

Projektarbeit

Erfassung und Evaluierung der Übersprecheigenschaften des Ikosaederlautsprechers

Peter Reiner Christian Jochum

Graz, am 2. Februar 2007

Betreut durch:

DI Franz Zotter

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Messaufbau	4
2.1	verwendete Gerätschaften	4
2.2	Messung der Verstärkerausgänge	5
2.3	Vorbereiten des Laservibrometers	5
3	Messmethode	6
3.1	logarithmischer Sweep	6
3.2	Wahl des Messpunktes	9
3.3	Prozessierung der Messdaten	11
3.3.1	Fensterung der Systemantwort $\tilde{y}[n]$	11
3.3.2	Fenstern der Impulsantwort $\tilde{h}[n]$	13
4	Messergebnisse	13
4.1	aktive Lautsprecher	13
4.1.1	aktive Übertragungsfunktionen	13
4.1.2	Spektrogramme	14
4.2	Passiv angeregte Lautsprecher (Übersprechen)	18
4.2.1	Symmetrien	18
4.2.2	Übertragungsfunktionen	19
5	Diskussion	22
5.1	Übersprechen	22
5.2	Fehler durch das Laservibrometer	22
6	Erkenntnisse und Ausblick	23

1 Einleitung

Seit Beginn 2006 arbeitet das IEM an einem neuen, kugelförmigen Wiedergabesystem, das die Form eines regelmäßigen 20 flächigen Polyeders besitzt. Sämtliche Teilflächen dieses hohlen Ikosaeders sind mit Lautsprechern bestückt, welche diskret bespielt werden können. Bei geeigneter Signalaufbereitung für jeden Einzellautsprecher können akustische Abstrahlungswirkungen unterschiedlichster Ausformung erzielt werden. Diese noch sehr junge Wiedergabemethode ermöglicht völlig neue Perspektiven bei der Wiedergabe von Instrumentalklängen, bei Raumakustik-Messungen, etc.. (sphärische akustische Holographie/Wellenfeldsynthese) Ziel dieses Projekts ist die Erfassung des Übersprechens über den gemeinsamen Innenraum des Ikosaeders mit einem Laser-Vibrometer. Bei der Anregung eines ausgewählten Lautsprechers mit einem Messsignal sollen die Bewegungsgrößen aller Lautsprecher ermittelt werden. Es darf mit gutem Grund angenommen werden, dass passive Anregungen über den gemeinsamen Innenraum erfolgen, sich also nicht angeregte Membranen mit bewegen. Die zu bestimmenden Messergebnisse geben Aufschluß über diese Wechselwirkungen und sollen in der Projektarbeit beurteilt werden. In einem weiteren Projekt, welches praktischerweise parallel zu diesem stattfindet, gilt es, diese Übertragungsfunktionen zur Kompensation des Übersprechens heranzuziehen, und die Qualität dieser Maßnahme zu prüfen.

2 Messaufbau

Die grundsätzliche Struktur des verwendeten Messaufbaus ist in Abbildung 2 ersichtlich. Gemessen wurde am Messplatz des IEM, Inffeldgasse 10/1, 8010 Graz unter Verwendung der dort vorhandenen Geräte.



Abbildung 1: Icosaeder mit justiertem Laservibrometer

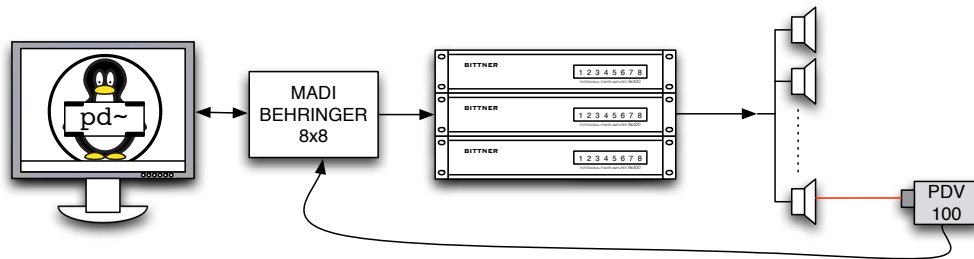


Abbildung 2: Struktur des Messaufbaus

2.1 verwendete Gerätschaften

- pd auf einem Linux PC
- rme *ADI – 648*
- Behringer *ultragain pro-8 digital* als AD/DA-Wandler
- Bittner Audio *8x100W* aus der *8x Serie*
- Laservibrometer *PDV100* der Firma Polytec [1]

2.2 Messung der Verstärkerausgänge

Um die Konsistenz des Messaufbaus gewährleisten zu können und bei den eigentlichen Messungen an allen Lautsprechern vergleichbare Signale anliegen zu haben, wurden im Vorfeld die Verstärkerausgänge aller Kanäle mittels Oszilloskop gemessen (Abbildung 3).

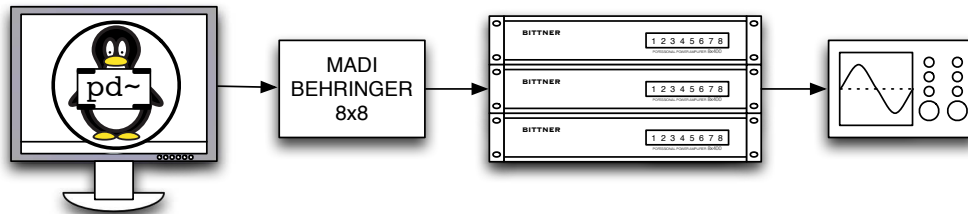


Abbildung 3: Messung der Verstärkerausgänge

Die symmetrischen Ausgänge der über die MADI bespielten DA-Wandler wurden direkt auf die Verstärker verdrahtet und deren Kanäle wiederum alle auf 0 dB eingestellt. Der mit pd generierte und an allen Kanälen anliegende 200 Hz Sinuston mit -59 dB(FS) führte zu den in Abbildung 4 dargestellten Spannungspiegeln an den unbelasteten Verstärkerausgängen. Mit einer maximalen Differenz von $0,4\text{ dB(V)}$ stimmen die Ausgangspegel gut genug überein um ohne weitere Kompensation zur Anwendung kommen zu können.

