

## Einfluss der Materialdämpfung auf den Klang verschiedener DML-Membranen

Analena Vater<sup>1</sup>, Benjamin Zenker<sup>2</sup>, Sebastian Merchel<sup>2</sup> und M. Ercan Altinsoy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, Deutschland, Email: analenavater@gmail.com

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, Deutschland

### Einleitung

Ein Trend geht derzeit dahin immer mehr Räume innerhalb eines Haushaltes mit Lautsprechern auszustatten. Diese sollen unauffällig in die Einrichtung integriert werden [1]. Eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Kolbenlautsprechern sind an dieser Stelle Distributed Mode Loudspeaker (DML). Sie erzeugen ein diffuses Schallfeld und können kaum sichtbar z.B. in Schranktüren oder Schubladenfronten integriert werden [2]. Dadurch nutzt der Lautsprecher bereits existierende Flächen und benötigt kaum zusätzlichen Stauraum. Jedoch werden insbesondere bei Möbeln neben den akustischen Ansprüchen auch praktische Anforderungen an die verwendeten Materialien gestellt. Diese sind vor allem der Preis, die möglichst einfache Verarbeitung, die Festigkeit gegenüber Stößen, die optische Varianz und für Küchen und Bäder des Weiteren die Wasserresistenz. Der Mineralwerkstoff, Avonite, erfüllt diese Anforderungen bei guten klanglichen Ergebnissen. Deshalb wird es bisher für DML-Membranen genutzt [3]. In der Möbelindustrie ist allerdings High Pressure Laminate (HPL) ein gängiges Material. Dieses ist im Gegensatz zu Avonite sehr günstig und besonders robust. Es ist demzufolge wünschenswert, eine DML-Membran aus HPL fertigen zu können mit mindestens gleicher akustischer Qualität.

Variationen der Dimensionen sowie der Eigenschaften des Materials bewirken starke klangliche Unterschiede. Die akustische Qualität ist allerdings nicht grenzenlos optimierbar. Das liegt zum einen an den Materialkonstanten. Zum anderen beeinflussen die inneren Strukturen, wie zum Beispiel Holzfasern, die Ausbreitung des Körperschalls in verschiedenen Richtungen. Deshalb wird in dieser Arbeit mit isotropen Materialien gearbeitet. Wo die Optimierungsgrenzen liegen und welchen Einfluss Materialeigenschaften auf den Klang haben, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

Zunächst werden die Kenngrößen für die Bewertung der akustischen Qualität von DML-Membranen festgelegt. Daraufaufgehend werden die Materialeigenschaften von Avonite und HPL gegenübergestellt. Es werden unterschiedlich gedämpfte Membranen angefertigt. In einem Hörtest werden diese in ihrer Qualität beurteilt und ihre Abhängigkeit von der Dämpfung untersucht.

### Membrananalyse

Zur Beurteilung der akustischen Qualität von DML-Membranen werden die untere Grenzfrequenz, die Koizidenzfrequenz und die modale Dichte berücksichtigt. Durch diese Größen ist ein Maß für das übertragbare

Frequenzspektrum und die Linearität bzw. Effektivität gegeben. Die Abhängigkeiten dieser Kenngrößen von den Materialeigenschaften sowie den Dimensionen einer Platte wurden von Kollmann, Leissa und Fahy ([4], [5], [6]) beschrieben und in den Gleichungen 1 bis 3 zusammengefasst. Die Größen sind einerseits abhängig von Materialeigenschaften, wie der Biegesteifigkeit  $B$  und der Flächendichte  $\rho_A$ . Diese sind in den Gleichungen 4 und 5 genauer beschrieben. Andererseits sind die Größen von der Fläche  $A$  der Membran und der Schallgeschwindigkeit  $c_L$  in der Luft abhängig. Aus Gleichung 1 lassen sich alle Eigenfrequenzen einer quadratischen Platte berechnen. Um die erste Mode und somit die untere Grenzfrequenz zu erhalten, muss für den Parameter  $m = 1$  gesetzt werden.

