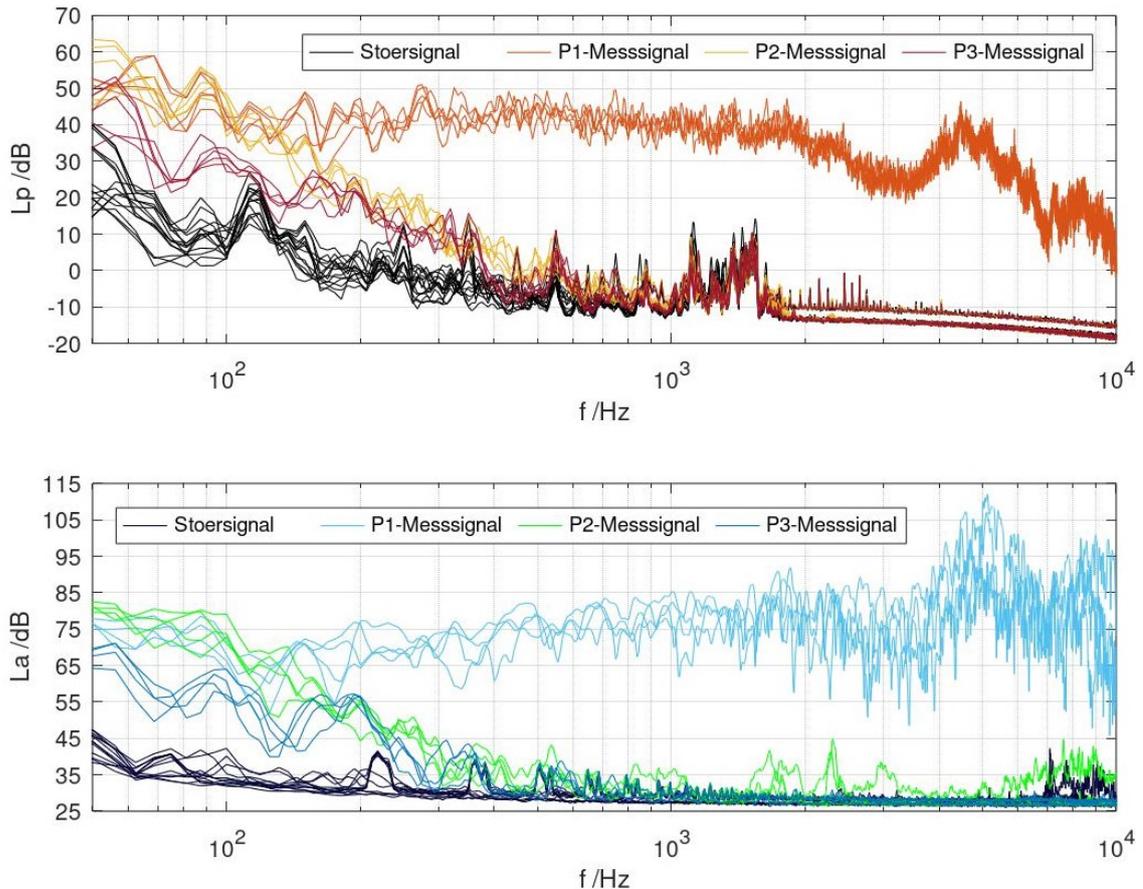


Abbildung 5.3: Trennwand, transiente Anregung ohne Putz, Anregungsart AH1 (-3 dB, 2 Hz)

tionen wurden im Abschnitt 4.1.1 beschrieben: die Trennwand/ Anregung mit Putz, die Trennwand/ Anregung ohne Putz und die Längswand. Um die Bewertungsgröße der verschiedenen Anregungsstärken im Plot miteinander zu vergleichen, wird der Terzpegel bei 1000 Hz der jeweiligen Anregungskraft  $L_{F\_1000Hz}$  als Bezug genommen. Die Bewertungskriterien für die vorliegende Linearität bestehen darin, dass bei Veränderung der Anregungsstärke keine systematische lineare Verzerrung bei den Übertragungsfunktionen auftritt. Zufällige Abweichungen wegen eventueller Messunsicherheiten sollten zwei dB nicht überschreiten.

### 5.2.1 stationäre Anregung

Wie im Kapitel 4.1.3 beschrieben, erfolgt die stationäre Anregung in dieser Arbeit durch einen Shaker in fünf Anregungsstärken mit inen Astufenabstand von 5 dB. . In der Tabelle 5.1 werden die Bezugswerte  $L_{F\_1000Hz}$  der Anregungskräfte verschiedener Stufen dargestellt. Obwohl die fünf Anregungsstufen für alle Messungen gleich eingestellt wurden (Abbildung 4.5), gibt es bei den Bezugswerten der Anregung mit Putz und ohne Putz auf der Trennwand kleine Unterschiede (Tabelle 5.1).

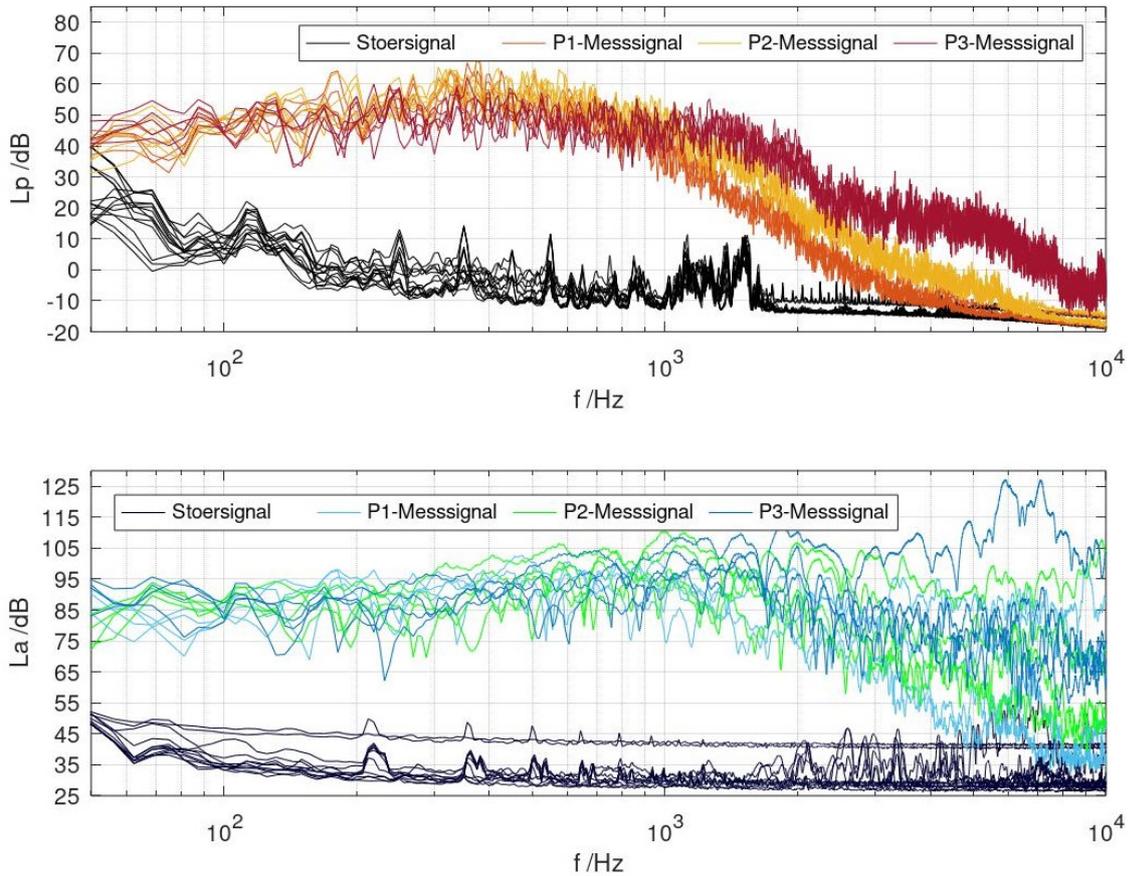


Abbildung 5.4: Längswand, transiente Anregung , Anregungsart 5 (+3 dB, 10 Hz)

Tabelle 5.1: stationäre Anregungen mit dem Shaker, gekennzeichnet durch den mittlere Terzpegel bei 1000 Hz der Anregungskraft  $L_{F\_1000Hz}$ 

Nr.	Trennwand, mit Putz	Trennwand, ohne Putz	Längswand, unverputz
AS1	65,5 dB	69 dB	65,5 dB
AS2	77 dB	80 dB	77 dB
AS3	85 dB	89,5 dB	85 dB
AS4	95,5 dB	94 dB	95,5 dB
AS5	105 dB	102 dB	105 dB

Es wird zuerst die Linearität der Eingangsadmittanz  $L_Y$  bewertet. Die Abbildungen 5.5, 5.6, 5.7 zeigen, dass sich der Verlauf des Admittanzpegels mit der Anregungsstärke ändert. Im Frequenzbereich unter 1600 Hz ähneln die Admittanzpegel der zwei schwächeren Anregungsstärken AS1 und AS2 der charakteristischen Admittanz  $L_{Y\_pl,\infty} = -31$  dB ( berechnet in der Plausibilitätsprüfung, Abschnitt 4.3.2). Bei den stärksten Anregungsstärken AS4 und AS5 nehmen die Admittanzpegel im gleichen Frequenzbereich einen komplett anderen Verlauf an, welcher dem Verlauf der Admittanz einer Masse entspricht:

$$\underline{Y}_m = -j/\omega m \quad (5.1)$$

Es wird deshalb der berechnete Admittanzpegel von einer Masse von 0,5 kg, 1 kg und

2 kg als Vergleich mitabgebildet.

Im Frequenzbereich ab ca. 1600 Hz verlaufen die Admittanzpegel bei allen Anregungsstärken gleich und weicht weniger als 5 dB voneinander ab. Der Admittanzpegel der Anregungsstufe AS3 nimmt je nach Anregungsposition den gleichen Verlauf wie bei AS1 und AS2 oder wie bei AS4 und AS5. Gemittelt entspricht der Admittanzpegel der Anregungsstufe AS3 dem Verlauf der stärksten Anregungsstufe.

Die Abhängigkeit des Admittanzpegel-Verlaufs von der Anregungsstärke tritt bei allen drei Prüfandsituationen gleich auf. Dieser Effekt ist deshalb unabhängig von der Putzschicht sowie der Verbindungsart der Steine. Eine mögliche Erklärung davon ist, dass ab einer bestimmten Stärke der stationären Anregung im tiefen und mittleren Frequenzbereich nicht die ganze Kalksandsteinwand homogen mitschwingt, sondern hauptsächlich ein lokaler Bereich oder ein Stein an der Ankopplungsstelle. Der Vergleich mit dem Admittanzpegel der verschiedenen Massen zeigt, dass dieser Bereich sich mit der Anregungsstärke verkleinert.

Bei bestehender Linearität sollte die Eingangsadmittanz bei unterschiedlichen Anregungsstärken konstant bleiben. Daraus wird geschlossen, dass bei der Messung der Eingangsadmittanz auf der Kalksandsteinwand keine Linearität besteht, vor allem nicht unter 1500 Hz.