2.3 Vorbereiten des Laservibrometers

Die Montage des Laservibrometers wurde mittels eines schweren Mikrofonstativs, welches zur besseren Entkopplung auf Trittschall dämmende Platten gestellt wurde, realisiert. Der Abstand zwischen Lautsprechermembran und *PDV100* wurde über die dem Benutzerhandbuch [2] des Laservibrometers entnommene Formel

$$96\text{ mm} + n \cdot 138\text{ mm}, \text{ mit } n = 1$$

zu $23,4\text{ cm}$ bestimmt. Die Einstellungen am *PDV100* waren [VELO: 500, LP: 22, HP:N]. Die über das Servicemenü zugänglichen Einstellungen FULL und NULL wurden verwendet, um die vom Laservibrometer zu erwartenden Pegel abschätzen zu können. Hierbei fiel auf, dass sowohl das Signal FULL als auch das Signal NULL sehr verrauscht und mit sporadisch auftretenden, kleinen, transienten Störungen recht unsauber sind. Um auch einen Überblick über den zu erwartenden Signal/Störabstand zu erhalten, wurde weiters das Hintergrundrauschen bei nicht aktiven Lautsprechern gemessen und ebenfalls in Abbildung 5 eingetragen.

3 Messmethode

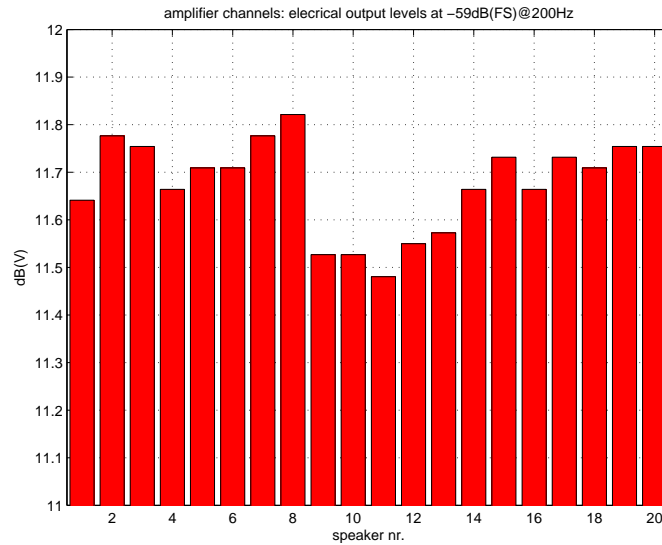


Abbildung 4: Ausgangsspannungen der unbelasteten Endstufenkanäle

In dem für uns interessanten Frequenzbereich von 40 Hz bis ca. 2 kHz ist der Signal/Störabstand ausreichend groß, wenngleich die vom Laservibrometer ausgehenden und insbesondere bei *noise* und NULL hervorstechenden Spikes sehr auffallend und einigermaßen störend sind.

Um den Eingang des AD-Wandlers nicht zu übersteuern, wurden die Messungen in weiterer Folge mit -45 dB(FS) durchgeführt (Eingestellt im Messpatch). In Ermangelung eines S/P-DIF Einganges an unserem Messplatz, wurde der analoge Ausgang des *PDV100* auf den LINE-Eingang des AD-Wandlers gelegt, und wieder von *pd* übernommen.

3 Messmethode

3.1 logarithmischer Sweep

Die verwendete Methode ist die von Angelo Farina vorgeschlagene Methode des logarithmischen Sweeps [3]. Die Vorteile sind:

- ein mit *pd* einfach zu erzeugendes Anregungssignal
- hohe Energie im relevanten Messbereich (rosa Spektrum)
- gute Separation der Impulsantwort und deren Harmonischen

3 Messmethode

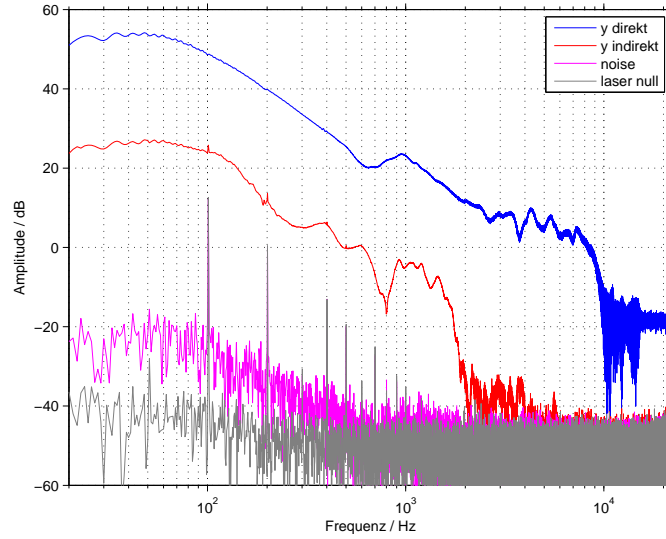


Abbildung 5: Überblick der Pegel am Laservibrometer

Die bekannten Nachteile, wie Empfindlichkeit gegenüber transienten Störungen und längere Messdauer, werden sich auch in unseren späteren Messungen als eben solche bestätigen und wurden von vornherein in Kauf genommen. Um eine Impulsantwort mit möglichst guter SNR zu erhalten, bei welcher die Harmonischen gut separiert und ersichtlich sind, muss genügend Energie eingebracht werden, sprich ein sehr langer Sweep verwendet werden. Da sich die Messzeit auch bei 400 Messungen in Grenzen halten sollte, haben wir uns hier für eine Sweeplänge von 1 Sekunde entschieden. Als Startfrequenz wurde $\omega_1 = 44,1$ Hz und als Endfrequenz $\omega_2 = 22$ kHz gewählt. Das Spektrum unseres Anregesweeps ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die Momentanfrequenz kann geschrieben werden als

$$\Omega[n] = \omega_1 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{\frac{n}{N}} \quad (1)$$

Durch Umformen erhält man

$$n(\Omega) = N \cdot \frac{\log\left(\frac{\Omega}{\omega_1}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (2)$$

3 Messmethode

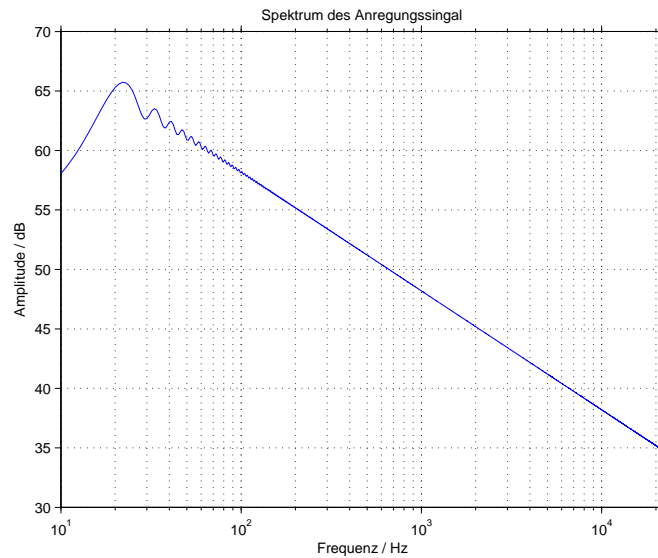


Abbildung 6: Spektrum des anregenden Sweeps

Die Harmonischen können geschrieben werden als

$$n([k+1] \cdot \Omega) = N \cdot \frac{\log\left(\frac{k+1}{\omega_1}\right) + \log(\Omega)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (3)$$