Untere Grenzfrequenz

$$f_u \Big|_{m=1} = \left(m + \frac{1}{3}\right)^2 \frac{\pi}{A} \sqrt{\frac{B}{\rho_A}} \quad (1)$$

Koizidenzfrequenz

$$f_c = \frac{c_L^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_A}{B}} \quad (2)$$

Modale Dichte

$$n = \frac{A}{4\pi} \sqrt[4]{\frac{\rho_A}{B}} \quad (3)$$

Es ist auffällig, dass alle akustischen Kenngrößen abhängig von dem Verhältnis aus Flächendichte  $\rho_A$  zu Biegesteifigkeit  $B$  sind. Dieses ergibt sich nach Möser [7] wie folgt.

$$\rho_A = \rho \cdot h \quad (4)$$

$$B = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{\rho_A}{B} = \frac{12\rho(1 - \nu^2)}{Eh^2} \quad (6)$$

Idealerweise wird eine Koizidenzfrequenz von 18kHz oder höher und eine untere Grenzfrequenz unter 30 Hz erreicht. Diese Werte sind angenähert an den Wahrnehmungsgrenzen des menschlichen Gehörs [8]. In diesem

Frequenzbereich sollte eine hohe Modendichte vorliegen. Dadurch überträgt die Membran den Schall möglichst linear und effizient. Um diese Kriterien zu erfüllen ist ein hohes Verhältnis  $\frac{\rho_A}{B}$  notwendig. Aus Gleichung 6 wird ersichtlich, dass ein dichtes, biegeweiches Material mit geringer Dicke und Poissonzahl für optimale akustische Eigenschaften notwendig ist. Das Elastizitätsmodul, die Dichte, die Querkontraktionszahl und die Dicke der Membran beeinflussen also maßgeblich den Klang der Membran. Bis auf die Dicke der Membran sind diese Parameter allerdings Materialkonstanten. Membranen können also lediglich durch Variation der Dicke und durch das Verhältnis  $\frac{\rho_A}{B}$  optimiert werden.

Die Gleichungen 1 bis 3 zeigen, dass durch Gleichsetzung des Verhältnisses  $\frac{\rho_A}{B}$  und Anpassung der Dicke zweier Materialien resultieren gleiche modale Eigenschaften. Dennoch klingen die zwei Membranen sehr unterschiedlich. Unter Berücksichtigung des zeitlichen Verhaltens wurde daraufhin die Dämpfung als starker Klingeinfluss vermutet.

### Vergleich von Avonite und HPL

Wie bereits erwähnt sind insbesondere Avonite und HPL aus verschiedenen Gründen für DML-Membranen geeignet. Ihre Materialeigenschaften wurden mittels Modalanalyse an frei schwingenden Platten gemessen. Durch Fitting mittels numerischer Validierung konnten die in Tabelle 1 gegenübergestellten Werte ermittelt werden. Ihre gemessenen Kennwerte unterscheiden sich stark voneinander.

		Avonite	HPL	Differenz
<b>E-Modul</b>	$E$	9,3 GPa	16,4 GPa	+76 %
<b>Dichte</b>	$\rho$	1595 $\frac{kg}{m^3}$	1480 $\frac{kg}{m^3}$	-7 %
<b>Poissonzahl</b>	$\nu$	0,32	0,3	-6 %
<b>Dämpfung</b>	$\bar{\alpha}$	2,6 %	1,6 %	-63 %
<b>Dicke</b>	$h$	3,05 mm	2,20 mm	-28 %
<b>Verhältnis</b>	$\frac{\rho_A}{B}$	0,199 $\frac{s^2}{m^4}$	0,204 $\frac{s^2}{m^4}$	-2 %

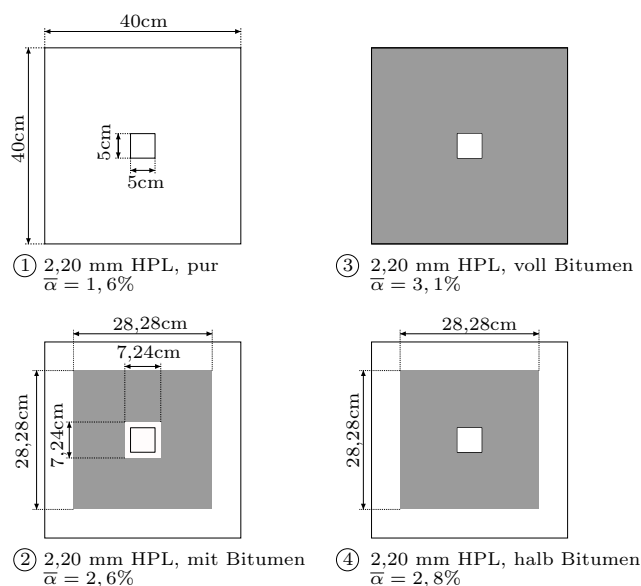
**Tabelle 1:** Materialeigenschaften von Avonite und HPL und die prozentuale Differenz von HPL gegenüber Avonite.