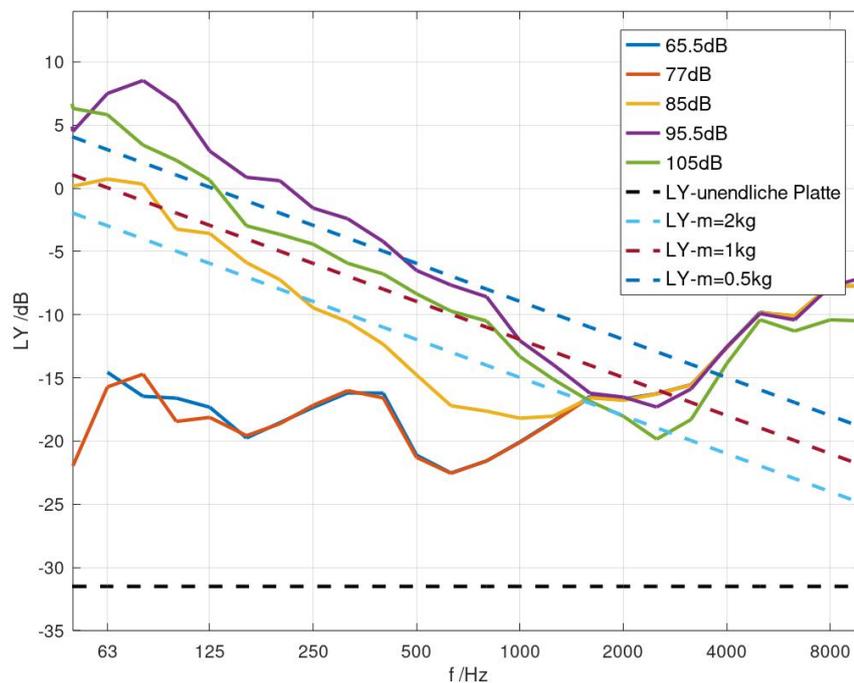


Abbildung 5.5: gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz

Bei der Auswertung der Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$  und  $L_{Ha}$  fällt die inhomogene Schwingung der Kalksandsteinwand nicht auf. Im Allgemeinen nehmen die Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$  sowie  $L_{Ha}$  der verschiedenen Anregungsstärken den gleichen

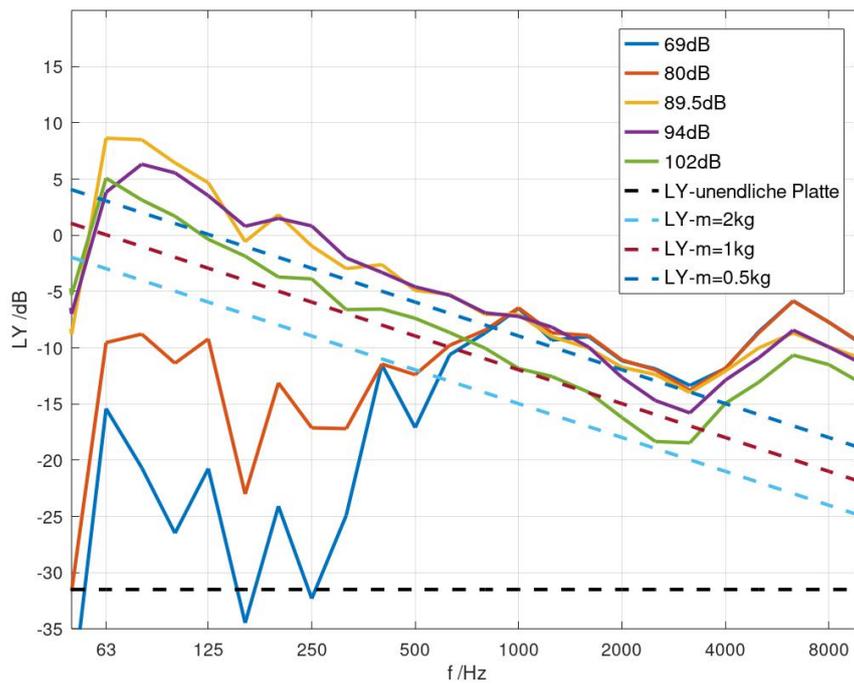


Abbildung 5.6: gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz

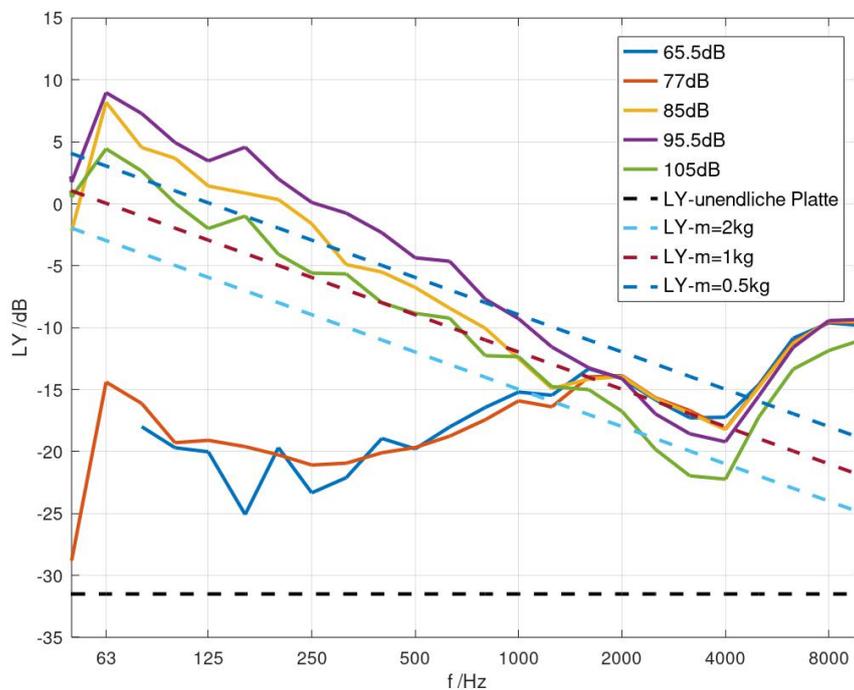


Abbildung 5.7: gemittelte Eingangsadmittanzpegel der Längswand, Shaker-Anregung

Verlauf an (Abbildungen 5.8, 5.10, 5.14). Bei der schwächsten Anregung ist die Stärke des Antwortsignals für aussagekräftige Bewertungen nicht ausreichend, vor allem bei  $L_{Hp}$ .

Bei Messungen auf der Trennwand, Anregung mit Putz, sind in den Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$  bzw.  $L_{Ha}$  kaum Abweichungen zwischen den Anregungsstärken zu erkennen. Bis auf bei Anregungsstufe AS1 (66 dB) stimmen die Übertragungsfunktionen der anderen vier Anregungsstufen im bauakustischen Frequenzbereich 100 Hz - 3150 Hz sehr gut überein (Abbildung 5.8). Erst bei Betrachtung der Bewertungsgröße  $\Delta L_{Hp\_AS5}$  und  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  - den Übertragungsfunktionsdifferenzen mit den Übertragungsfunktionen der stärksten Anregung als Bezug- ist eine systematische lineare Verzerrung im Bereich 1600 Hz - 4000 Hz sichtbar geworden. Dabei wird die Differenz der Übertragungsfunktion immer kleiner mit der Stärke der Anregungskraft (Abbildung 5.9). Die größte Abweichung liegt bei 2 dB. Zwischen 500 Hz und 1650 Hz liegen die Differenzen  $\Delta L_{Hp\_AS5}$  und  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  unter 1 dB. Zwischen 100 Hz und 500 Hz tritt bei der Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  kein deutlicher systematischer Effekt der Nichtlinearität auf. Bei  $\Delta L_{Hp\_AS5}$  ist eine lineare Verzerrung zu sehen. Die größte Abweichung liegt bei 3 dB bei 125 Hz.

Bei der Shakeranregung ohne Putz auf der Trennwand ist die gleiche lineare Verzerrung im Frequenzbereich 1600 Hz - 4000 Hz nicht deutlich zu erkennen. Im Allgemeinen weichen die Übertragungsfunktionen deutlich mehr voneinander ab als bei der Anregung mit Putz, vor allem bei  $L_{Hp}$ . Zwischen 600 Hz bis 4000 Hz liegen die größten Werte von  $\Delta L_{Ha\_AS5}$   $\Delta L_{Hp\_AS5}$  bis  $\pm 6$  dB. Unter 600 Hz treten starke lineare Verzerrungen auf. Am stärksten liegt die Abweichung von  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  bei -18 dB bei 315 Hz, und  $\Delta L_{Hp\_AS5}$  bei -20 dB bei 160 Hz (Abbildung 5.13).

Beim Vergleich der Übertragungsfunktionen sowie der Übertragungsfunktionsdifferenzen der zwei Prüfwandsituationen Trennwand mit und ohne Putz miteinander (Abbildungen 5.12, 5.13) lässt sich schlussfolgern, dass die Putzschicht der entscheidende Faktor für die Linearität der Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$  und  $L_{Ha}$  auf der Trennwand ist. Ohne die Putzschicht liegt keine Linearität der Übertragungsfunktion vor.

Bei der Messung auf der Längswand verschiebt sich die Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$  im ganzen Frequenzbereich mit der Anregungsstärke. Durch die "Übereck- Übertragung" ist das Verhältnis zwischen der Anregungskraft auf der Längswand und dem abgestrahlenden Schalldruck im Empfangsraum nicht linear. Bei  $L_{Ha}$ , bis auf die Anregungsstufe AS1 stimmen die Übertragungsfunktionen der anderen vier Anregungsstärken unter 1600 Hz gut überein. Beim Betrachten der Differenz  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  ist eine ähnliche lineare Verzerrung im Frequenzbereich 1600 Hz - 4000 Hz wie bei der Prüfwandsituation Trennwand/ Anregung mit Putz zu erkennen. Zwischen 125 Hz und 500 Hz treten schwache lineare Verzerrungen um die  $\pm 1$  dB auf. Bei 200 Hz ist der größte Differenz 2 dB. Die Übertragungsfunktion  $L_{Ha}$  der Längswand wird als linear im Frequenzbereich 125 Hz - 1600 Hz bewertet.

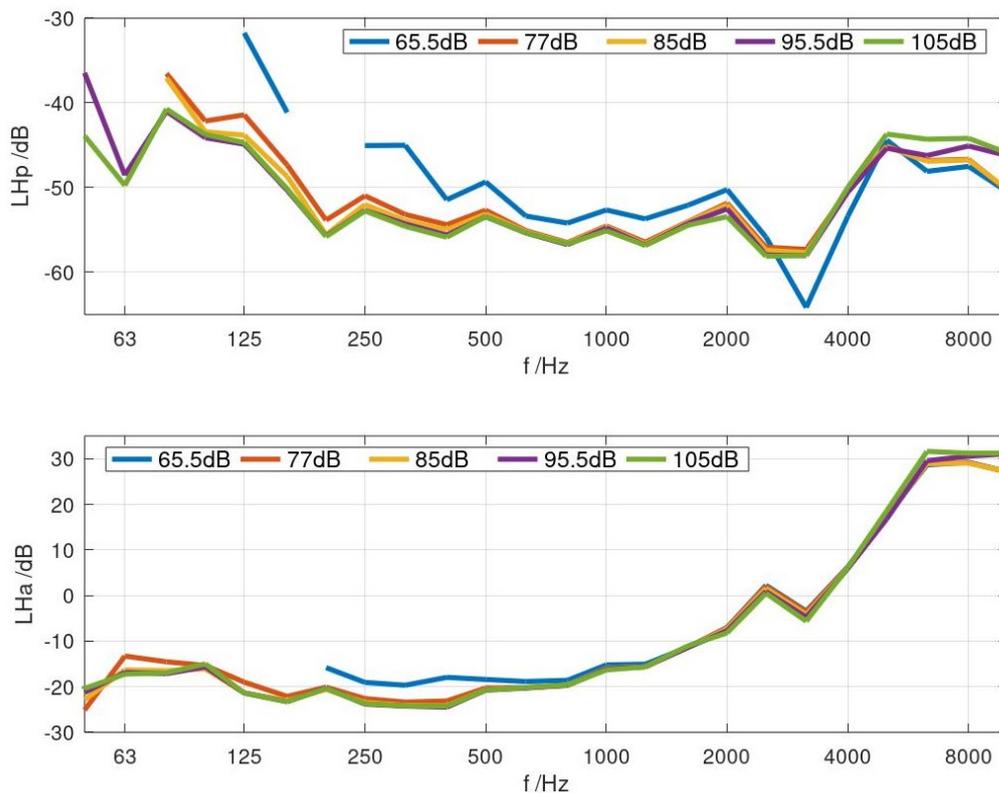


Abbildung 5.8: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz

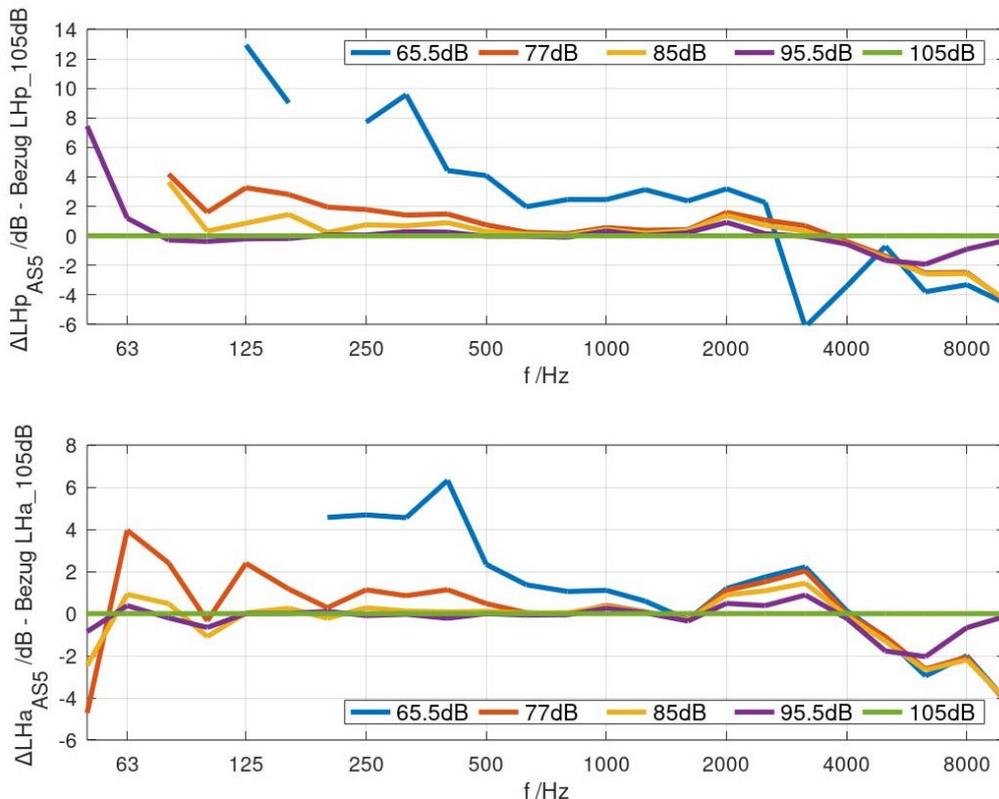


Abbildung 5.9: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta L_{Hp\_AS5}$ ,  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung mit Putz

