

Ein kritischer Vergleich von Messgrößen zur Beurteilung der Schallbelastung in Sinfonieorchestern anhand systematischer Literaturrecherche und Messungen

Bachelorthesis im Studienfach Bauingenieurwesen
Technische Universität München (TUM)
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Bauphysik
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Peter Sedlbauer

Korbinian Schwab

Betreuerin: Mai-Khanh Nguyen M. Sc., Lehrstuhl für Bauphysik, TUM

München, den 28. April 2020

Zusammenfassung

Die gesetzliche Verordnung zum Lärmschutz (LärmVibrationsArbSchV - Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen) gilt für alle Beschäftigten. Seit 2008 ist diese auch in der Musikbranche und somit im Sinfonieorchester anzuwenden. Die klassischen Lärmschutzmaßnahmen am Arbeitsplatz, wie Dämpfung der Quelle, sind weitestgehend nicht mit dem Orchesteralltag vereinbar. Da Schallschutzmaßnahmen eine geeignete Untersuchungsmethode voraussetzen, gibt die Verordnung pegelbasierte Verfahren und Grenzwerte vor. Um die große Relevanz der Schallcharakteristika und der individuellen Faktoren bei der Wahrnehmung zu berücksichtigen (Maschke & Fastl, 2018), ist eine geeignete Methode entscheidend. Aufgrund seit Jahren bestehender Kritik an der Qualität der vorgeschriebenen Messgrößen (Maschke & Jakob, 2018), diskutiert vorliegende Arbeit die Verwendung psychoakustischer Lautheitsmodelle. Derartige Modelle versuchen durch Approximation der gehörbezogenen Physiologie die Lautheit von Schallereignissen wahrnehmungsgetreuer abzubilden.

Vor diesem thematischen Hintergrund stellt sich die Forschungsfrage vorliegender Bachelorthesis: Eignet sich die psychoakustische Messgröße der Lautheit in Sinfonieorchestern mit dem Verfahren nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1 besser als der Schalldruckpegel in dB für die Bewertung der Schallbelastung sowie der Lautstärke bzw. der Lautheit in Sinfonieorchestern? Gleichzeitig ergibt sich die These, dass frühere Studien zur Untersuchung der Schallbelastung im Sinfonieorchester überwiegend die weitverbreiteten pegelbasierten Messgrößen verwendeten. Mithilfe theoretischer Betrachtungen und eigener Messungen in zwei sinfonischen Orchestern sowie in einer individuellen Unterrichtsstunde wird die Forschungsfrage beantwortet. Ferner wird zur Bearbeitung der These eine explorative Literaturrecherche verwendet, die auf die Messmethoden der orchestralen Schallbelastung limitiert ist.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden insgesamt 41 Publikationen nach Messdesign und verwendeten Verfahren untersucht. Die Auswertungsergebnisse zeigen, dass jede betrachtete Studie, die nach aktuellem technischen Stand vorging, pegelbasierte Messgrößen angibt. Keine dieser Studien nennt Daten, die mit psychoakustischen Methoden erhoben wurden. Die These ist somit eindeutig belegt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse von Fachartikeln präsentiert, die Evaluierungen zu pegelbasierten und psychoakustischen Verfahren durchführten. Aufgrund dieser Ergebnisse und der Diskussion der eigenen Messdaten kann die Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Mit Verweis auf eventuell besser geeignete Modelle, bildet das Lautheitsmodell nach E. Zwicker die Lautheit im Sinfonieorchester besser ab als pegelbasierte Messgrößen.

Eine Anpassung der gesetzlichen Verordnung ist und sollte nicht Ziel vorliegender Arbeit sein. Die vorgeschriebenen Grenzwerte sind zweifelsohne berechtigt, doch vermögen deren Messverfahren Musik nicht adäquat abzubilden. So wären Untersuchungen, die an gewonnene Ergebnisse anknüpfen, empfehlenswert. Ein unterstützender Einsatz psychoakustischer Lautheitsmodelle wäre demnach sinnvoll.