Die Avonite-Membran sollte wegen ihrer geringen Stoßfestigkeit nicht dünner als 3 mm sein. Infolge der höheren Steifigkeit von HPL mit 16,4 GPa und der geringeren Dichte mit 1480  $\frac{kg}{m^3}$  muss die HPL-Membran dünner sein. Dadurch wird das Verhältnis  $\frac{\rho_A}{B}$  der beiden Materialien aneinander angeglichen. Letztlich wurden eine 3,05 mm dicke Avonite- sowie eine 2,20 mm dicke HPL-Platte mit 40x40 cm Kantenlänge gefertigt. Diese beiden Platten besitzen aufgrund des ähnlichen Verhältnisses  $\frac{\rho_A}{B}$  auch ähnliche modale Eigenschaften, wie in Tabelle 2 nach den Gleichungen 1 bis 3 zusammengefasst ist.

Aus Tabelle 1 ist auch ersichtlich, dass die durchschnittliche Dämpfung  $\bar{\alpha}$  der beiden Materialien stark voneinander abweicht. Durch Anbringen von 1,2 mm dicke Bitumen-Streifen auf der HPL-Membran wurde die durchschnittliche Dämpfung auf  $\bar{\alpha} = 2,6 \%$  an die

	Avonite	HPL	Differenz
<b><math>f_u</math> in Hz</b>	78,3	77,4	-1 %
<b><math>n</math> je 100 Hz</b>	0,85	0,86	+1 %
<b><math>f_c</math> in kHz</b>	8,35	8,46	+1 %

**Tabelle 2:** Untere Grenzfrequenzen, modale Dichten und Koinzidenzfrequenzen für eine 40x40 cm große Avonite- und HPL-Membran.



**Abbildung 1:** Übersicht über die gefertigten optimierten DML-Membranen mit verschiedenen Dämpfungsfaktoren.

der Avonite-Membran angeglichen. Außerdem wurden zwei weitere HPL-Platten gefertigt, die auf der ganzen ( $\bar{\alpha} = 3,1 \%$ ) bzw. der halben Fläche ( $\bar{\alpha} = 2,8 \%$ ) mit Bitumen beklebt sind, wie Abbildung 1 zeigt.

Wie sich die optimierte Dämpfung auf die Klangqualität der Membrane auswirkt, wurde in einem Hörtest untersucht. Dazu wurden die Platten mit einem Rahmen allseitig fest eingespannt. Somit verringert sich die schwingfähige Fläche auf  $a = b = 0,35$  m. Außerdem besitzt der Rahmen eine Rückplatte. Damit wird der akustische Kurzschluss zwischen Vorder- und Rückseite der Platte verhindert.