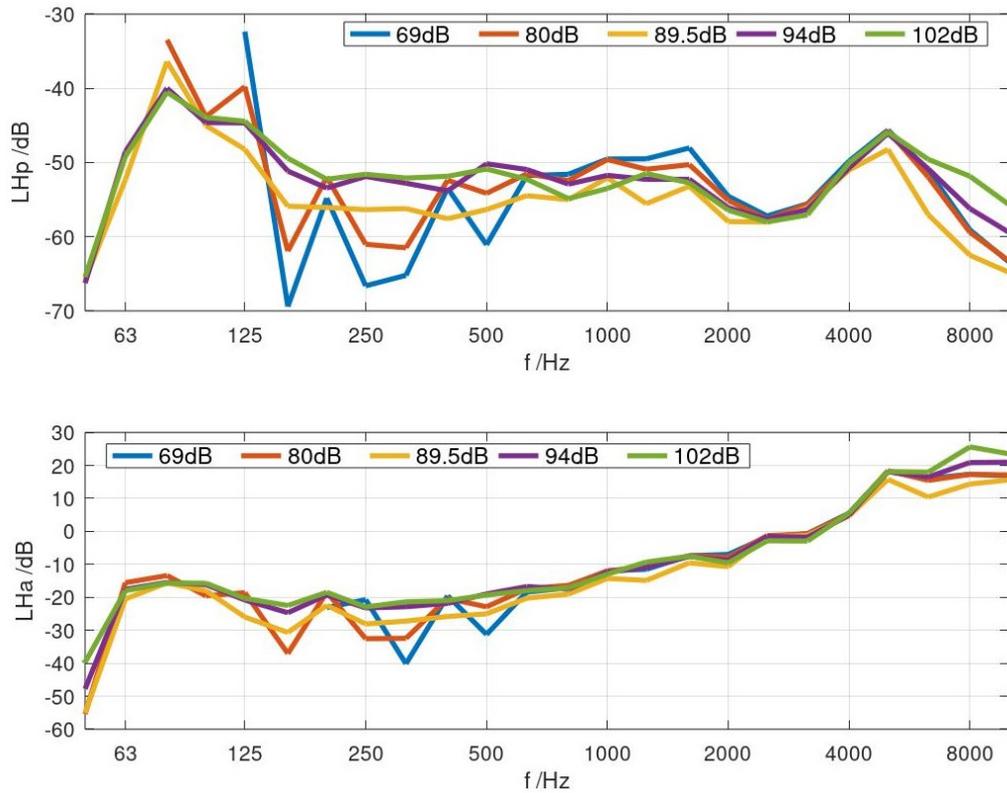


Abbildung 5.10: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz

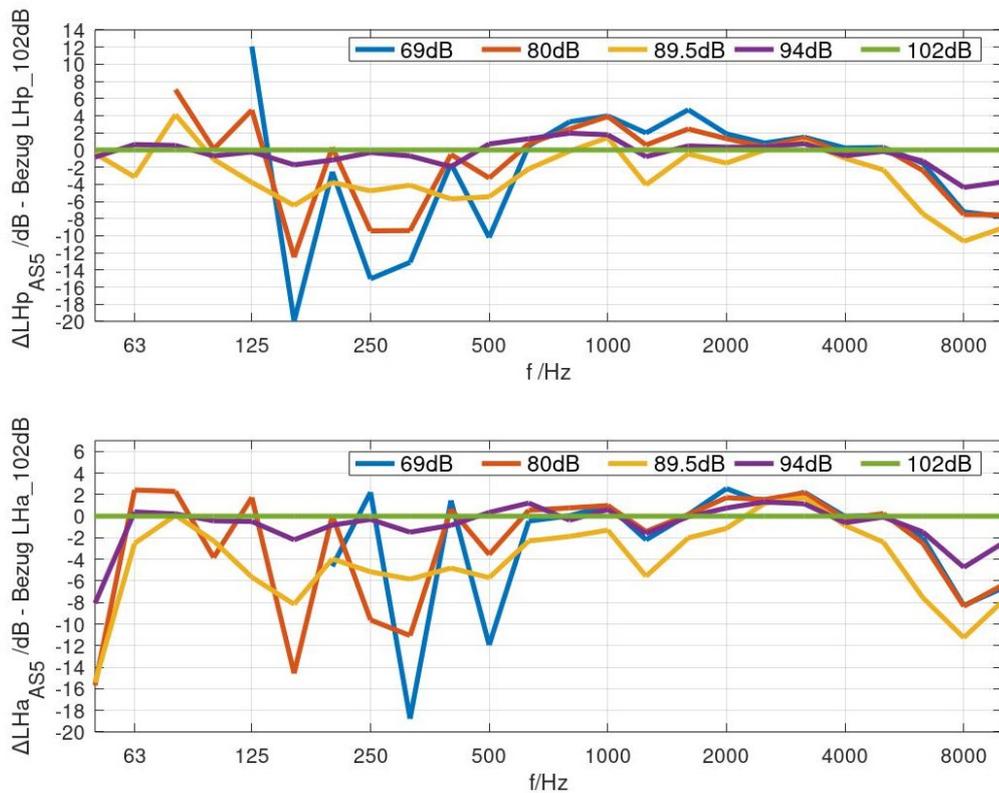


Abbildung 5.11: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta L_{Hp\_ASS}$ ,  $\Delta L_{Ha\_ASS}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung ohne Putz

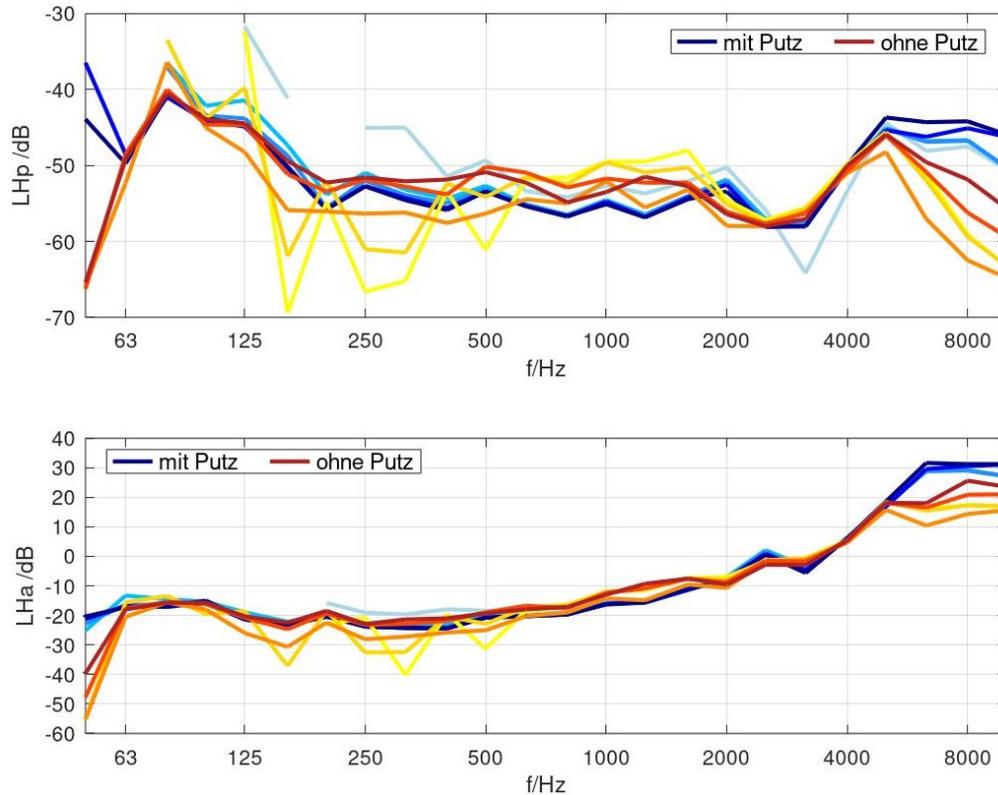


Abbildung 5.12: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung mit und ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken

## 5.2.2 Transiente Anregung

Die transiente Anregung erfolgt durch das Midi-Hammerwerk mit zwei unterschiedlichen Schlagfrequenzen. Bei jeder Schlagfrequenz wurden verschiedene Stufen der Schlagstärke in Bezug zum Kraftspektrum des Norm-Hammerwerkes eingestellt. Für die Berechnung der Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  dient die Kurzschlusskraft des Midi-Hammerwerkes mit den entsprechenden Anpassungen der Schlagfrequenzen und Schlagstärken (siehe Kapitel 4.2.4). Die Tabelle 5.2 stellt die Bezugswerte  $L_{F\_1000Hz}$  für den Vergleich zwischen den verschiedenen Anregungseinstellungen dar. Die theoretischen Pegeldifferenzen zwischen dem Kraftspektrum der jeweiligen Einstellung zu der Einstellung AH5 werden auch in der Tabelle dargestellt.

Tabelle 5.2: Transiente Anregungen mit dem Midi-Hammerwerk

Nr.	Art der Anregung	Pegeldifferenz $\Delta L_{F\_AH5}$	Bezugswert $L_{F\_1000Hz}$
AH1	2 Hz, -3 dB	-13 dB	120 dB
AH2	2 Hz, 0 dB	-10 dB	123 dB
AH3	2 Hz, 3 dB	-7 dB	126 dB
AH4	10 Hz, 0 dB	-3 dB	130 dB
AH5	10 Hz, 3 dB	0 dB	133 dB

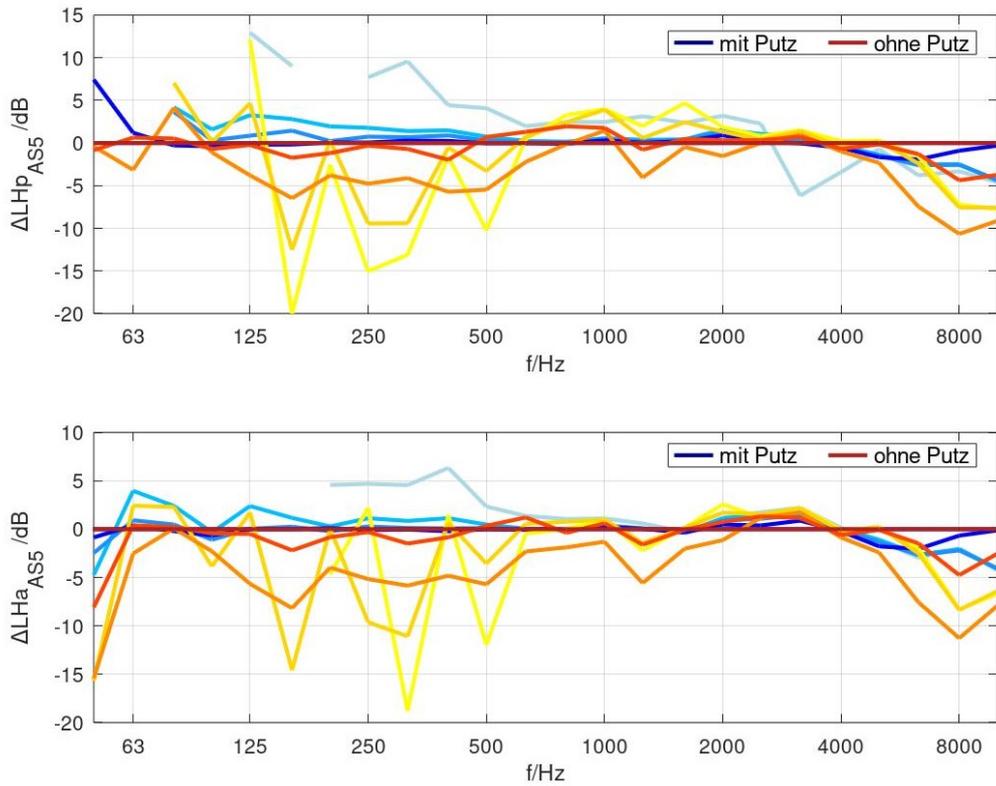


Abbildung 5.13: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta LH_{p\_ASS}$ ,  $\Delta LH_{a\_ASS}$  für die Trennwand, Shaker-Anregung mit und ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken

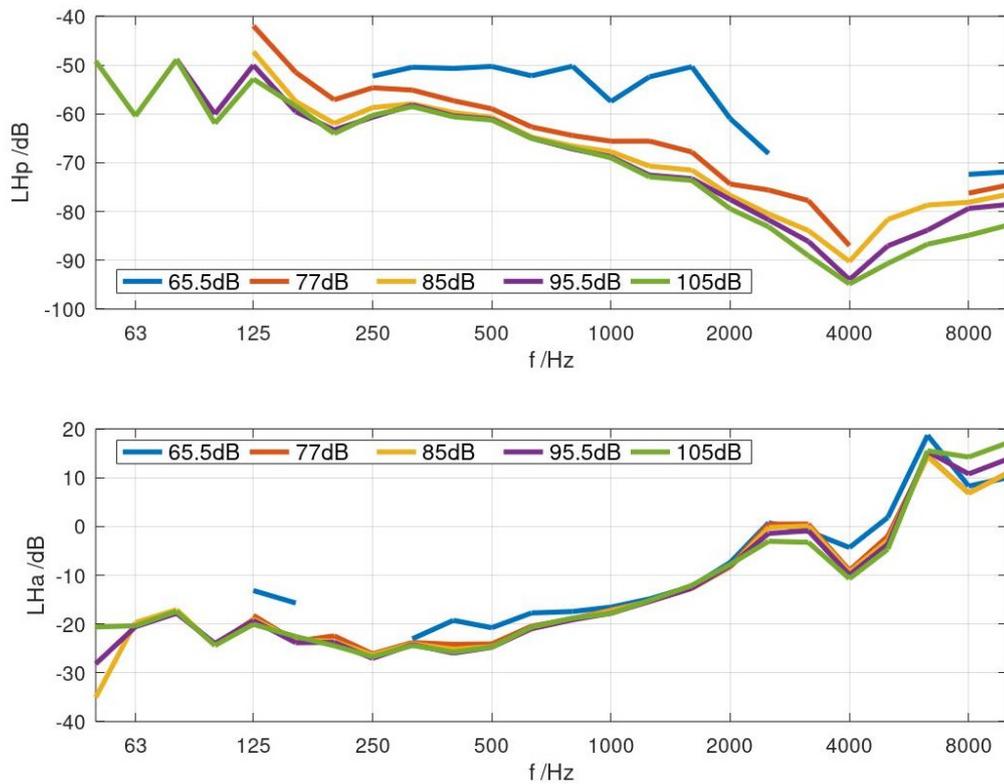


Abbildung 5.14: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Längswand, Shaker-Anregung

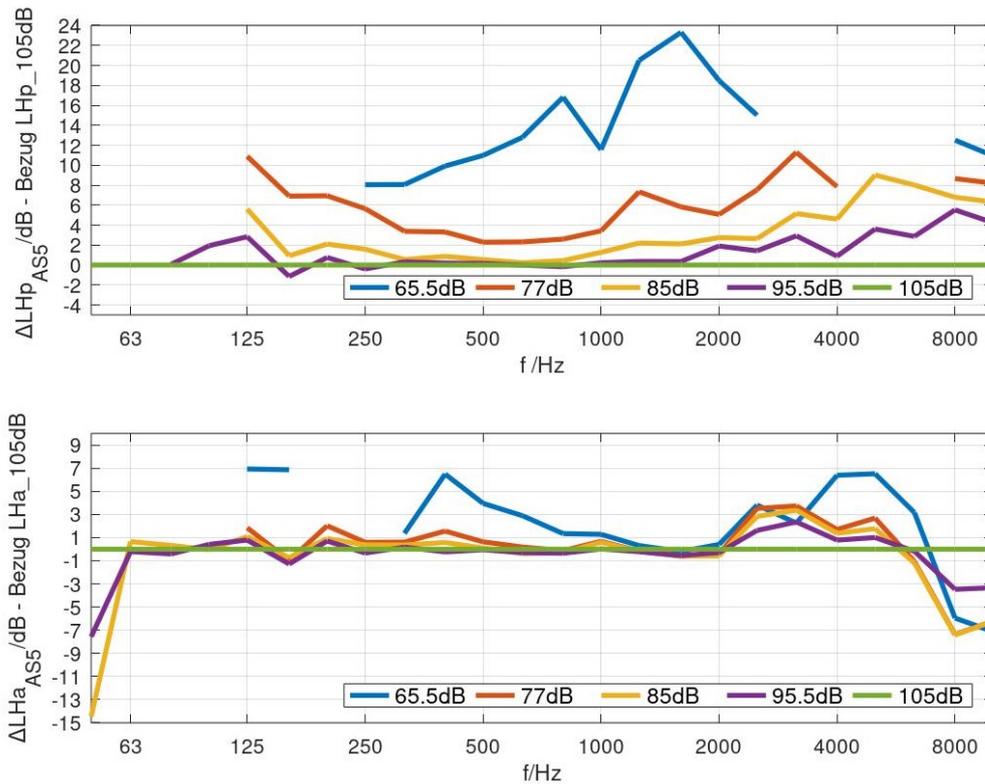


Abbildung 5.15: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta L_{Hp\_AS5}$ ,  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  für die Längswand, Shaker-Anregung

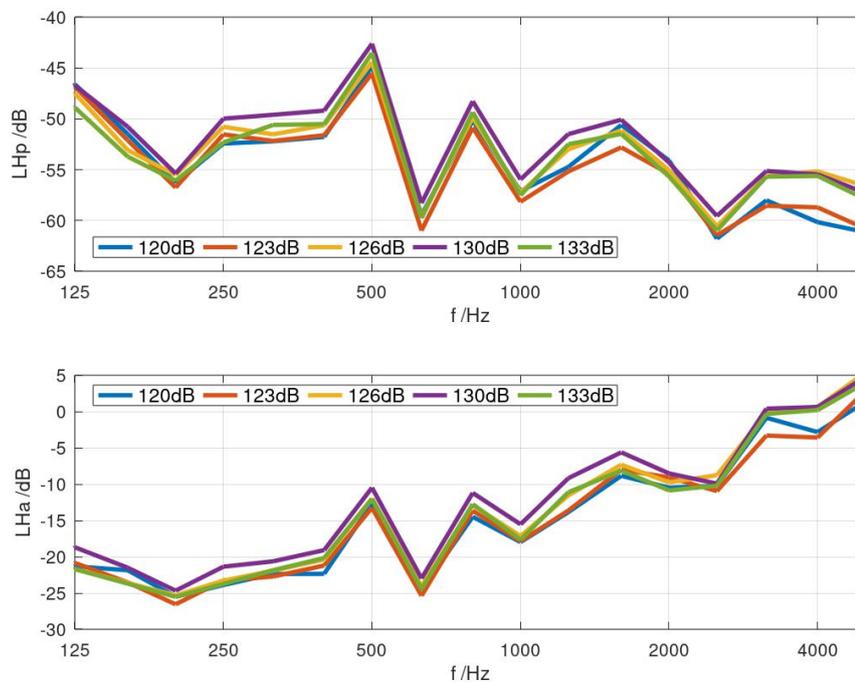


Abbildung 5.16: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz

Die Diagramme der Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  bei allen drei Prüfwandsituationen zeigen, dass die Übertragungsfunktionen der verschiedenen Anregungsstärken ähnliche Verläufe haben. Es bestehen aber sichtbare Verschiebungen mit der Anregungsstärke im ganzen Frequenzbereich, vor allem bei der Trennwand mit Anregung ohne Putz (Abbildungen 5.16, 5.17, 5.18). Wie sich der Verlauf der Übertragungsfunktionen verschiebt, hängt nicht nur von der Schlagstärke ab, sondern auch von der Schlagfrequenz. Bei 2 Hz verschieben sich die Übertragungsfunktionen mit zunehmender Schlagkraft nach oben. Bei 10 Hz ist es umgekehrt. Beim Betrachten der Übertragungsdifferenzen  $\Delta L_{Hp\_AS5}$ ,  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  ist dieser Zusammenhang deutlicher zu sehen. Die Abbildungen 5.19, 5.20 der Übertragungsfunktionsdifferenz der Trennwand zeigen, dass die Werte der Übertragungsfunktionen bei 10 Hz - mit der schwächeren Anregungskraft 130 dB - über den Bezugswerten der Anregungskraft 133 dB bei allen Terzen liegen, während die Werte der Übertragungsfunktionen von 2 Hz mit den schwächeren Anregungskraften (120 dB, 123 dB, 126 dB) fast bei allen Terzen unter den Bezugswerten liegen. Bei der Trennwand mit Anregung ohne Putz sind systematische lineare Verzerrungen im ganzen Frequenzbereich sehr deutlich zu erkennen. Bei der Längswand liegen die Differenzen  $\Delta L_{Hp\_AS5}$ ,  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  bei 10 Hz ebenfalls bei allen Frequenzen über den Bezugswerten. Bei 2 Hz liegen die Differenzen wiederum je nach Frequenzen unter oder über den Bezugswerten (Abbildung 5.21). Jedoch nehmen dabei  $\Delta L_{Hp\_AS5}$ ,  $\Delta L_{Ha\_AS5}$  bei der Anregungsfrequenz von 10 Hz einen anderen Verlauf als bei der Anregungsfrequenz von 2 Hz.

Es wird mittels der Pegeldifferenzen  $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$  der Messgröße  $L_a$ ,  $L_p$  bezüglich des mittleren gemessenen Schalldruck- und Beschleunigungspegels bei Anregungsstärke AH5 - ebenfalls untersucht, ob die transiente Anregungskraft und die daraus entstehende Messgröße  $L_a$ ,  $L_p$  linear zusammenhängen. Bei vorliegender Linearität sollte die Bewertungsgröße  $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$  auch der Pegeldifferenz der Anregungskräfte (Tabelle 5.2) entsprechen. Auf dem Plot dieser Bewertungsgröße werden die Pegeldifferenzen der Anregungskräfte als Orientierung in gestrichelten Linien dargestellt.

Bei Messungen auf der Trennwand mit Putz an der Anregungsstelle schwanken die Werte von  $D_{p\_AH5}$  und  $D_{a\_AH5}$  im Frequenzbereich 100 Hz - 630 Hz etwa  $\pm 1$  dB um die Soll-Pegeldifferenz. Bei 800 Hz gibt es eine systematische lineare Verzerrung, welche mit der zunehmende Pegeldifferenz  $\Delta L_{F\_AH5}$  abnimmt (Abbildung 5.22). Ab 2000 Hz weichen die Bewertungsgrößen  $D_{p\_AH5}$  und  $D_{a\_AH5}$  mehr als 4 dB von den Bezugswerten ab. Das Diagramm der Bewertungsgrößen  $D_{p\_AH5}$  und  $D_{a\_AH5}$  für Messungen auf der Längswand (Abbildung 5.24) zeigt ähnliches Verhalten wie auf der Trennwand/Anregung mit Putz (Abbildung 5.22).