Abstract

The statutory regulation (german regulation: LärmVibrationsArbSchV - Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen) on noise protection applies to all employees. Since 2008 this has also been stipulated in the music industry and thus in the symphony orchestra. The common noise protection measures at the workplace, such as attenuation of the source, are largely incompatible with the orchestra's daily routine. Since sound insulation measures require an appropriate investigation method, the regulation specifies level-based procedures and limit values. In order to consider the great relevance of sound characteristics and individual factors in sound perception (Maschke & Fastl, 2018), an adequate method is important. Due to existing criticism of the prescribed measurands (Maschke & Jakob, 2018), this thesis discusses the use of psychoacoustic loudness models. Such models try to represent sound events more perceptually accurate by approximating the human auditory physiology.

This leads to the research question of the present bachelor's thesis: Is the psychoacoustic measurement of loudness in some using the method according to Zwicker or DIN 45631/A1 more appropriately than the sound pressure level in dB for the evaluation of sound exposure and loudness in symphony orchestras? This leads to the hypothesis that earlier studies mainly used level-based measurements to investigate sound exposure in symphony orchestras. The research question is answered with the help of theoretical considerations and own measurements in two orchestras as well as in an individual music lesson. Furthermore, an explorative literature research is used to verify the hypothesis, which is limited to the measurement methods of orchestral sound exposure.

For the literature search, a total of 41 publications were examined according to measurement design and methods. The evaluation results demonstrate that each study, which measured according to the current state of the art, gives level-based quantities. None of these studies mention data collected with psychoacoustic methods. The hypothesis is therefore clearly proven. In addition, the results of articles that evaluated level-based versus psychoacoustic procedures are presented. In combination with these results and the discussion of the own measurement data the research question can be answered positively. With reference to potentially more suitable models, the loudness model according to E. Zwicker represents the perceived volume in a symphony orchestra better than level-based measurements.

An adaptation of the statutory regulation is not the aim of the present work. The prescribed limit values are undoubtedly justified, even though their methods are not able to adequately reflect music. Subsequent investigations would be recommended. A supportive use of psychoacoustic loudness models might be conceivable.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Thematischer Hintergrund	1
1.2 Problemstellung, Forschungsfrage und These	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Anatomische und physiologische Grundlagen - Ohr und Hörbahn	4
2.1.1 Anatomie	4
2.1.2 Neuronale Prozesse	10
2.1.3 Gesundheitliche Folgen von Lärm	11
2.2 Akustische Grundlagen	13
2.2.1 Technische Akustik	13
2.2.2 Messtechnik	19
2.2.3 Psychoakustik	20
2.3 Diskussion der Grundlagen	37
3 Methodik	38
3.1 Methodik der Recherche	38
3.2 Methodik der Messung	42
4 Ergebnisse der Literaturrecherche	43
4.1 Literatur: Review-Paper	43
4.2 Literatur: Fachartikel	48
4.3 Zusammenfassung und Diskussion der Literaturrecherche	55
5 Anwendungsgrenzen, Kritik und Diskussion der verwendeten Verfahren	57
5.1 Schalldruckpegelbasierte Messgrößen	57
5.2 Verhältnislautheit sone und verwendetes Lautheitsmodell nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1	59
6 Messungen - Pegelbasierte Messgrößen und Lautheit nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1	63
6.1 Messtechnik	63
6.2 Aufbau und Ablauf	64
6.3 Ergebnisse	65
6.4 Diskussion der Ergebnisse	72

7 Zusammenfassung, Limitationen und Ausblick	77
7.1 Zusammenfassung	77
7.2 Limitationen	78
7.3 Ausblick	78
Literaturverzeichnis	80
Anhang	89
A Weitere Abbildungen	89
B Messergebnisse	94
C Dokumente	98