Die Differenz aus Gleichung (3) und Gleichung (2) ist nicht mehr von Ω abhängig und kann geschrieben werden als

$$\Delta n(k) = N \cdot \frac{\log(k+1)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (4)$$

Da sich bei einer gewählten Sweeplänge von einer Sekunde N und f_s kürzen lassen, bleibt für

$$\Delta t(k) = \frac{\log(k+1)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (5)$$

übrig und man erhält die Harmonischen $\Delta t(1) = 111,5 \text{ ms}$, $\Delta t(2) = 176,8 \text{ ms}$, $\Delta t(3) = 223,1 \text{ ms}$, $\Delta t(4) = 259 \text{ ms}$, $\Delta t(5) = 288,3 \text{ ms}$ etc..

3.2 Wahl des Messpunktes

Da es sich bei der Kalotte um ein vergleichsweise weiches Material handelt und somit angenommen werden darf, dass es nicht konphas mit dem Rest der Lautsprechermembrane schwingt, haben wir uns für einen Messpunkt außerhalb des Zentrums entschieden. Dies hat verständlicherweise auch Auswirkung auf die unter 4.2.1 angestellten Symmetrieüberlegungen und zwar in der Form, wie sie aus Abbildung 7 ersichtlich wird.

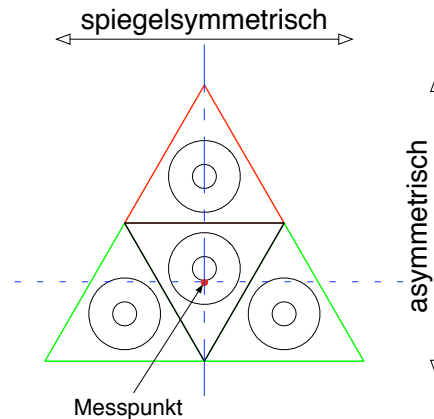


Abbildung 7: Auswirkung des exzentrischen Messpunktes

Diese Symmetrierungen um eine Achse, anstelle der Rotationssymmetrie um das Zentrum eines Lautsprechers, lassen sich in allen Klassen und über alle Lautsprecher recht eindeutig identifizieren. Exemplarisch seien hier die Klassen 1 und 2 des Lautsprechers 1 in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt. Die aus den Abbildungen 22 und 7 zu erwartende Differenz der Übertragungsfunktionen zwischen den Lautsprechern 5 & 6 und Lautsprecher 2 in der Klasse 1 ist ebenso deutlich wie diejenige zwischen 3 & 4 und 11 & 15 beziehungsweise 10 & 7 in der Klasse 2.

Da die gezeigten Asymmetrien für die weitere Verwendung der Messdaten nur bedingt von Bedeutung sind, wird in weiterer Folge nicht mehr darauf Rücksicht genommen.

3 Messmethode

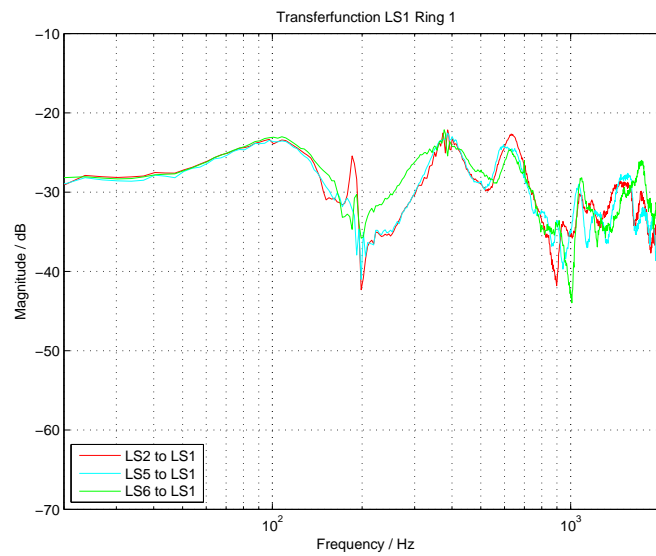


Abbildung 8: Übertragungsfunktionen von Lautsprecher 1 auf seine Klasse 1

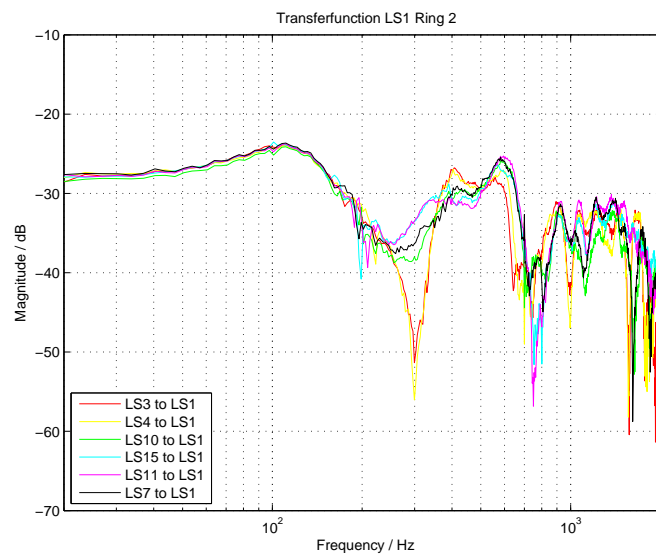


Abbildung 9: Übertragungsfunktionen von Lautsprecher 1 auf seine Klasse 2

3.3 Prozessierung der Messdaten

Die Bearbeitung der Messdaten erfolgte nach dem in Abbildung 10 veranschaulichten Prinzip.