Bei Messungen auf der Trennwand ohne Putz an der Anregungsstelle ist bei 10-Hz-Schlagfrequenz so gut wie keine lineare Verzerrung der Bewertungsgröße  $D_{p\_AH5}$  zu erkennen, sie entspricht sehr gut der erwarteten Pegeldifferenz. Bei der Schlagfrequenz

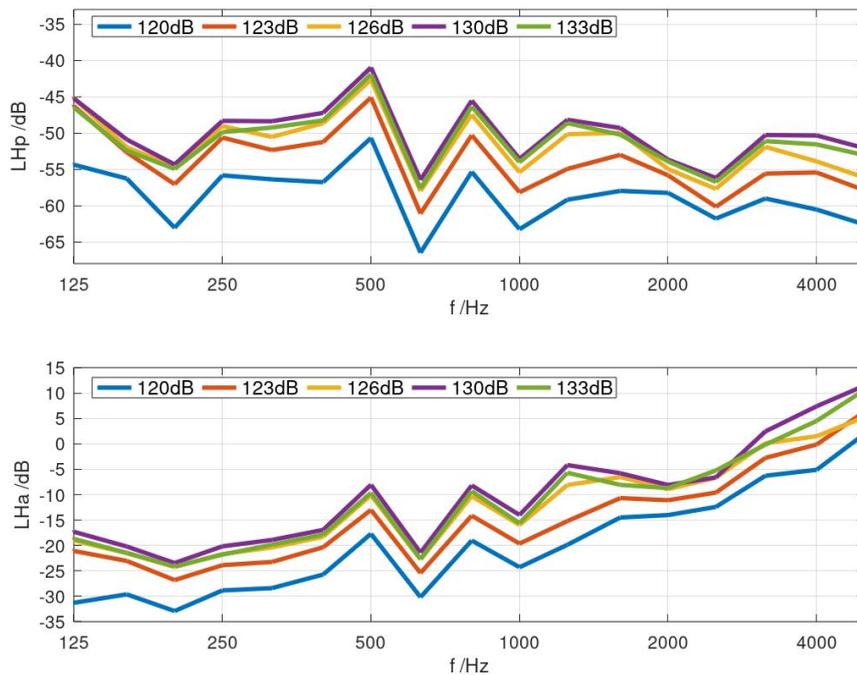


Abbildung 5.17: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz

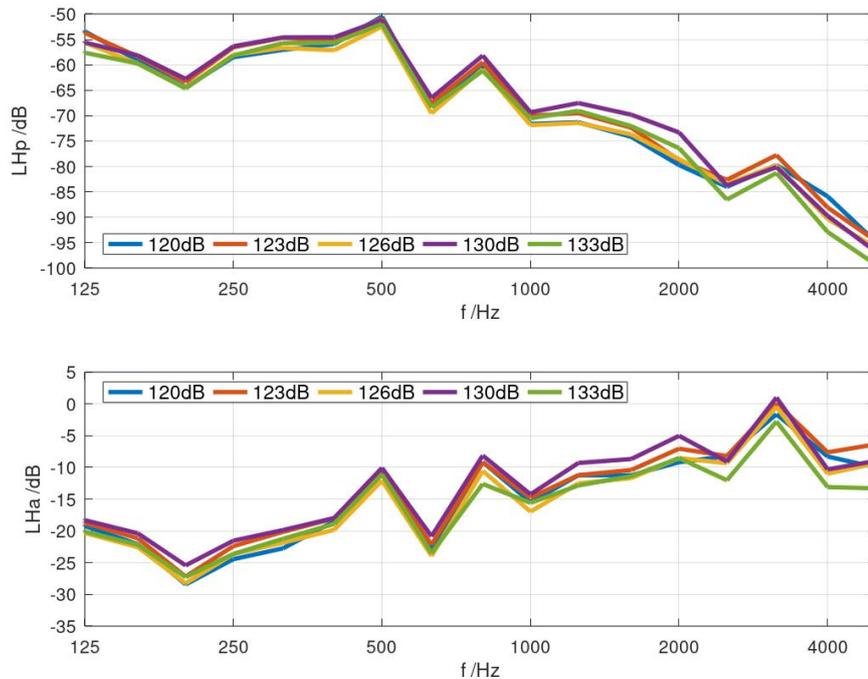


Abbildung 5.18: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Längswand, Hammer-Anregung

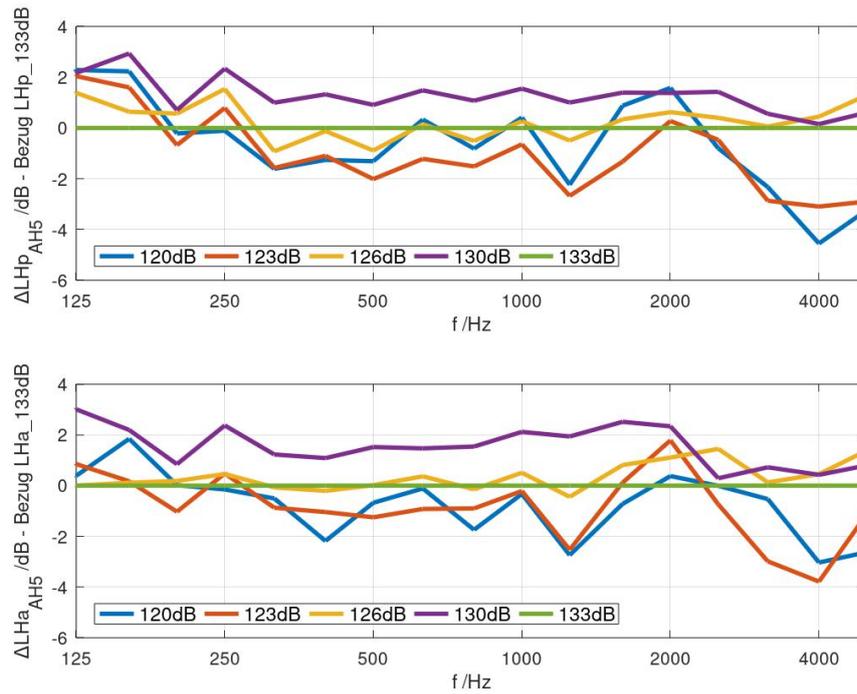


Abbildung 5.19: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta LH_{p\_ASS}$ ,  $\Delta LH_{a\_ASS}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz

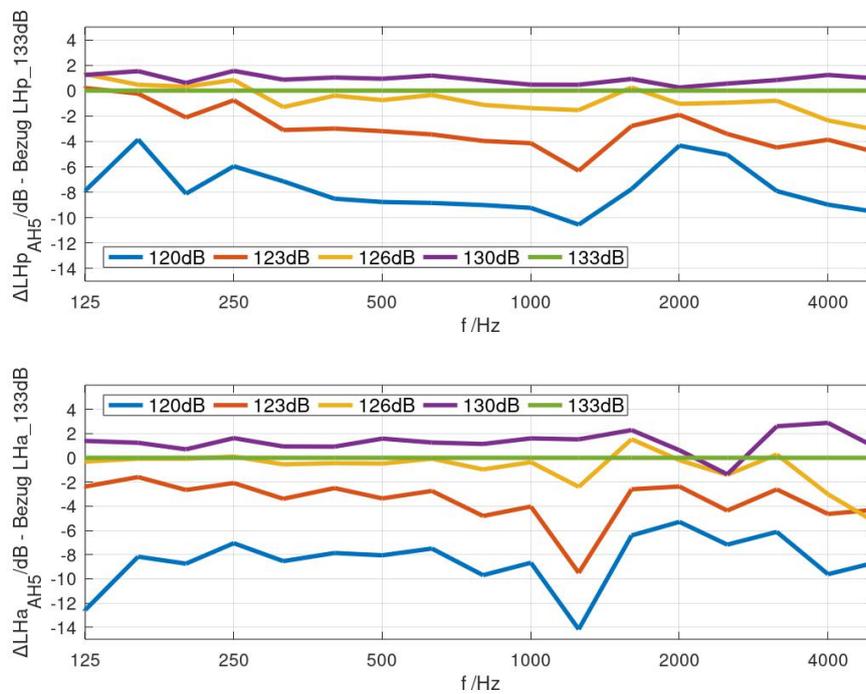


Abbildung 5.20: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta LH_{p\_ASS}$ ,  $\Delta LH_{a\_ASS}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz

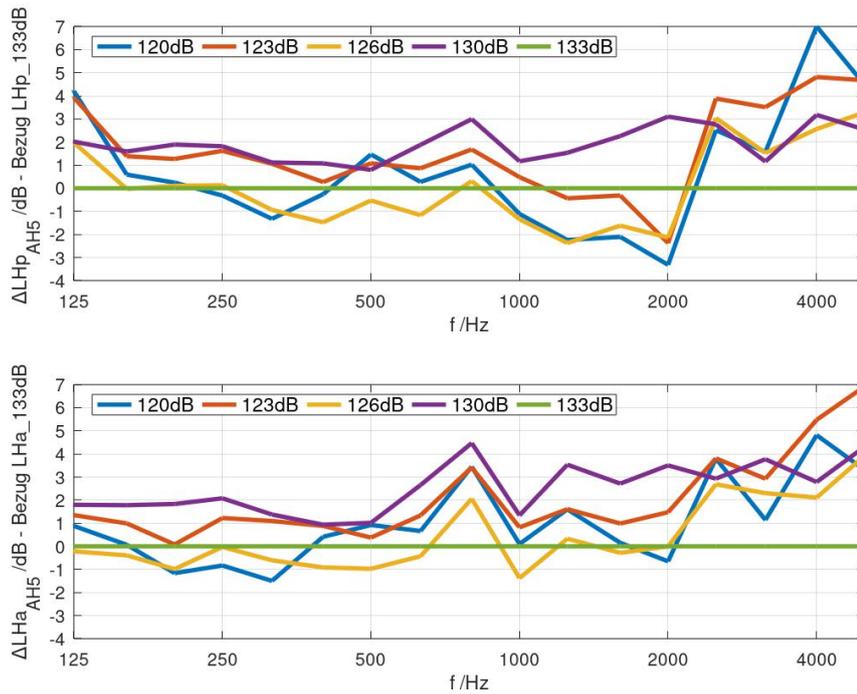


Abbildung 5.21: Übertragungsfunktionsdifferenz  $\Delta LH_{p\_AS5}$ ,  $\Delta LH_{a\_AS5}$  für die Längswand, Hammer-Anregung

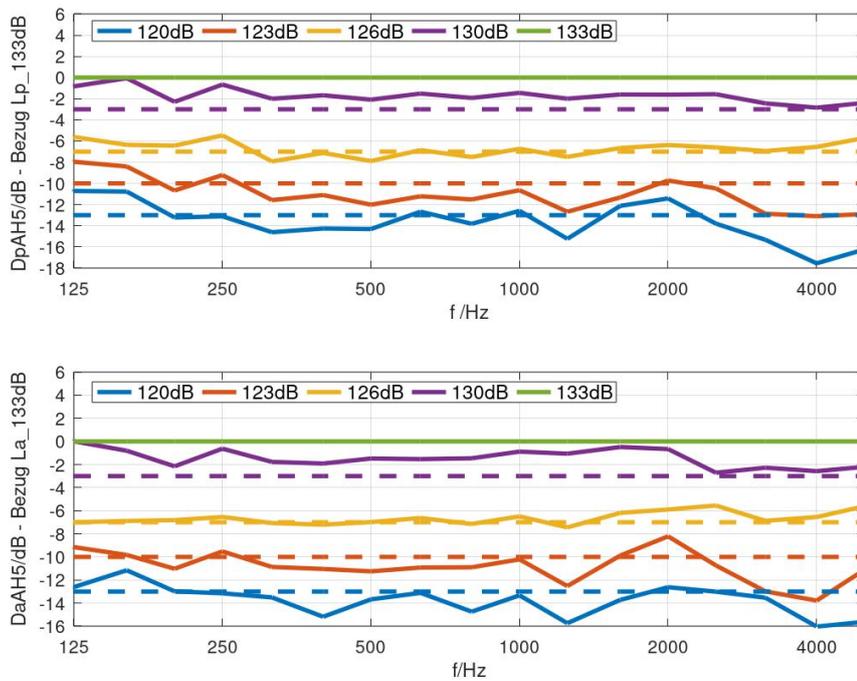


Abbildung 5.22: Pegeldifferenz  $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung mit Putz