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Anatomie des Außen-, Mittel- und Innenohrs (Lindsay & Norman, 1977)	5
Abb. 2:	Querschnitt der Cochlea (Zenner, 2011, S. 322)	7
Abb. 3:	Darstellung des Corti-Organs (Zenner, 2011, S. 323)	8
Abb. 4:	Vereinfachte Darstellung der Wanderwelle entlang der Basilarmembran (Zenner, 2011, S. 327)	9
Abb. 5:	„Entrollte“ Cochlea mit eingezeichneter Basilarmembran (schwarz) und Erklärung des Ortsprinzips (Lindsay & Norman, 1977, S. 137)	10
Abb. 6:	Beispiele für alltägliche Schalldruckpegel; SPL - Sound Pressure Level bzw. Schalldruckpegel (Werner, 2018, S. 3)	15
Abb. 7:	Bewertungskurven (Feldmann, 2018, S. 3)	16
Abb. 8:	Schematische Darstellung der Zeitbewertung und Glättung (Feldmann, 2018, S. 4) . .	16
Abb. 9:	Vergleich der verschiedenen Zeitbewertungen (Feldmann, 2018, S. 4)	17
Abb. 10:	Hörfäche zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze. Schraffiert sind die Bereiche angegeben, die durch Musik und Sprache eingenommen werden. Punktiert (klein) ist die Grenze des schädigenden Risikos angegeben und (dick) punktiert (an der Hörschwelle) ist die Hörschwelle von Hörgeschädigten durch zu laute Musik angedeutet. (Zwicker & Fastl, 1999, S. 17)	21
Abb. 11:	Mithörschwelle reiner Testtöne verdeckt durch frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen (Zwicker & Fastl, 1999, S. 65)	22
Abb. 12:	Zeitliche Verdeckung (Ziemer, 2020, S. 78)	23
Abb. 13:	Frequenzgruppenbreiten mit Grenzfrequenzen und Mittenfrequenz f_m (Zwicker & Fastl, 1999, S. 159)	25
Abb. 14:	Kurven gleicher Lautstärkepegel für reiner Töne im Freifeld (binaural, frontale Beschallung) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2006); Sowohl die 10 phon als auch die 100 phon Kurve sind aufgrund fehlender Labordaten punktiert dargestellt. Dennoch zeigen Diagramme anderer Autoren diese (z. B. Abbildung A.6 aus Zwicker und Fastl (1999, S. 204))	26
Abb. 15:	Pegelzuwachs der für eine Verdopplung der Lautheit nötig ist (Zwicker & Fastl, 1999, S. 206)	27
Abb. 16:	Lautheitsfunktionen für 1 kHz Ton (durchgezogene Linie) und gleichmäßig angeregtes Rauschen (punktiert) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 207)	28
Abb. 17:	Struktur des Lautheitsmodells nach Moore (2013, S. 140)	28
Abb. 18:	Erregungsmuster eines frequenzgruppenbreiten Rauschens mit Mittenfrequenz 1 kHz (Zwicker & Fastl, 1999, S. 168)	29
Abb. 19:	Vereinfachte Darstellung des Lautheitsmodells nach Zwicker anhand eines Breitbandrauschens (gleichmäßig anregendes Rauschen) und eines frequenzgruppenbreiten Rauschens (1 kHz Mittenfrequenz) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 221)	30