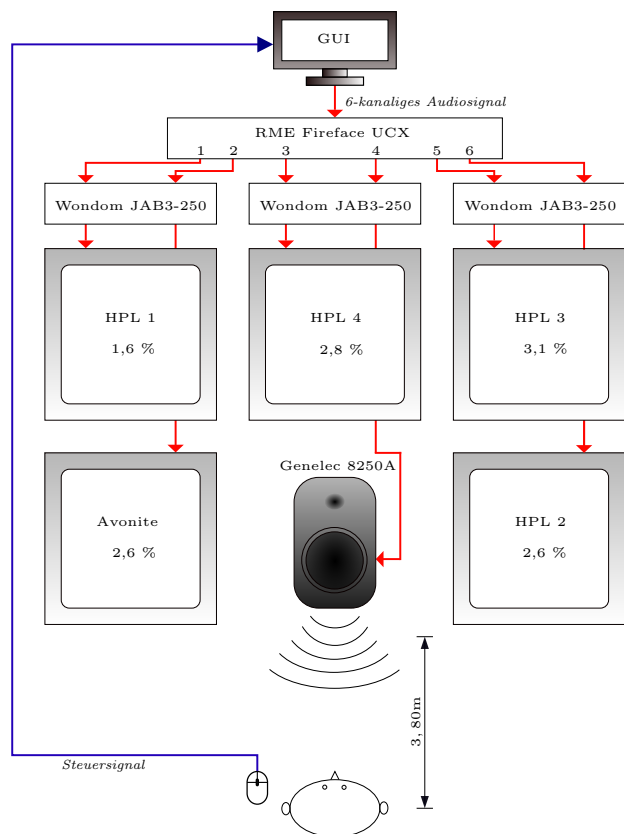
### Hörtest

#### Aufbau und Ablauf

Für den Hörversuch wurden die fünf DML-Membranen und ein konventioneller Studio-Lautsprecher als neutral klingende Referenz in knapp 4 m Entfernung zum Hörplatz aufgestellt, wie in Abbildung 2 dargestellt ist. Alle Lautsprecher wurden auf einen durchschnittlichen Schalldruckpegel von 80 dB unter Nutzung von digitalen Signalprozessoren (DSP) normiert. Dazu wurden die Impulsantworten im Testraum am Hörplatz gemessen. Diese wurden weiterhin genutzt, um mit dem sogenannten AutoEQ-Filter von *SigmaStudio 4.1* den Frequenz-

gang zu linearisieren. Damit keine zusätzlichen Verzerrungen durch diesen Vorgang entstehen, wurden Korrekturen von Dips auf  $+6$  dB begrenzt.

Die Platten besitzen wegen ihrer geringen Abmaße eine hohe untere Grenzfrequenz. Deshalb wurden die Lautsprecher mit einem Hochpassfilter mit  $f_c = 100$  Hz gefiltert. Die resultierenden Frequenzgänge aller bewerteten Lautsprecher sind in Abbildung 3 dargestellt.



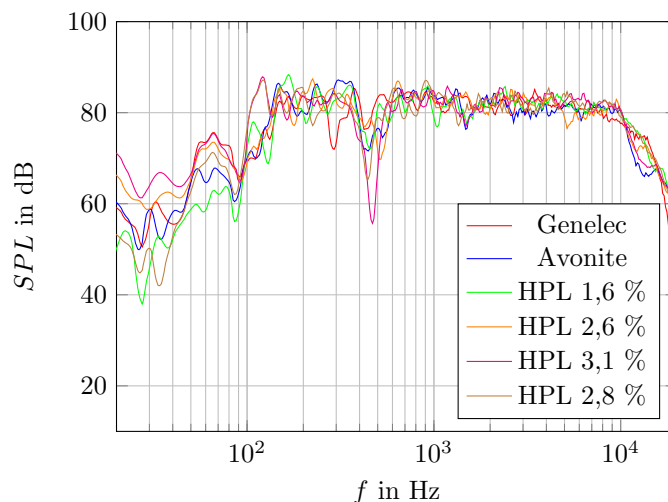
**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau des Hörversuchs mit sechs verschiedenen Lautsprechern.

Die Probanden konnten über eine grafische Oberfläche an einem PC die Lautsprecher auswählen und bewerten. Die Anordnung der Lautsprecher war für jede Person randomisiert. Die Probanden wurden nicht über deren Reihenfolge oder deren Eigenschaften informiert. Auch der Referenzlautsprecher war ihnen unbekannt. Allerdings wurde dieser immer als erster Lautsprecher angeboten. Durch einen abgedunkelten Hörraum abgedunkelt bewerteten sie den Klang ohne optische Beeinflussungen.

In dem Hörversuch sollten die Probanden den Gesamteindruck und die Ähnlichkeit des Klanges der fünf Platten beurteilen. Als Stimulus hörten die Probanden einen Ausschnitt aus einem Musikstück. Dazu standen die Lautsprecher im direkten Paarvergleich zur Referenz zur Beurteilung der Ähnlichkeit. Hierzu wurde die Referenz an die oberste Position „gleich“ gesetzt. Die zu vergleichende Membran sollte anschließend an entsprechende Stelle im Diagramm positioniert werden.