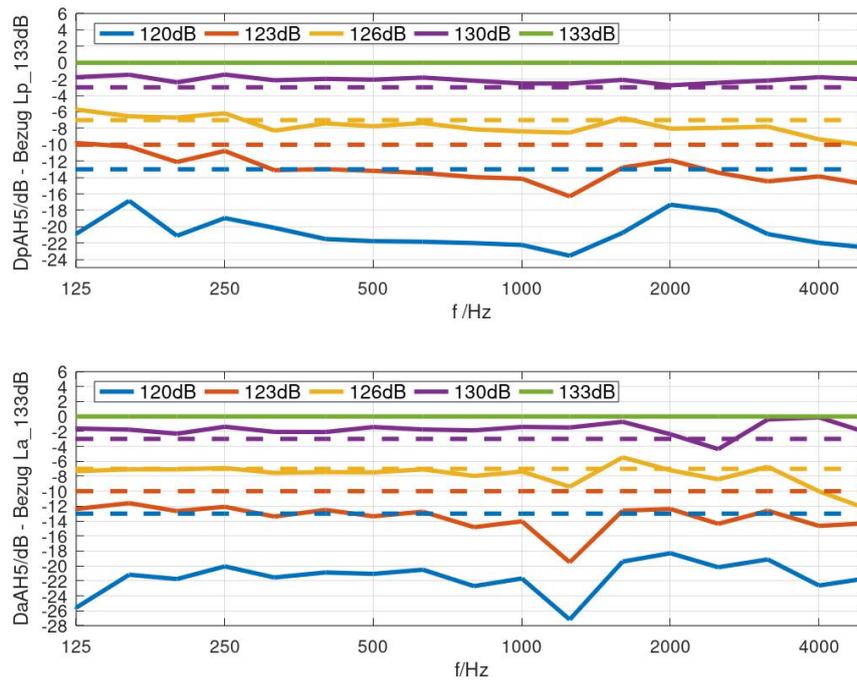


Abbildung 5.23: Pegeldifferenz  $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$  für die Trennwand, Hammer-Anregung ohne Putz

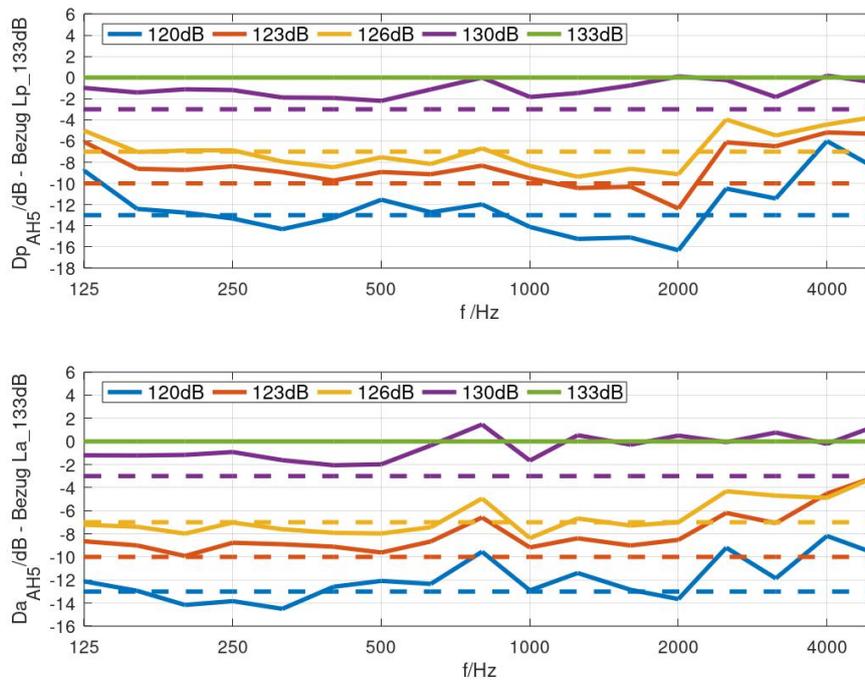


Abbildung 5.24: Pegeldifferenz  $D_{p\_AH5}$ ,  $D_{a\_AH5}$  für die Längswand, Hammer-Anregung

von 2 Hz liegt unter 1000 Hz ebenso ein glatter Frequenzgang vor. Die Abweichungen zur der jeweils erwarteten Pegeldifferenz nehmen aber mit zunehmender Pegeldifferenz der Anregungskraft  $\Delta L_{F\_AH5}$  stark zu. Bei der Anregungskraft  $L_{F\_1000Hz} = 126$  dB liegt die Abweichung bei ca. 0 dB, bei  $L_{F\_1000Hz} = 123$  dB erhöht sich die Abweichung auf ca. 3 dB und bei  $L_{F\_1000Hz} = 120$  dB auf ca. 7 dB. Ab 1000 Hz entstehen lineare Verzerrungen, die sich ebenso mit zunehmender Pegeldifferenz  $\Delta L_{F\_AH5}$  verstärkt.

Für die transiente Anregung wurde das Hammerwerk per Hand direkt an die Wand gedrückt. Wegen der manuellen Ankopplung erhalten die Messungen hierbei deutlich mehr Unsicherheiten als bei Messungen mit der Shaker-Anregung. Zu den vorliegenden Verzerrungseffekten kommt dadurch noch mehr Streuung dazu. Es lässt sich deshalb die frequenzabhängige lineare Verzerrung nicht so genau wie bei der stationären Anregung identifizieren. Jedoch ist eine systematische lineare Verzerrung im ganzen Frequenzbereich 100 Hz - 3150 Hz deutlich zu erkennen, vor allem bei der Trennwand mit der Anregung ohne Putz. Außerdem hat die Schlagfrequenz des Hammerswerk auch einen Einfluss auf die Übertragungsfunktionen. Es besteht deshalb keine Linearität bei der Messung der Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  mit der transienten Anregung auf der Kalksandsteinwand.

### 5.2.3 Vergleich zwischen stationärer und transienter Anregung

Für den Vergleich zwischen der stationären und transienten Anregung wurde für jede Prüfwandsituation die ermittelte Übertragungsfunktion bei beiden Anregungsarten in einem Diagramm zusammengestellt.

Bei allen drei Prüfwandsituationen zeigt der Vergleich, dass die Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  der beiden Anregungsarten ähnliche Verläufe und Pegelniveaus aufweisen (Abbildungen 5.25, 5.26, 5.27). Jedoch liegen sichtbare Unterschiede der Frequenzverläufe vor. Außer einzelnen Annäherungen bei manchen Terzen unterscheiden sich sonst die Frequenzverläufe der Übertragungsfunktion zwischen den zwei Anregungsarten: bei der stationären Anregung ist der Frequenzverlauf deutlich glatter.

Um den Vergleich zu veranschaulichen, werden die Plots der Übertragungsfunktionen auf den Hauptfrequenzbereich 100 Hz bis 3150 Hz begrenzt. Für jede Anregungsart werden die stärkste und schwächste Anregungsstufe zum Vergleich gewählt: bei der stationären Anregung die Stufen AS2 und AS5, bei der transienten Anregung die Stufen AH1 und AH5. Hierbei wird die Anregungskraft jeweils bei 500 Hz als Bezugswert für den Vergleich genommen, um die Relation zwischen der Anregungsstärken deutlicher darzustellen. Bei den zwei Prüfwandsituationen der Trennwand - Anregung mit Putz und der Längswand stimmen die Übertragungsfunktionen bei der Anregungsstufe AS5 mit  $F_{500} = 2,25$  N zu der Stufe AS2  $F_{500} = 0,09$  N der stationären Anregung gut überein. Bei

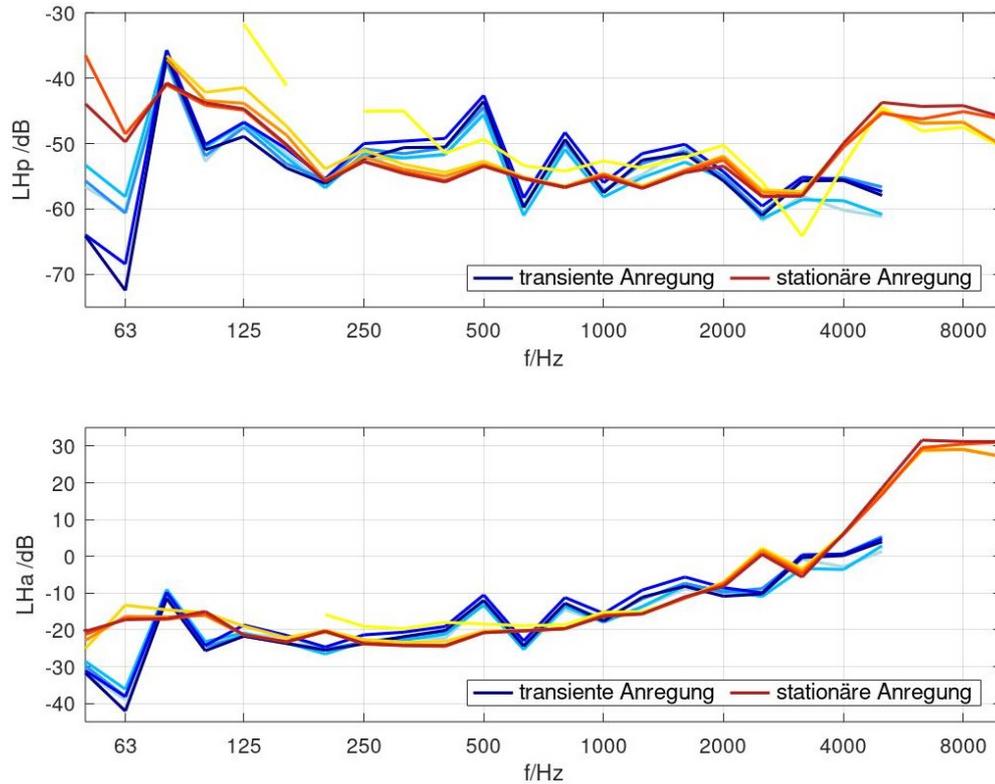


Abbildung 5.25: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  der Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung mit Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken

Tabelle 5.3: Der Bezugswert  $F_{500Hz}$  für den Vergleich der Übertragungsfunktionen der schwächsten und stärksten Anregungsstufen der transienten und stationären Anregungen

Nr.	Art der Anregung	Trennwand /mit Putz	Trennwand /ohne Putz	Längswand
AS2	stationär	0,09 N	0,14	0,09 N
AS5	stationär	2,25 N	1,68 N	2,13 N
AH1	transient	4,6 N	4,6 N	4,6 N
AH5	transient	20,5 N	20,5 N	20,5 N

Erhöhung der Anregungskraft von der Stufe AS5 der stationären Anregung auf die Stufe AH1 der transienten Anregung mit  $F_{500} = 4,46$  N erhält die Übertragungsfunktion bei der gleichen Messung einen anderen Verlauf (Abbildungen 5.28, 5.30). Die Anregungskraft der Stufe AH1 beträgt ca. das 50-fache der Stufe AS2. Bei den Terzen 125 Hz - 160 Hz, 250 Hz - 400 Hz, 1000 Hz - 1600 Hz gibt es eine Annäherung der Übertragungsfunktion  $L_{Ha}$  zwischen der Anregungsstufe AS5 und AH1.

Bei der Prüfwandsituation der Trennwand - Anregung ohne Putz liegt bei 25-fachen der Anregungsstufe AS2 die Linearität der Übertragungsfunktion  $L_{Ha}$  schon nicht mehr vor. Gemäß dem Stand der Kenntnis über die Nichtlinearität der Messung des Verlustfaktors [4] tritt Nichtlinearität bei der Messung der Verlustfaktor beim Verhältnis von 6 N zu 1,8

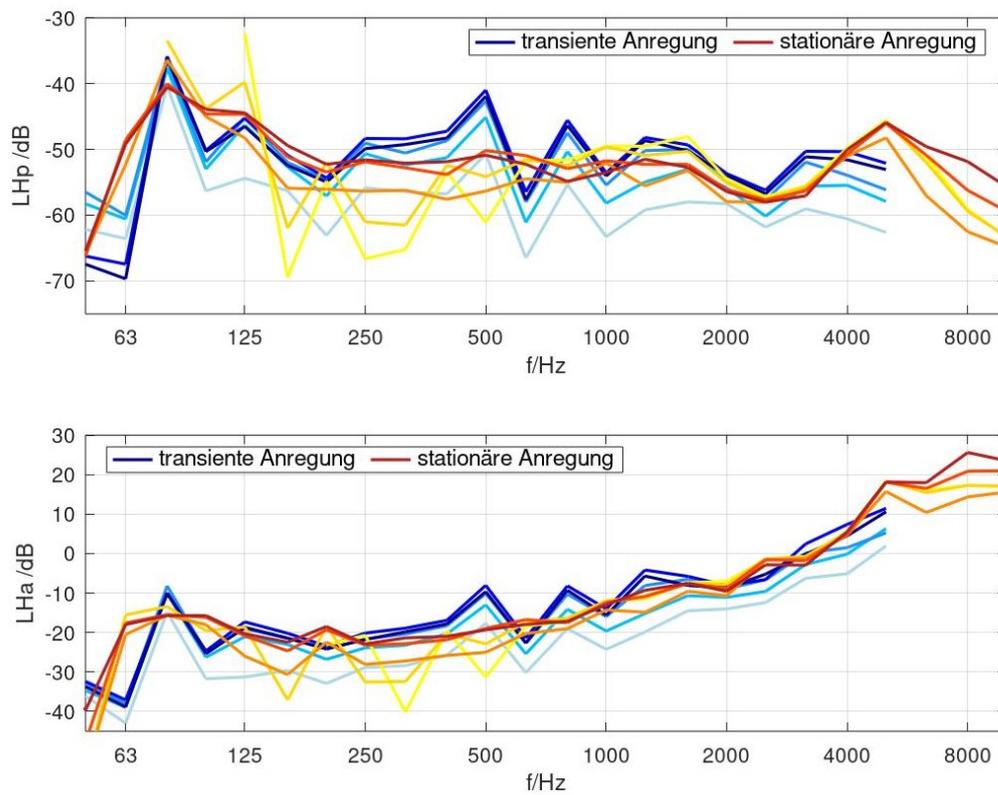


Abbildung 5.26: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  der Trennwand, Hammer- und Shaker-Anregung ohne Putz, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken

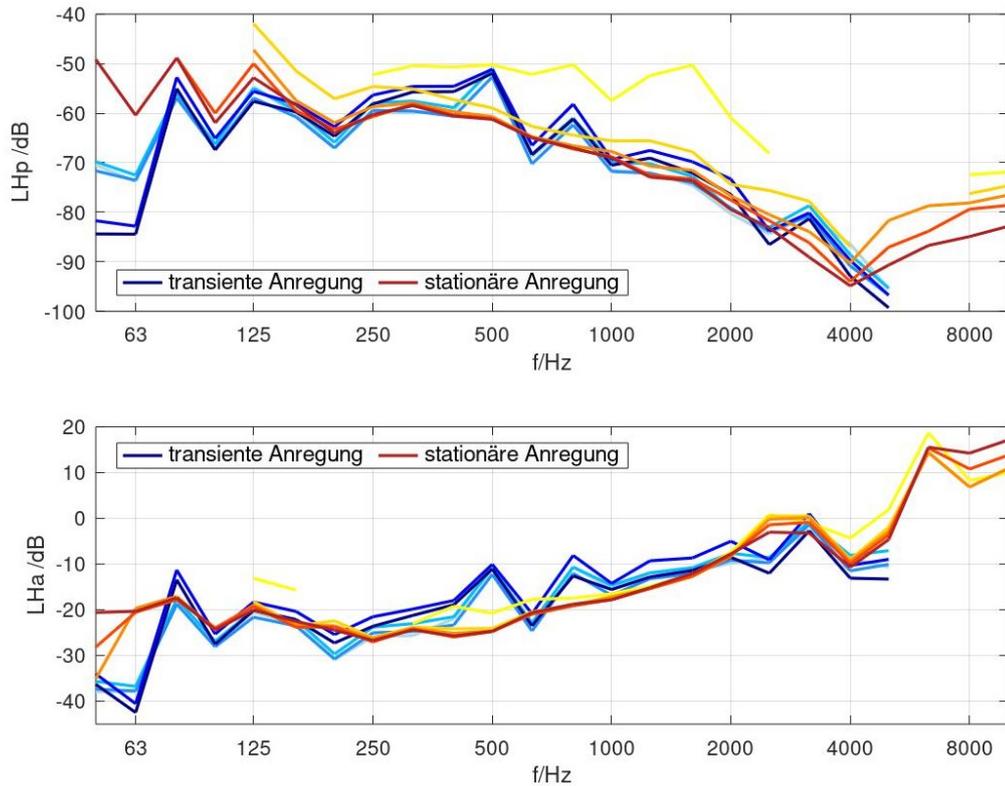


Abbildung 5.27: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  der Längswand , Hammer- und Shaker-Anregung, hellere Farbtöne entsprechen geringeren Anregungsstärken

N der Bezugswerte  $F_{500}$  (Shaker-Anregung auf Trennwand mit Putz) auf (Abbildung 2.4). In dieser Arbeit wurde Nichtlinearität bei der gleichen Prüfwandsituation mit dem Kraftverhältnis von 4,6 N zu 2 N bereits festgestellt.

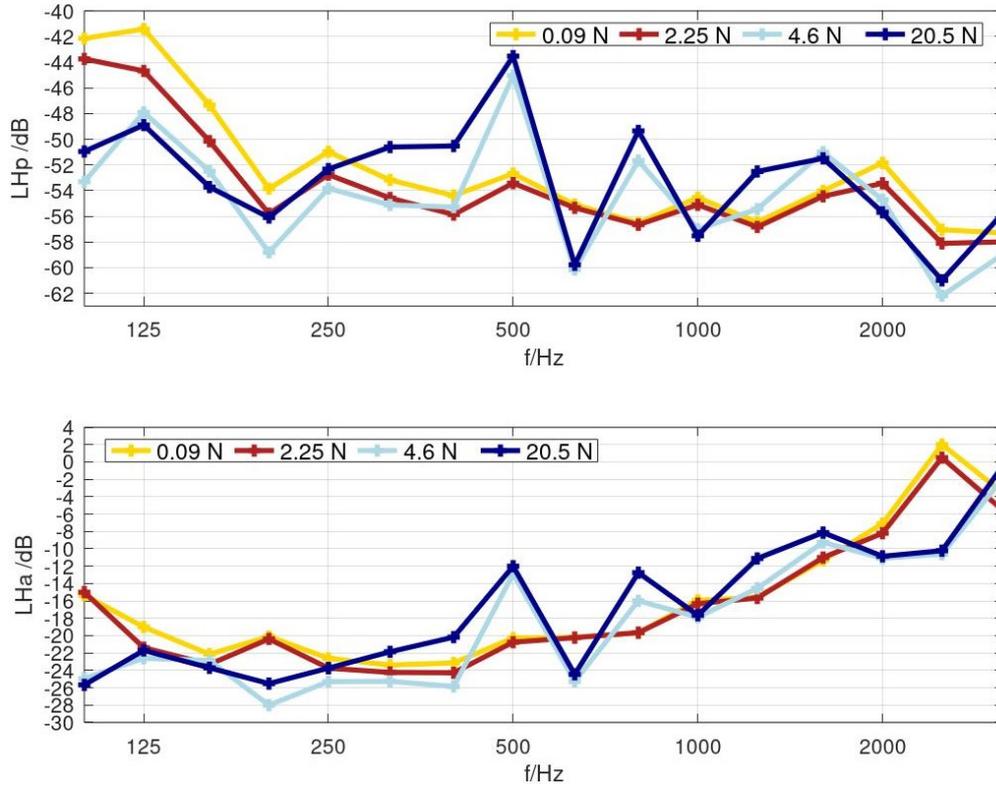


Abbildung 5.28: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung mit Putz, ausgewählte Anregungsstufen

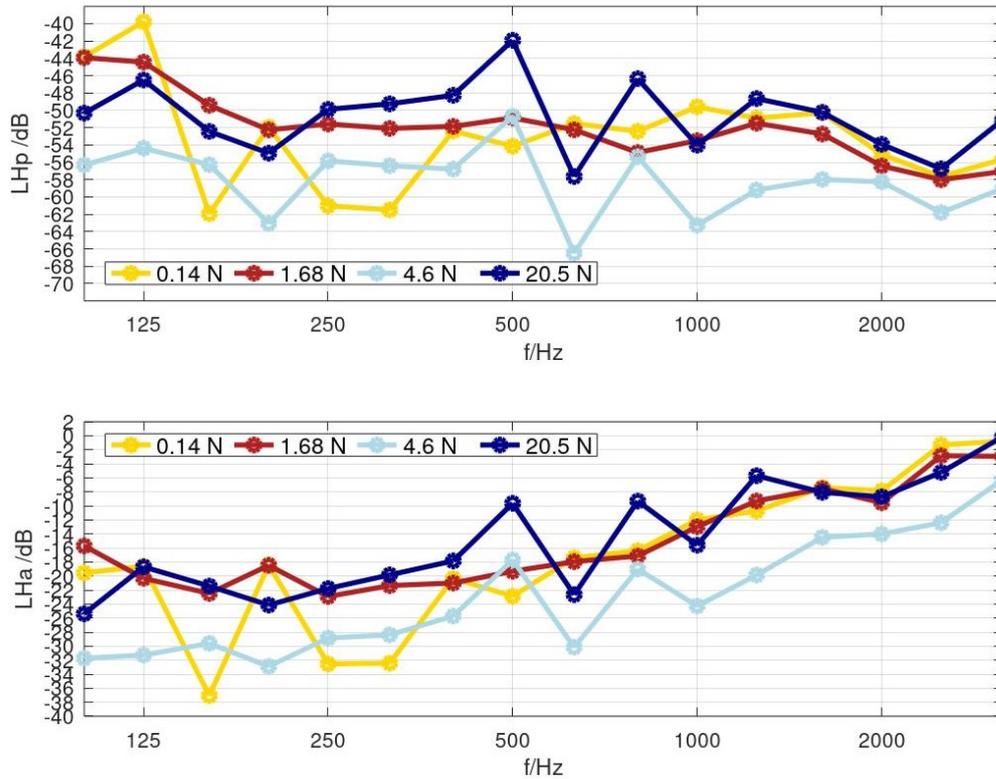


Abbildung 5.29: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Trennwand , Hammer- und Shaker-Anregung ohne Putz, ausgewählte Anregungsstufen

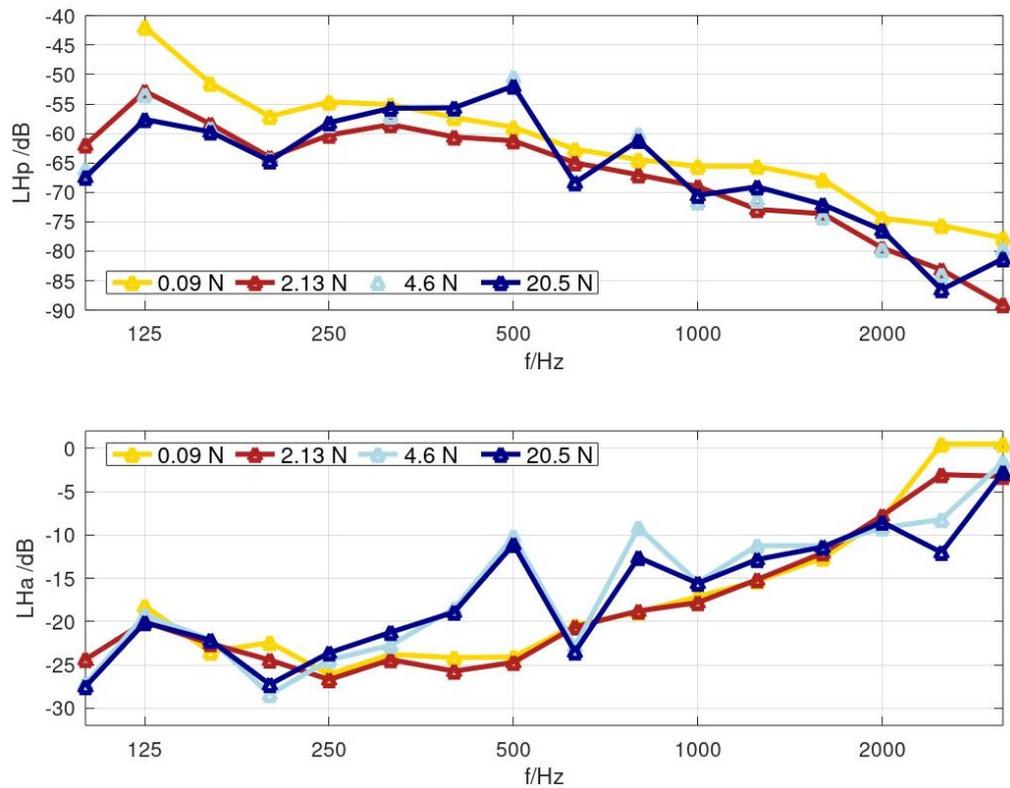


Abbildung 5.30: Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$ ,  $L_{Ha}$  für die Längswand, Hammer- und Shaker-Anregung, ausgewählte Anregungsstufen



## 6 Fazit

Die vorliegende Arbeit untersucht die Linearität der Körperschallübertragung von Kalksandsteinwand mittels Shaker- und Hammerwerkankregung als Voraussetzung für die Anwendung des Prognoseverfahrens mit der Übertragungsfunktion nach EN ISO 10848-1. Dabei wurden Einflüsse von folgenden konstruktionsbedingten Eigenschaften der Wand auf die Linearität der Messung überprüft: die Verbindungsart der Steine (mit Kleber oder Mörtel), die Beschaffenheit der Wandoberfläche (mit oder ohne Putz).