Abb. 20:	Darstellung der Lautheitsprofile (spezifische Lautheit) für ein Rauschsignal (fett, durchgezogen) und einen Sinuston (70 dB, fett, punktiert); horizontale, gestrichelte Linie stellt die Gesamtlautheit dar (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)	32
Abb. 21:	Blockschaltbild zur Implementierung varianter Schallereignisse (strichpunktierte Komponenten kommen durch Zeitvarianz hinzu) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)	33
Abb. 22:	Grafische Darstellung der Schwebung und Rauigkeit (Roederer, 2000, S. 40)	34
Abb. 23:	Darstellung der subjektiven Dauer anhand eines musikalischen Beispiels (Maschke & Fastl, 2018)	35
Abb. 24:	„Sound Map“ für eines der beiden Orchester aus J. H. Schmidt et al. (2011) (6. Sinfonie von G. Mahler)	53
Abb. 25:	Vergleiche der Wochenexpositionspegel ($L_{EX,w,10/50/90}$) von Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2011) und den Daten der Studie von Toppila et al. (2011) ($L_{EX,w,F}$)	54
Abb. 26:	Zwei gänzlich verschiedene Schallereignisse zeigen den Verlust des Schallcharakters durch die Reduzierung auf den äquivalenten Dauerschallpegel (Lercher, 1998, S. 48)	59
Abb. 27:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Debussy: Prélude à l'après...)	67
Abb. 28:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Rachmaninoff: Rhapsodie über ein Thema...)	67
Abb. 29:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Bach: Toccata und Fuge d-moll)	69
Abb. 30:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Bach: Schafe können sicher weiden)	69
Abb. 31:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Etüden mittlerer Tonbereich)	71
Abb. 32:	Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Etüden tiefer Tonbereich)	71
Abb. 33:	Schalldruckpegel und Lautheits „Thermometer“ mit verschiedenen Schallereignissen (Fastl & Zwicker, 2007, S. 316)	76
Abb. A.1:	Beitrag von Kopf (1), Torsos und Hals (2), mittlerem Teil der Ohrmuschel (3), Ohrmuschelumrandung (4) und äußerem Gehörgang (5) zum Schalldruckgewinn durch das Außenohr (T). Schalleinfallrichtung 45° von vorne (Ruschkowski, 2013, S. 20)	89
Abb. A.2:	Mithörschwelle reiner Testtöne verdeckt durch weißes Rauschen (Zwicker & Fastl, 1999, S. 62)	89
Abb. A.3:	Pegel, die nötig sind einen 1 kHz Ton und Breitbandrauschen als gleich laut wahrzunehmen. Senkrechte und horizontale Boxplots stellen die Ergebnisse zweier verschiedener Versuche dar. Versuche mit Veränderung des Referenztons bei konstantem Breitbandrauschen (senkrecht) und mit Veränderung des Breitbandrauschens mit konstantem Referenzton (horizontal) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 208)	90

Abb. A.4: Erregungsmuster mehrerer Schmalbandrauschsignale mit einem Pegel von 60 dB (Zwicker & Fastl, 1999, S. 168)	90
Abb. A.5: Darstellung des Koordinatensystems im Hörbereich mit den Winkeln Azimut φ und Elevation δ , sowie der Distanz r (Maschke & Jakob, 2018)	91
Abb. A.6: Kurven gleicher Lautstärke (Zwicker & Fastl, 1999, S. 204)	91
Abb. A.7: Problematik des energieäquivalenten Dauerschallpegels und der Effekt, dass Ruhe durch Lärm ersetzt werden kann (Lercher, 1998, S. 69)	92
Abb. A.8: Verwendetes Messmikrofon der Firma Dr-Jordan-Design	93
Abb. B.1: Schalldruckpegelwert Terzbänder der Auswertung 1 - Symphonisches Ensemble München (4,43 min)	94
Abb. B.2: Z-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware	95
Abb. B.3: A-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware	95
Abb. B.4: C-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware	96
Abb. B.5: Lautheitsverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min)	96
Abb. B.6: Lautheitsverlauf der Auswertung 1 - individueller Probenunterricht (3 min)	97
Abb. B.7: Spezifische Lautheit einer einzelnen Trompete	97
Abb. C.1: Kalibrierschein der verwendeten Mikrofonkapsel	98

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Aspekte	40
Tab. 2	Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Ergebnisse	41
Tab. 3	Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Auswahl 1	41
Tab. 4	Auswertung der Review-Papers	47
Tab. 5	Auswertung der Publikationen	49
Tab. 6	Ergebnisse Sinfonietta - Auswertung 1 und 2	66
Tab. 7	Ergebnisse Symphonische Ensemble München - Auswertung 1 und 2	68
Tab. 8	Ergebnisse Probenunterricht - Auswertung 1 und 2	70
Tab. 9	Nachmessung der „Thermometer“-Werte aus Abbildung 33	75