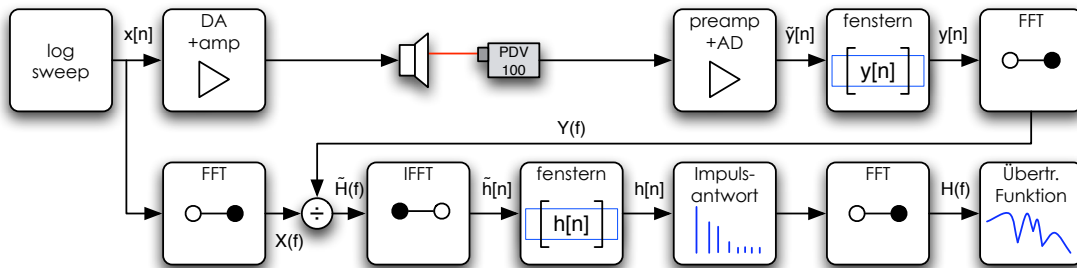


Abbildung 10: Signalkette

3.3.1 Fensterung der Systemantwort $\tilde{y}[n]$

Das von uns gemessene Ausgangssignal $\tilde{y}[n]$ ist mit einer Länge von nicht ganz 2^{17} mehr als ausreichend lang und wird zunächst auf eine Länge von 2^{16} Samples gekürzt. Dies hat den Vorteil kein Zeropadding vornehmen zu müssen und die damit erreichte Frequenzauflösung ist mit 0,67 Hz noch immer ausreichend gut. Um die durch die zyklische Faltung entstehenden Übergangssprünge zu unterdrücken, wird mit einem Hann-Fenster, genauer gesagt mit der Wurzel aus selbigem, ein Fadeing vorgenommen. Das Wurzel-Hann-Fenster wird bei diesen, in Abbildung 11 dargestellten Fades verwendet, um bei der Überblendung die Energie nicht zu verändern und keine Einbrüche zu erzeugen.

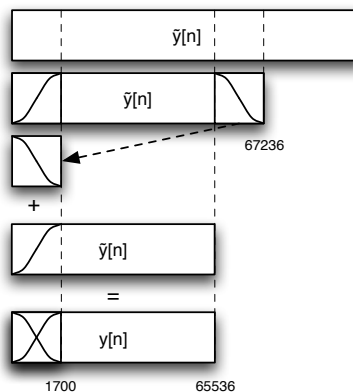


Abbildung 11: Überblendung für die zyklische Faltung

3 Messmethode

Zur Veranschaulichung dieser Optimierung sind die Spektrogramme der entfalteten Impulsantwort $\tilde{h}[n]$ des mit Zero-Padding verlängerten (Abbildung 12), des unveränderten (Abbildung 13), des auf 2^{16} gekürzten (Abbildung 14) sowie des mit Überblendung gekürzten (Abbildung 15) $y[n]$ von Lautsprecher 14 dargestellt.

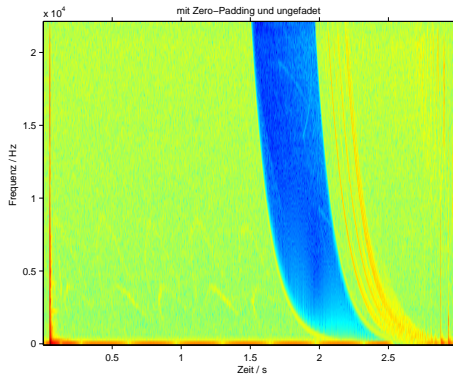


Abbildung 12:

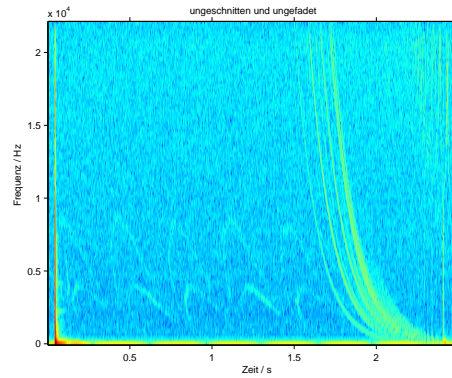


Abbildung 13:

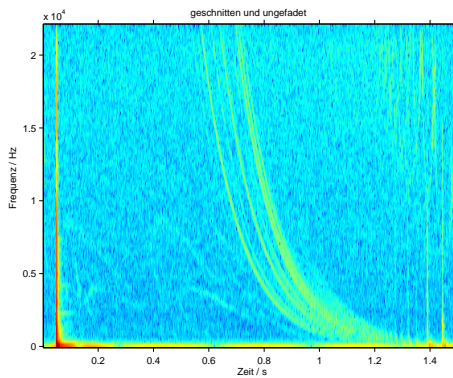


Abbildung 14:

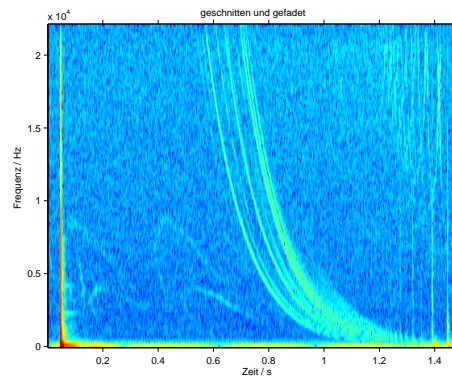


Abbildung 15:

3.3.2 Fenstern der Impulsantwort $\tilde{h}[n]$

Um einigermaßen gleiche Impulsantworten für alle Lautsprecher zu erhalten, werden die teilweise vorhandenen Störungen sowie sämtliche Nichtlinearitäten aus allen $\tilde{h}_i[n]$ weggeschnitten. Zu diesem Zweck verwenden wir jeweils am Anfang und am Ende ein halbes Hann-Fenster um saubere Übergänge zu erzeugen (Abbildung 16). Hier wurde darauf geachtet, dass das halbierte Hann-Fenster am Beginn den Impuls nicht verfälscht, sprich mit 1300 Samples kurz genug ist. Die Länge der resultierenden Impulsantwort $h[n]$ wurde durch die Wahl der nächst kleineren 2^n Samples bestimmt, bei welchen noch keine Störungen eingeschlossen werden.

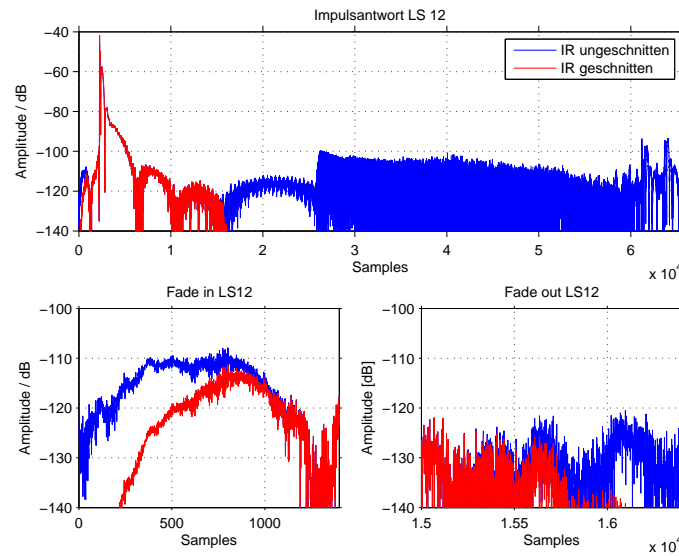


Abbildung 16: Fenstern der Impulsantwort im Zeitbereich

4 Messergebnisse

4.1 aktive Lautsprecher

4.1.1 aktive Übertragungsfunktionen

Bei den dargestellten Übertragungsfunktionen handelt es sich um Verhältnisse zwischen Ausgangsschnelle und Eingangsspannung im Frequenzbereich. Wie schon bei der Systemantwort $\tilde{y}[n]$ in Abschnitt 2.3, wurde auch hier auf den Effektivwert des voll aussteuernden Laservibrometers (= 500 m/s) normiert. Erwartungsgemäß sind die Transferfunktionen für die direkt gemessenen Lautsprecher einander sehr