Bei der Untersuchung der Eingangsadmittanz der Kalksandsteinwand mit der stationären Anregung wurde festgestellt, dass keine Linearität besteht. Ab einer bestimmten Anregungsstärke entspricht die Eingangsadmittanz im Frequenzbereich unter 1600 Hz die Admittanz einer Masse. Als Hypothese dazu wird angenommen, dass die Wand bei tieferen und mittleren Frequenzen mit zunehmender Anregungskraft nicht mehr gleichmäßig schwingt, sondern in erster Linie nur ein lokaler Bereich an der Anregungsstelle. Hierzu wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Für die Übertragungsfunktionen  $L_{Hp}$  und  $L_{Ha}$  war zu beobachten, dass bei der Verbindungsart der Steine mit Kleber die Putzschicht entscheidend für die Linearität der Übertragungsfunktion ist. Ist eine Putzschicht vorhanden, dann liegt im Frequenzbereich 100 Hz – 1600 Hz die Linearität vor, zwischen 1600 Hz und 4000 Hz gibt es eine geringe lineare Verzerrung. Folglich ist eine Prognose mittels Raum- und Strukturübertragungsfunktion im Frequenzbereich 100 Hz – 3150 Hz möglich. Ab 1600 Hz ist diese jedoch zunehmend mit Unsicherheit behaftet.

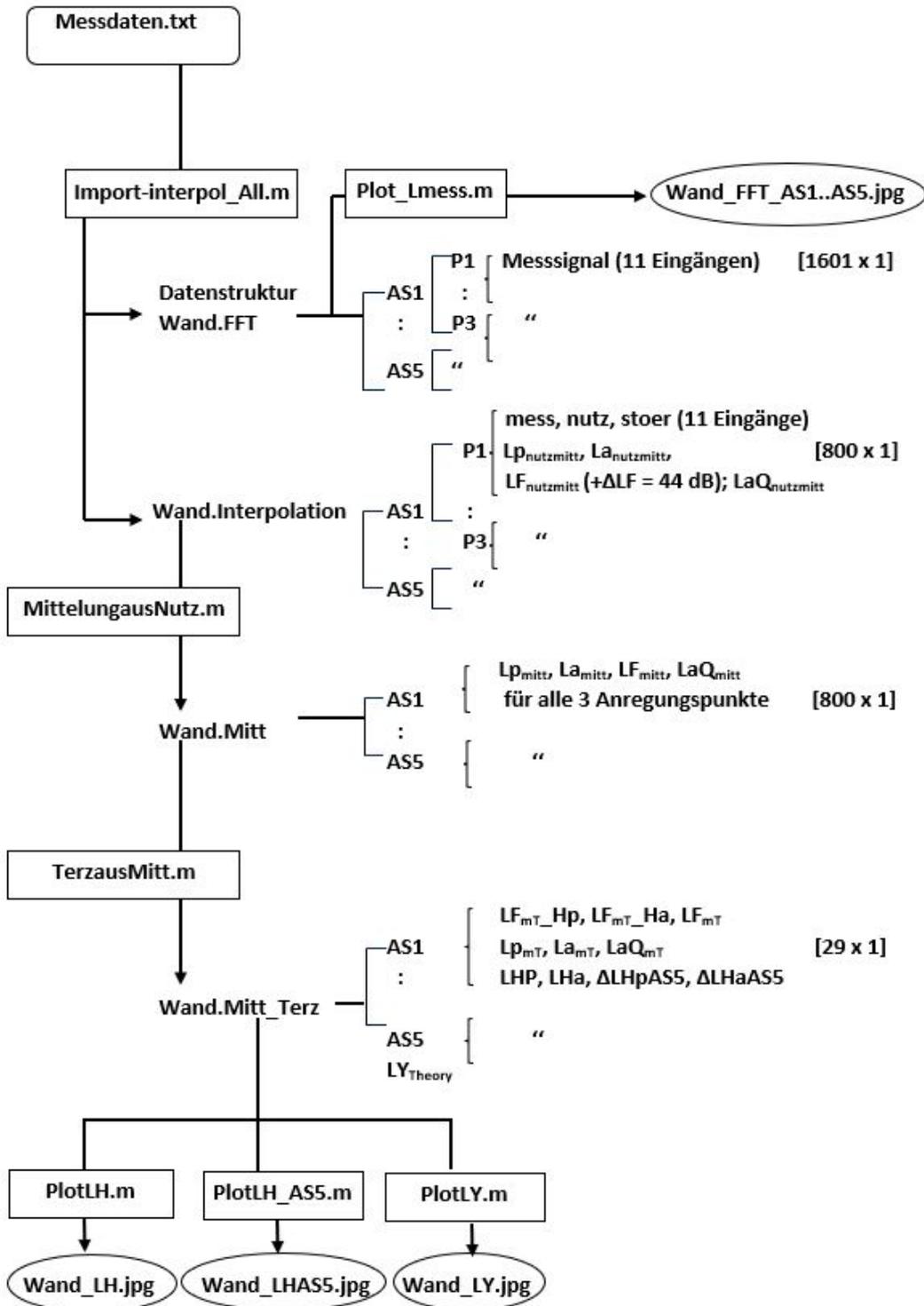
Die Übertragungsfunktion  $L_{Ha}$  verhält sich bei gemörtelter Kalksandsteinwand bei 100 Hz – 1600 Hz ebenso linear und zeigt ab 1600 bis 4000 Hz ebenso wiederum geringe lineare Verzerrungen. Zur Übertragungsfunktion  $L_{Hp}$  sind keine Aussagen möglich, folglich weitere Untersuchungen erforderlich.

Zur transienten Anregung mit dem Hammerwerk wurde festgestellt, dass die Übertragungsfunktion sich nicht nur mit der Schlagstärke ändert, sondern auch mit der Schlagfrequenz. Hierzu sind weitere Messungen nötig, um den Zusammenhang genauer zu beschreiben.

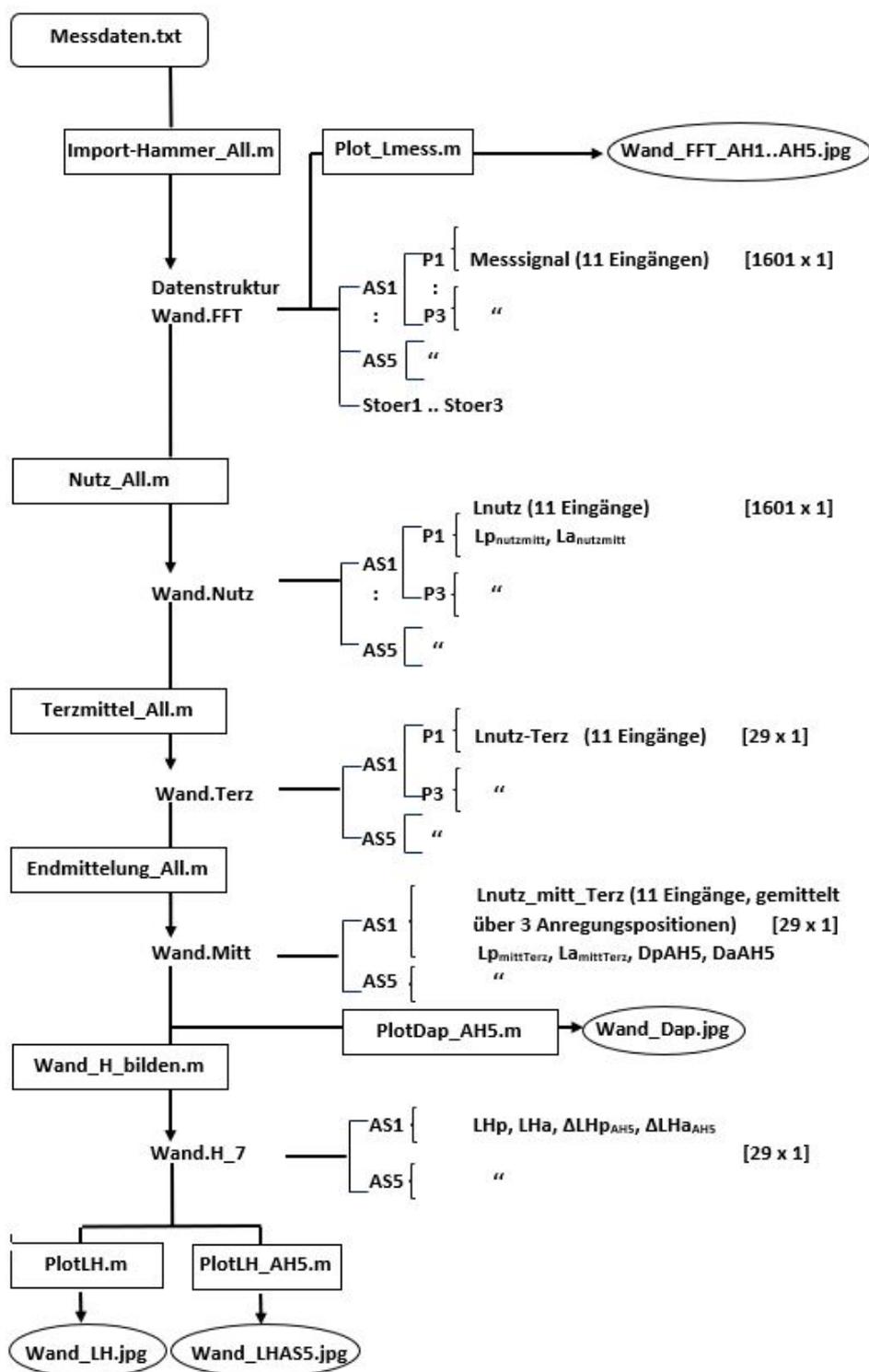
Bei transienter Anregung sind systematische lineare Verzerrungen im ganzen Frequenzbereich zu erkennen. Die Übertragungsfunktionsdifferenzen sind größer als bei der stationären Anregung, obwohl die Differenz zwischen den Anregungskräften kleiner ist. Es liegt keine Linearität der Messung der Übertragungsfunktion bei der transienten Anregung vor. Vergleichend zu bisherigen Ergebnissen [4] (Abschnitt 2.2) lässt sich ableiten, dass schon bei geringen Kraftunterschieden zwischen der stationären und transienten Anregung die Linearität der Übertragungsfunktion nicht mehr vorliegt.



## **Anhang A: Ablauf der Datenverarbeitung für Messungen mit Shaker-Anregung, mittels Funktionen und Datenstrukturen**



**Anhang B: Ablauf der Datenverarbeitung für  
Messungen mit  
Hammer-Anregung, mittels  
Funktionen und Datenstrukturen**



## Literaturverzeichnis

- [1] *Prof. Jörn Hübelt*: Akustische Messtechnik und Signalverarbeitung. Vorlesungsrikt, FH Mittweida (2017)
- [2] *Dr. Detlef Schulz*: Messwertverarbeitung/Signalanalyse. Vorlesungsrikt, FH Mittweida (2007)
- [3] *Manfred Seifart*: Analoge Schaltungen (2003)
- [4] *Heinrich Bietz, Sylvia Stange-Kölling, Martin Schmelzer, Volker Wittstock*: Loss factor measurement and indications for nonlinearities in sound insulation. Building Acoustics (2019)
- [5] *Fasold, Sonntag, Winkler*: Bau- und Raumakustik (1987)
- [6] *Cremer, L., Heckl, M.*: Körperschall (1987)
- [7] *Christopher Knuth*: Bestimmung des Norm-Trittschallpegels durch direkte Messung und mit Übertragungsfunktionen. Bachelorarbeit, Hochschule für Technik Stuttgart (2019)
- [8] DIN 12354
- [9] *Heinrich Bietz, Volker Wittstock*: Charakterisierung von Hammerwerken für horizontale Anregung (DAGA 2017)
- [10] CEN/TC 126/WG 2 "Prediction of the acoustic performance of buildings from the performance of elements " (2022)
- [11] *Sobhan Dehbozorgi*: Untersuchung des Einflusses von Nichtlinearitäten auf die Messung des Trittschallpegels mit Übertragungsfunktion. Masterarbeit, TU Braunschweig (2022)
- [12] DIN EN 15657-1: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden – Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand – Teil 1: Vereinfachte Fälle, in denen die Admittanzen der Anlagen wesentlich höher sind als die der Empfänger am Beispiel von Whirlwannen ( Beuth Verlag Oktober 2009)



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 04.03.2021