1 Einleitung

1.1 Thematischer Hintergrund

Das Gehör gilt als das sensitivste Sinnesorgan des menschlichen Körpers (Zenner, 2011, S. 319). Als „Sensor“ ist das Innenohr zum einen in der Lage Bewegungen in der Größenordnung eines Wasserstoffatoms (ca. 10^{-10} m) zu detektieren (Zenner, 2011, S. 322). Zum anderen nimmt das gleiche Organ ohne sofortigen Schaden zu nehmen Einwirkungen mit einem Intensitätsunterschied von 1:1 000 000 000 000 auf (Moore, 2013, S. 133). Schall, als Auslöser dieser Bewegungen, ist einer der ständigen Reize in der Umgebung des Menschen und beeinflusst in verschiedensten Ausprägungen. Häufig wirkt Schall als Träger von Information in beispielsweise der Sprache oder anderen alltäglichen Geräuschen (Roederer, 2000, S. 16). Sicherlich ebenso häufig entsteht Schall als Nebenprodukt und wird nicht selten als störender Lärm wahrgenommen. Aber was lässt Schall zu Lärm werden? Dazu definiert DIN 1320 Lärm als unerwünschten Hörschall, „der zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a). Ähnlich beschreibt es die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV). Der Arbeitsring Lärm der DEGA¹ (o. D.) konkretisiert Lärm als ein subjektives Erlebnis, das vom Schalldruckpegel, aber unter anderem auch von der persönlichen Einstellung zur Schallquelle abhängt. Eine noch detailliertere Definition führt die World Health Organization (WHO) an. So besteht zwischen Schall und Lärm physikalisch kein Unterschied, denn die Wahrnehmung von Schall ist mit physiologischen Prozessen gekoppelt. Demnach ist es nicht möglich, Lärm nur unter der Betrachtung physikalischer Messgrößen zu beurteilen (WHO, 1999). Zusammengefasst wird Schall erst durch psychische Prozesse zu Lärm (Kalivoda & Steiner, 1998, S. 103).

Darüber hinaus agiert Schall nicht nur als Träger von Informationen oder wirkt störend als Lärm, sondern wird vermutlich in allen Kulturkreisen absichtlich in Form von Musik erzeugt. Da allerdings auch Musik, selbst klassische Musik, fähig ist große Schalldruckpegel zu erzeugen (u. a. J. H. Schmidt et al. (2011)), ist es nicht verwunderlich, dass gerade professionelle Musikerinnen und Musiker von „Lärm“ am Arbeitsplatz betroffen sind. Doch nicht nur die otologische² Belastung, sondern auch gegenseitiges und eigenes Hören sind wichtige Bestandteile der Musik, die durch hoch Schalldruckpegel beeinträchtigt werden (Fuchs, 2017, S. 277). Unbestritten ist das gesunde Gehör von essentieller Bedeutung für Musiker/-innen und nicht selten leiden diese an Folgen teilweise hoher Schalldruckpegeln (Brusis, 2011). Seit Februar 2008 gilt die LärmVibrationsArbSchV zum Schutz vor Lärm auch für Beschäftigte der Musikbranche. Die klassischen Lärmschutzmaßnahmen, wie Verhinderung der Ausbreitung, Dämpfung und Abkapselung der Quelle sind im Orchesteralltag nicht mit der musikalischen Schaffenskraft vereinbar. Dies merken auch die technischen Regeln des Arbeitsschutzes (TLRV) an und klammern die Musik- und Unterhaltungsbranche aus den klassischen Lärmschutzmaßnahmen aus (Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2017, S. 11). Dadurch rücken persönlicher Gehörschutz, raumakustische Anpassungen und organisatorische Veränderungen, wie Sitzordnung oder

¹DEGA - Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

²Otologie - Ohrenheilkunde

Repertoire in den Vordergrund (Brockt, 2010). Trotz moderner, individueller Otoplastiken ist die Akzeptanz im Orchester niedrig (Huttunen et al., 2011). Studien zufolge empfinden 26% der befragten professionellen Musiker/-innen ihren Alltag als sehr laut, dennoch greifen nur 9% auf Gehörschutz zurück (H. Laitinen, 2005). Darüber hinaus können aber auch Aufklärungskampagnen über Schallschutz die Musiker/-innen sensibilisieren und einen positiven Beitrag leisten. So berichtet Frank Bloedhorn, Trompeter an der Bayerischen Staatsoper in München, von regelmäßigen informierenden Gesprächsrunden. Experten referieren in diesem Rahmen über Schallschutz, persönlich anpassbaren Gehörschutz sowie über Raumakustik speziell im Operngraben. Ferner führt Bloedhorn an, dass derartige sich wiederholende Veranstaltungen für Orchestermitglieder in der Regel selten sind. (F. Bloedhorn, persönliche Kommunikation, 13.03.2020)