4 Messergebnisse

ähnlich. Die Differenzen zwischen 600 Hz und 1 kHz könnten durch die unterschiedlichen Bündelungen der Lautsprecher bei $k \cdot r_M > 1$ entstehen. Für eine Membran mit dem Radius $r_M = 6$ cm und

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (6)$$

ergibt sich eine Frequenz von $f_B = 830$ Hz ab welcher Bündelungserscheinungen bei der Schallabstrahlung auftreten.

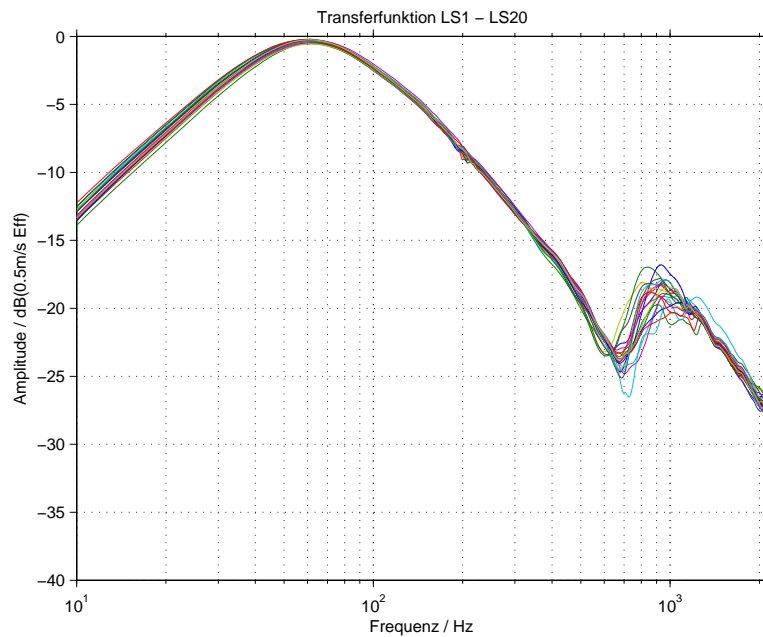


Abbildung 17: Übertragungsfunktion der jeweils direkt bespielten Lautsprecher

4.1.2 Spektrogramme

Die nichtlinearen Verzerrungen sind in den Abbildungen 18 bzw 19 als parallel zu den Impulsantworten verlaufende Linien sehr gut zu erkennen und stimmen auch gut mit den aus Gleichung (5) berechnenden Werten überein. Ausgehend von Abbildung 19 könnte man dann mit einem Fenster von einer Sekunde eine saubere Impulsantwort für das weitere Berechnen der Übertragungsfunktion erwarten.

Wie aber aus Abbildungen 21 ersichtlich, treten in manchen Impulsantworten auch andere Störungen wie Nebengeräusche und transiente Signalfehler des Laservibrometers (5.2) auf. Wie schon unter 3.3.2 beschrieben wurden dann nur die

4 Messergebnisse

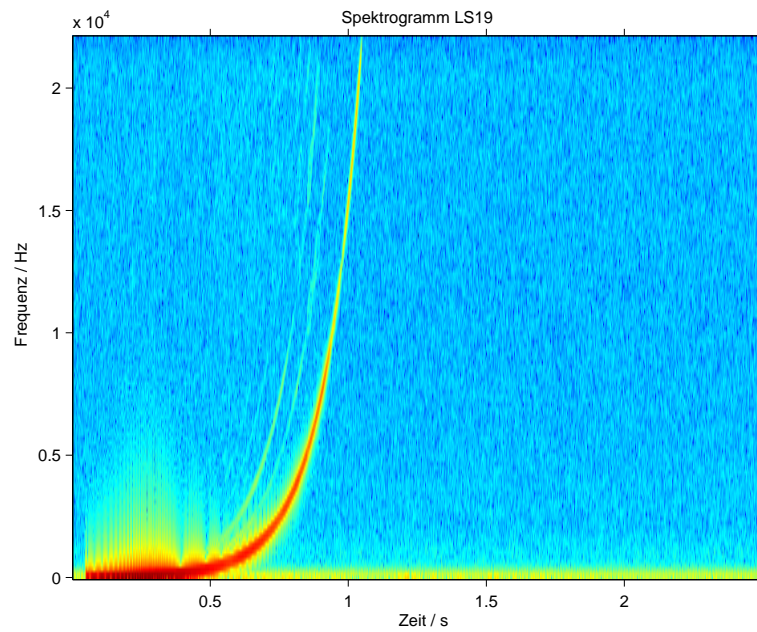


Abbildung 18: Spektrogramm von $\hat{y}[n]$ von Lautsprecher 19

ersten 2^{14} Samples, also 371,5 ms verwendet um ein möglichst sauberes Ergebnis zu erhalten.