Bei der Bewertung des Gesamteindrucks wurden alle sechs Lautsprecher gleichzeitig im mehrfachen Paarvergleich beurteilt. Dem Referenzlautsprecher war hierbei

keine Position vorgegeben.



**Abbildung 3:** Linearisierte Frequenzgänge zwischen 20 Hz und 20 kHz am Hörplatz; normiert auf  $L_p = 80 \pm 0,1$  dB.

## Probanden

19 Probanden im Alter zwischen 22 und 41 Jahren nahmen an dem Hörversuch teil. Davon waren neun Teilnehmer weiblich und zehn Teilnehmer männlich. Alle wurden zu Beginn des Hörtest trainiert und bekamen Einweisungen zum Ablauf des Hörversuchs. Keiner der Probanden hatte Hörschäden.

## Ergebnisse und Diskussion

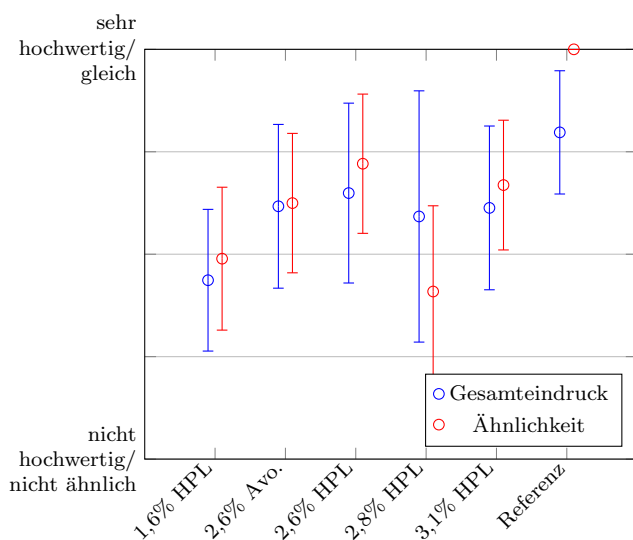
Um Aussagen zu signifikanten Unterschieden zwischen den Membranen treffen zu können, wurde eine einfaktorische Varianzanalyse der Ergebnisse durchgeführt. In Abbildung 4 ist der durchschnittlich bewertete Gesamteindruck der Lautsprecher bzw. deren Ähnlichkeit zum Referenzlautsprecher sowie jeweils deren Standardabweichung abgebildet.

Grundsätzlich sind signifikante Unterschiede in der Bewertung der verschiedenen optimierten Membranen und der Referenz für beide Kriterien sichtbar. Die ANOVA ergab, dass der Referenzlautsprecher signifikant besser als die Membranen bewertet wurde. Im Gegensatz dazu wurde die am geringsten gedämpfte HPL-Membran signifikant am schlechtesten für den Gesamteindruck gegenüber der Avonite-Membran und der Referenz bewertet.

Mit steigender Dämpfung der HPL-Membran verbessert sich zunächst der Gesamteindruck, wenn die HPL-Membranen mit 1,6 % und 2,6 % betrachtet werden. Bei weiterer Steigerung der Dämpfung bis zu 3,1 % ist allerdings keine signifikante Verbesserung des Gesamteindrucks gegenüber der 2,6 % gedämpfte HPL-Membran erkennbar.

Wie erwartet ist aber auch kein signifikanter Unterschied zwischen der gleichermaßen gedämpften Avonite- und HPL-Membran feststellbar. Auch in der Ähnlichkeit kann kein signifikanter Unterschied zwischen Avonite und der 2,6 % und der 3,1 % gedämpften HPL-Membran festgestellt werden.

Membranen mit ähnlichen modalen Eigenschaften sowie ähnlicher Dämpfung werden also auch akustisch ähnlich bewertet werden.



**Abbildung 4:** Durchschnittlich bewerteter Gesamteindruck und Ähnlichkeit verschiedener Membranen mit unterschiedlichen Dämpfungen gegenüber einem Referenzlautsprecher  $\pm$  der einfachen Standardabweichungen.

## Zusammenfassung

Aufgrund ihrer Integrierbarkeit in Einrichtungsgegenständen erfordern Biegewellenlautsprecher neue akustische Randbedingungen und schaffen zusätzliche praktische Anforderungen an die verwendeten Membranmaterialien.