Da Schallschutzmaßnahmen im sinfonischen Orchester, wie in allen Fragen des Lärmschutzes, eine adäquate Beurteilung und messtechnische Untersuchungen voraussetzen, gibt die LärmVibrationsArbSchV Grenzwerte und Messverfahren vor. Die Verordnung bewertet eine Lärmexposition anhand des Tages-Lärmexpositionspegels ($L_{EX,8h}$) und unter Umständen anhand des Wochen-Lärmexpositionspegels. Kurzzeitige Pegelspitzen sind durch Peak-Messungen mit C-Bewertung zu erfassen ($L_{C,peak}$). Untere und obere Auslösewerte kategorisieren das weitere Vorgehen des Arbeitgebers. Mit $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB}(A)$ und $L_{C,peak} = 137 \text{ dB}(C)$ sind die oberen Auslösewerte festgelegt. Die unteren Auslösewerte sind mit $L_{EX,8h} = 80 \text{ dB}(A)$ und $L_{C,peak} = 135 \text{ dB}(C)$ verordnet. (LärmVibrationsArbSchV, Bundesregierung (2007))

1.2 Problemstellung, Forschungsfrage und These

Mit Blick auf die gesetzliche Verordnung stellt sich die Frage, ob laute Musik im Sinfonieorchester auf gleiche Weise beurteilbar ist wie beispielsweise der Industrielärm einer Fertigungsstraße. Gerade bei der Betrachtung langfristiger Belastung und chronischer Folgen, spielen individuelle Faktoren und Charakteristika der Schallquelle eine große Rolle (Maschke & Fastl, 2018). Seit einiger Zeit besteht Kritik an den weitverbreiteten Messverfahren (Maschke & Jakob, 2018), wie sie auch in der LärmVibrationsArbSchV festgelegt sind. Somit gilt es kritisch zu hinterfragen, ob die verordneten Messverfahren die wahrgenommene Lautstärke von Musik und Schall grundsätzlich darzustellen vermögen. Thematisch knüpft hier die Psychoakustik als ein Teilgebiet der Psychophysik an. Die Psychoakustik verbindet die akustischen Aspekte mit der physiologischen³ Verarbeitung von Schallereignissen. Modelle und Methoden jener Wissenschaft versuchen die Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung von einer subjektiven und individuellen Ebene auf objektiv, messtechnisch erfassbare Werte zu übertragen. (Kallivoda & Steiner, 1998, S. IV) Die wahrgenommene Lautstärke (Lautheit) wird in der Psychoakustik unter anderem mithilfe von Lautheitsmodellen bestimmt. Derartige Modelle versuchen die komplexe auditive Verarbeitung von Schall zu beschreiben.

Vor diesem thematischen Hintergrund stellt sich die Forschungsfrage vorliegender Bachelorthese. Eignet sich die psychoakustische Messgröße der Lautheit in Sine mit dem Verfahren nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1 besser als der Schalldruckpegel in dB für die Bewertung der Schallbelastung sowie der Lautstärke bzw. der Lautheit in Sinfonieorchestern? In Zusammenhang mit dieser Forschungsfrage