4 Messergebnisse

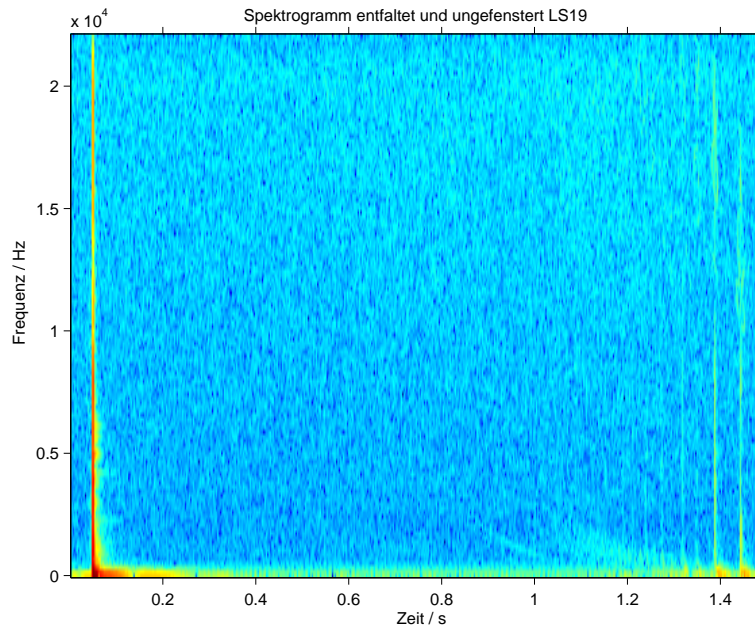


Abbildung 19: Spektrogramm von $\tilde{h}[n]$ von Lautsprecher 19

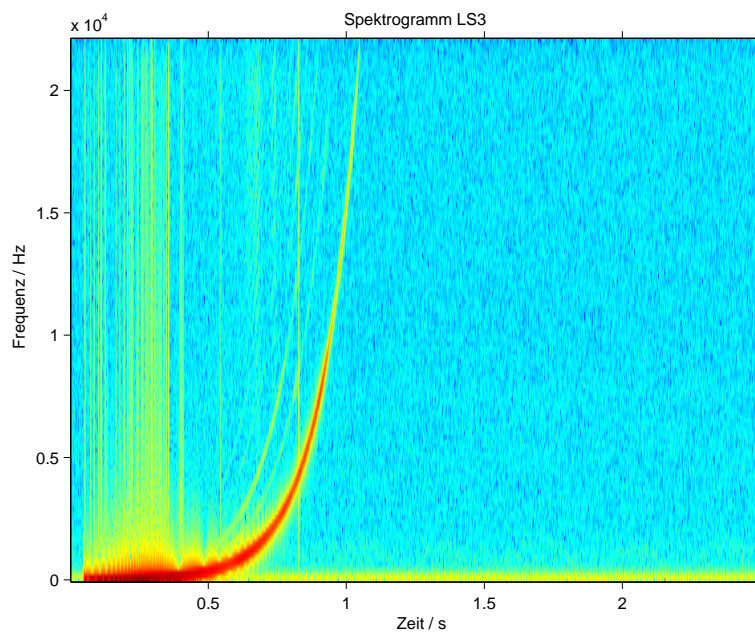


Abbildung 20: Spektrogramm von $\tilde{y}[n]$ von Lautsprecher 3

4 Messergebnisse

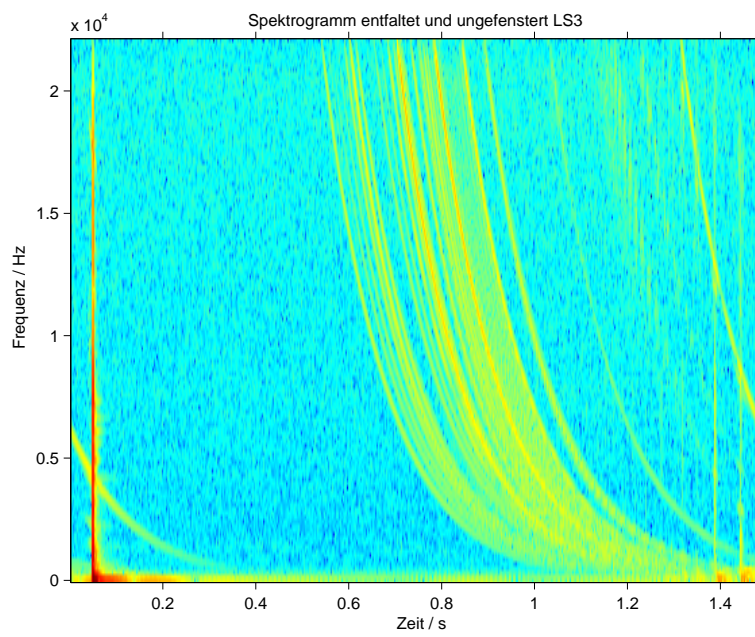


Abbildung 21: Spektrogramm von $\tilde{h}[n]$ von Lautsprecher 3

4.2 Passiv angeregte Lautsprecher (Übersprechen)

4.2.1 Symmetrien

Um die nachfolgenden Messergebnisse interpretieren und untereinander vergleichen zu können, wollen wir uns kurz mit der Symmetrie des Ikosaeder beschäftigen.

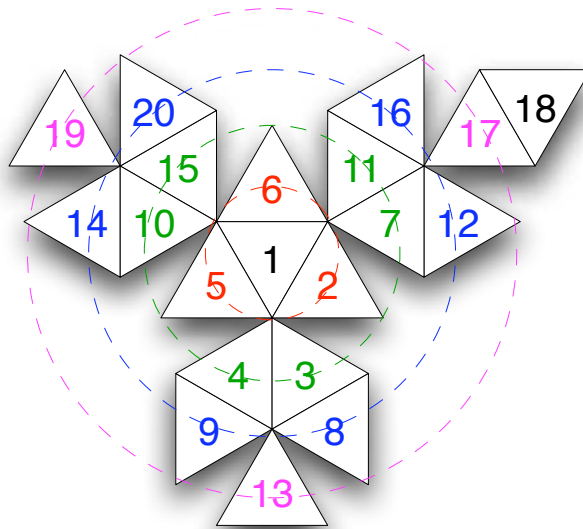


Abbildung 22: Ringförmige Anordnung der Klassen

Anhand der abgerollten Ikosaederoberfläche in Abbildung 22 ist leicht ersichtlich, dass sich die übersprechenden Lautsprecher 5 konzentrische Ringe, Klassen unterteilen lassen. Den Lautsprechern einer Klasse gemein ist sowohl der Abstand zum aktiv angeregten Lautsprecher, als auch der Differenzwinkel in der Elevation (Tabelle 1). Die erste Klasse (Ring 1, rot) besteht aus jenen 3 Lautsprechern, die mit dem aktiv Angeregten jeweils eine Seite gemeinsam haben. Im Fall von Lautsprecher 1 sind dies 2, 5 und 6. Die zweite Klasse (Ring 2, grün) beinhaltet jene 6 Lautsprecher, welche sich mit dem aktiv angeregten jeweils einen Eckpunkt teilen. In die dritte Klasse, hier blau dargestellt, fallen genau die 6 Lautsprecher die jenen der zweiten Klasse gegenüber liegen. Die vierte Klasse wiederum, besteht aus den Gegenüberliegenden der ersten Klasse und ist magenta markiert. Der dem Aktiven gegenüberliegende Lautsprecher 18 schließlich, bildet die fünfte und letzte Klasse.

Diese Symmetrien können nicht nur einem Vergleichen der Übertragungsfunktionen dienen, sondern könnten, wie von Raimani Duraiswami vorgeschlagen, auch zur effizienteren Berechnung der Filterkurven herangezogen werden [4].