Unter Berücksichtigung der Flächendichte, der Biegesteifigkeit und der Dämpfung eines Materials können DML-Membranen demzufolge akustisch optimiert werden. Für akustisch hochwertige Platten ist ein hohes Verhältnis  $\frac{\rho_A}{B}$  erforderlich. Dazu wird ein dünnes, biegeweiches Material mit entsprechender Dichte benötigt.

Anhand dieser Kriterien lässt sich eine Membran aus HPL fertigen, die nahezu gleiche akustische Eigenschaften wie eine Membran aus Avonite besitzt. Dabei ist diejenige aus HPL wesentlich dünner und aufgrund der niedrigeren Dichte auch leichter als ihr Pendant aus Avonite.

Allerdings sind die genannten Eigenschaften unzureichend zur Beurteilung der Klangqualität. Trotz ähnlichem Verhältnis  $\frac{\rho_A}{B}$  klingt reines HPL anders als die entsprechende Membran aus Avonite.

HPL besitzt einen wesentlich geringeren Dämpfungsfaktor von etwa 1,6%, wohingegen Avonite einen Dämpfungsfaktor von etwa 2,6% besitzt. Durch Anbringen von zusätzlichem Dämpfungsmaterial kann die Dämpfung der HPL-Membran erhöht bzw. an die Dämpfung der entsprechenden Avonite-Platte angepasst werden.

Der Hörtest bestätigte, dass verschiedene Materialien mit ähnlichem Verhältnis aus Flächendichte zu Biegesteifigkeit und ähnlicher frequenzabhängiger Dämpfung auch akustisch ähnlich bewertet werden und somit einander ersetzen können.

## Ausblick

Um ein Optimum zwischen Dämpfungsfaktor, Pegelgewinn und Klangqualität zu erreichen, ist ein weiterer Hörtest notwendig.

Weiterführend lassen sich Untersuchungen zu komplexeren Membrankonstruktionen durchführen. Hinzu kommt, dass die in dieser Arbeit bewerteten Platten klein und quadratisch waren. Das verhindert eine gute Verteilung der Moden auf der Platte und somit einen linearen Frequenzgang. Zum anderen kann der abspielbare Frequenzbereich mit größeren Abmessungen der Platte nach unten erweitert werden.

Es gibt demzufolge viele Aspekte, in denen eine DML-Membran bezüglich ihrer praktischen und akustischen Qualität optimiert werden kann. Mit den hier erarbeiteten Erkenntnissen über den Einfluss der Materialeigenschaften auf den Klang lässt sich bereits eine akustisch sowie praktisch hochwertige Membran fertigen. Weitere Maßnahmen zur Membranoptimierung bewirken wiederum Verbesserungen und minimieren den Unterschied zu herkömmlichen Systemen.

## Literatur

- [1] “Sonos Hits the Right Note With Customers” in Statista - The Statistics Portal, Zugriff am 27.03.2020: <https://www.statista.com/chart/14610/sonosunit-sales-and-household-penetration/>
- [2] Zenker: Rethinking Flat Panel Loudspeakers – an Objective Acoustic Comparison of Different Speaker Categories, Audio Engineering Society Convention 147, 2019
- [3] Areal Produktseite der Firma Hommbru, Zugriff am 27.03.2020: <https://hommbru.com/produkte/areal/>
- [4] Leissa, A. W.: Vibration of plates, 1. Aufl., 1969, [Washington D.C.]: National, Aeronautics and space administration - NASA SP-160, Seite 61
- [5] Fahy, Gardonio: Sound and structural vibration, 2. Aufl., 2007, [Oxford, Burlington]: Academic Press12 - ISBN 0-12-373633-1, Seite 67
- [6] Kollmann, Schösser, Angert: Praktische Maschinenakustik. 1. Aufl., 2006. [Berlin, Heidelberg]: Springer-Verlag - ISBN 3-540-20094-0, Seite 109
- [7] Möser, Kropp: Körperschall, 3. Aufl., 2010, [Berlin, Heidelberg, New York]: Springer-Verlag - ISBN 3-540-40336-4, Seite 107
- [8] ALD Homepage, Zugriff am 18.02.2020, URL: <http://www.ald-laerm.de/themen/laerm-und-seine-wirkungen/was-wir-hoeren/>