4 Messergebnisse

Klasse	Winkel / °	Abstand / cm
1	41.81	18.55
2	70.53	30.02
3	109.47	42.46
4	138.19	48.58
5	180	52

Tabelle 1: Elevationsdifferenzen und Abstände zum aktiven Lautsprecher

4.2.2 Übertragungsfunktionen

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen, wurden sämtliche passiven Übertragungsfunktionen nach ihrer Klassenzugehörigkeit sortiert und in das entsprechende Diagramm eingezeichnet. Die tendenziell gleichen Verläufe sind gut zu erkennen und bestätigen die zuvor angestellten Überlegungen.

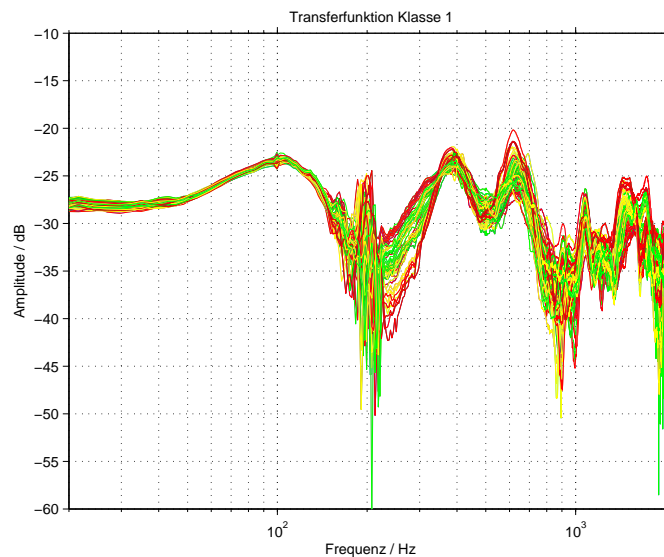


Abbildung 23: 20 * 3 passive Übertragungsfunktionen der Klasse 1

4 Messergebnisse

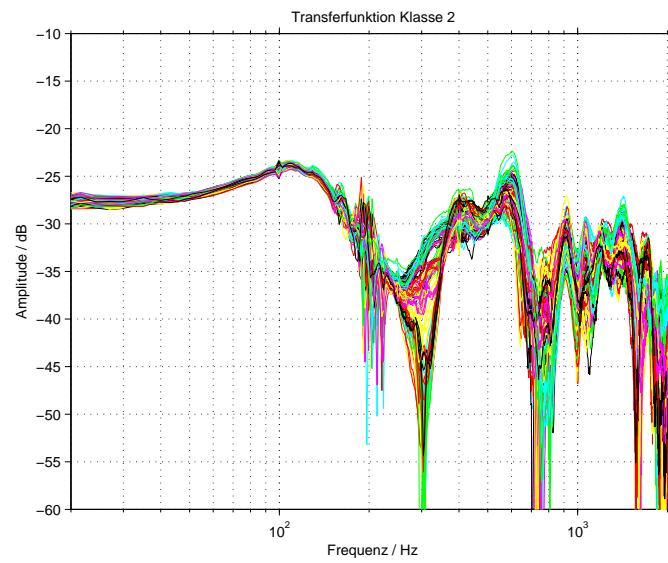


Abbildung 24: 20 * 6 passive Übertragungsfunktionen der Klasse 2

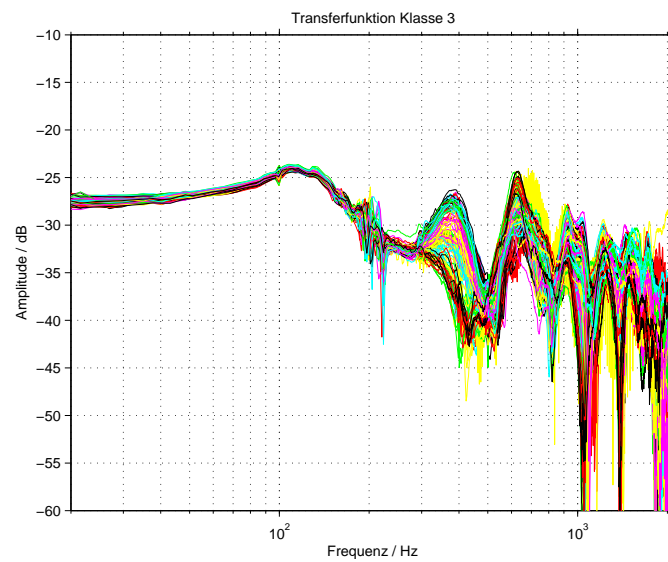


Abbildung 25: 20 * 6 passive Übertragungsfunktionen der Klasse 3

4 Messergebnisse

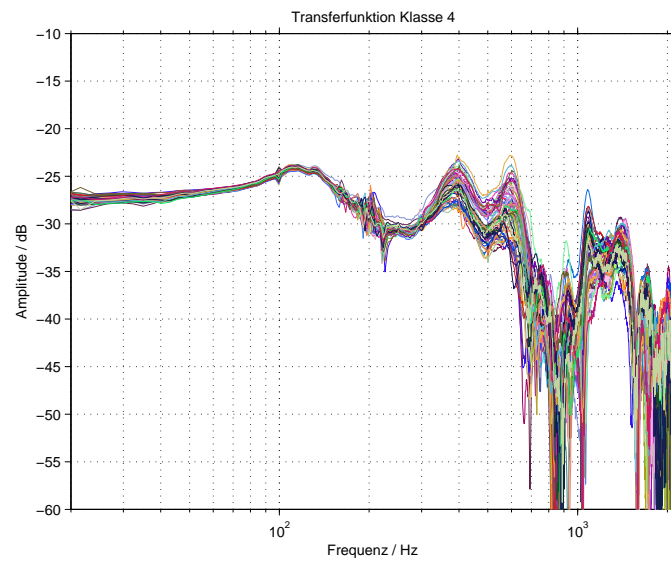


Abbildung 26: 20 * 3 passive Übertragungsfunktionen der Klasse 4

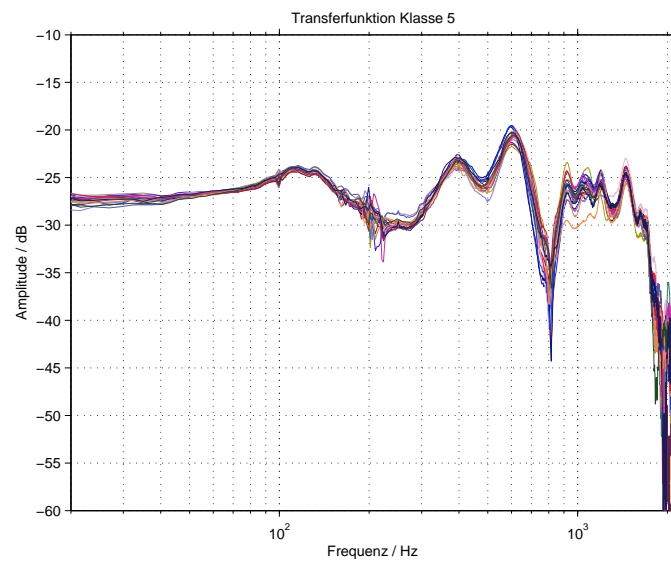


Abbildung 27: 20 * 1 passive Übertragungsfunktionen der Klasse 5

5 Diskussion

5.1 Übersprechen

Die anfängliche Vorstellung, dass bei einem Verhältnis von 1 *aktiver* zu 19 *passiven* Lautsprechern ein Übersprechen mit etwa $20 \cdot \log \frac{1}{19} = -25,6$ dB zu erwarten sein müsste, stellte sich im Großen und Ganzen als richtig heraus. Zumindest im unteren Frequenzbereich, in welchem im Inneren des Ikosaeders keine Wellenausbreitung stattfindet stimmen diese -26 dB sehr gut. Das bedeutet aber gleichzeitig auch, dass für eben jene tieferen Frequenzen keine Kompensation möglich sein wird!

5.2 Fehler durch das Laservibrometer

Anlass zur Vermutung, dass zumindest einige der transienten Störungen in den Impulsantworten $\tilde{y}[n]$ ihren Ursprung im Laservibrometer selbst haben könnten, geben unter anderem Spikes, wie jener in Abbildung 28. Wie in Kombination mit Abbildung 29 ersichtlich wird, lässt sich der Spike bei 9610 Samples eindeutig bei 217,9 ms identifizieren und da alle anderen Glieder der Messkette mehrfach durchgemessen worden sind, bleibt als Ursache nur das Laservibrometer übrig. Als weitere Indizien seien das unschöne Spektrum der Signale FULL und NULL in Abbildung 5 sowie aufgefallene Verzerrungen beim Einpegeln angeführt, wobei letztere sporadisch auftraten und nicht reproduzierbar waren.

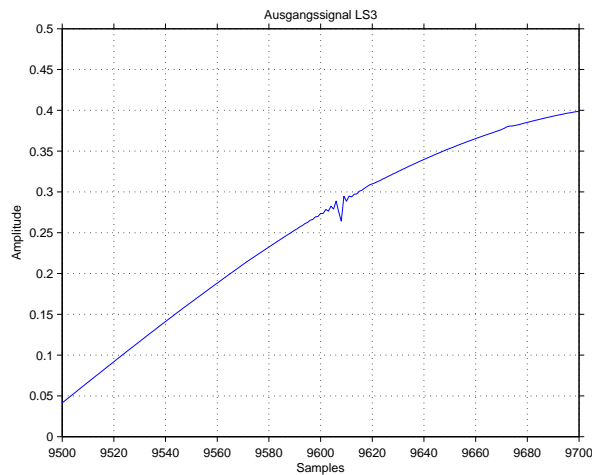


Abbildung 28: Spike im Ausgangssignal des Laservibrometers

6 Erkenntnisse und Ausblick

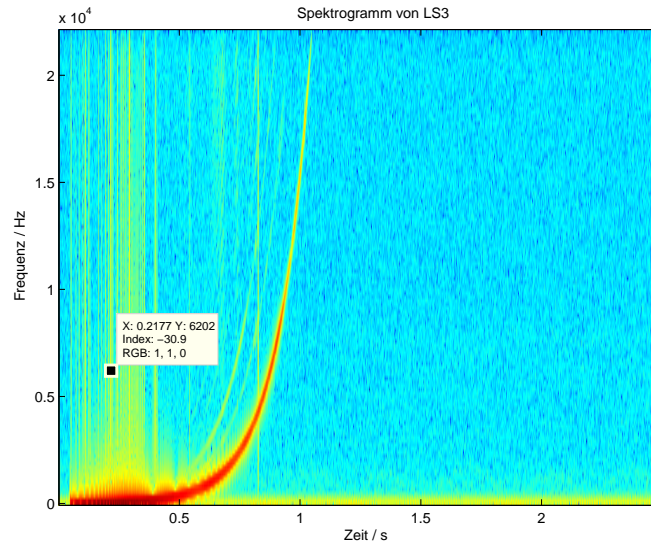


Abbildung 29: Auswirkung des Spikes im Spektrogramm

6 Erkenntnisse und Ausblick

Die durch unseren Messungen gewonnenen Ergebnisse sind durchaus plausibel. Auch wenn einige, auf Grund der Störungen des Laservibrometers unschöne Übertragungsfunktionen darunter sind, lassen sich durch Symetrieüberlegungen sowie Mittelung geeignete Übertragungsfunktionen finden, die dann in weiterer Folge als Basis für geeignete Kompensationsfilter herangezogen werden können. Auch wenn für tiefe Frequenzen keine Kompensation möglich sein wird, werden die Ergebnisse in jedem Fall eine sehr wichtige Grundlage für die Synthese von Abstrahlungsformen sein. Es wird erwartet, dass eine Verknüpfung der Messergebnisse mit einem analytischen Modell, siehe Zotter [5], spannende Ergebnisse bringen wird.

Literatur

- [1] *Portables Digital-Vibrometer PDV-100*, Polytec, 2002. [Online]. Available: http://www.polytec.com//ger/_files/LM_BR_PDV-100_2002_10_D.pdf
- [2] *Portables Digital-Vibrometer Handbuch PDV-100*, Polytec, 2002.
- [3] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” *108th AES Convention*, vol. 48, p. 350, Paris 18-22 February 2000, preprint 5093. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/388580.html
- [4] Z. Li, R. Duraiswami, and N. A. Gumerov, “Capture and recreation of higher-order 3d sound fields via reciprocity.” in *ICAD*, 2004. [Online]. Available: http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2004/papers/li_etal.pdf
- [5] F. Zotter and A. Sontacchi, “Modellierung eines Kugelförmigen Lautsprecher-systems als Multipolquelle,” *Tagungsbeitrag zur Jahrestagung DAGA 07, Deutsche Gesellschaft für Akustik*, 2007.
- [6] S. Müller and P. Massarani, “Transfer-function measurement with sweeps,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 443–471, June 2001. [Online]. Available: http://www.anselngoertz.de/Page10383/Monkey_Forest_dt/Manual_dt/Aes-swp.pdf
- [7] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, 3rd ed. Oldenburg, 1999.