³Physiologie - die Lehre der Funktionsweise des gesunden Organismus

ergibt sich die These, dass frühere Studien zur Untersuchung der Schallbelastung im Sinfonieorchester überwiegend die weitverbreiteten pegelbasierten Messgrößen verwendeten und nicht auf psychoakustische Verfahren zurückgriffen. Anhand einer explorativen Literaturrecherche wird diese These bearbeitet, während die Forschungsfrage mithilfe theoretischer Überlegungen und eigener Messungen im Orchester beantwortet wird.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, differenzierte Aspekte und ein umfassendes Verständnis über die verwendeten Messverfahren in Kombination mit klassischer Musik aufzuzeigen. Darüber hinaus wird erörtert, ob die psychoakustische Lautheit die Komplexität von Musik als „Lärm“ besser einzuschätzen vermag und ein Umdenken bei der Lärmbeurteilung im Orchestergraben, auf der Bühne oder in Probensituationen nötig wäre. Untersucht wird daher die Schallbelastung in zwei sinfonischen Orchestern und einer individuellen Unterrichtseinheit sowohl mit den weit verbreiteten Methoden pegelbasierter Messgrößen, als auch mithilfe des Lautheitsmodells nach Eberhard Zwicker bzw. DIN 45631.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um einen Überblick über die Psychoakustik und vor allem die Lautheit zu geben, stellt vorliegende Bachelorthesis zuerst die Grundlagen der angrenzenden Themengebiete vor. Als Basis der Psychoakustik werden die Anatomie und die Physiologie des menschlichen Gehörs erörtert. Die anschließenden Folgen erhöhter Schallbelastung verdeutlichen die Motivation vorliegender Arbeit. Anschließend werden die akustischen Grundlagen dargestellt. Neben Aspekten der technischen Akustik und der Messtechnik werden die Psychoakustik und besonders die Lautheit beleuchtet. Ferner ist das Ziel der Grundlagen zu diskutieren, ob das verwendete Lautheitsmodell prinzipiell zur Messung im Orchester geeignet ist. An das Kapitel der Grundlagen anknüpfend, werden die Methoden zur Bearbeitung der Forschungsfrage und der These vorgestellt. Die Beantwortung der These folgt im Kapitel Ergebnisse der Literaturrecherche. Es wird untersucht wie frühere Publikationen die Schallbelastung im Orchester maßen und welche Studiendesigns verwendet wurden. Kritik und Diskussion an den gesetzlich vorgegebenen und meist verwendeten Messgröße sowie an dem verwendeten Lautheitsmodell folgen auf die Ergebnisse der Literaturrecherche. Danach werden die durchgeführten Messungen mit Technik, Aufbau, Ablauf, den Ergebnissen und einer Diskussion präsentiert. Die Schlussbemerkung bilden die Zusammenfassung der vorliegenden Bachelorthesis, die eingegangenen Limitationen und einen Ausblick für weiterführende Untersuchungen.

2 Grundlagen

Die Psychoakustik baut auf einer Vielzahl von Fachbereichen auf. Die Grundlagen dieser werden im folgenden Kapitel erläutert. Zunächst werden die anatomischen, physiologischen und neuronalen Eigenschaften der menschlichen Geräuschverarbeitung beschrieben. Daraufhin werden die gesundheitlichen Beeinträchtigungen als die möglichen Konsequenzen zu hoher Schallbelastung beleuchtet. Schließlich wird auf die Aspekte der technischen Akustik, der Schallmesstechnik und der Psychoakustik eingegangen. Ziel der Theorie-Betrachtung ist es, zu diskutieren, ob die psychoakustischen Methoden prinzipiell geeignet sind die Schallbelastung im Sinfonieorchester zu beurteilen.

2.1 Anatomische und physiologische Grundlagen - Ohr und Hörbahn

Da die Methoden der Psychoakustik auf der Verarbeitungsweise des menschlichen Gehörs beruhen, wird mit der Anatomie und der Physiologie des Hörsinns begonnen.

2.1.1 Anatomie

Schall erreicht in Form von Druckwellen über die Ohrmuschel und den Gehörgang das Trommelfell. Dieses wird durch die vom Schall erzeugten Luftdruckschwankungen in Schwingungen versetzt. Eine Übertragungskette aus kleinen Knöchelchen, den Gehörknöchelchen, transformiert diese Schwingungen in mechanische Bewegungen und gibt diese an das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr weiter. Physiologische Effekte setzen diese Bewegungen in körpereigene bioelektrische bzw. biochemische Signale um. Der entstandene Reiz wird durch den Hörnerv zur Verarbeitung ans Gehirn geleitet. (Ruschkowski, 2013)

Außenohr

Das Außenohr (s. Abbildung 1, S. 5) setzt sich aus Ohrmuschel und Gehörgang zusammen. Die Ohrmuschel bündelt die eintreffenden Schallwellen (Ruschkowski, 2013) und modifiziert diese, besonders bei hohen Frequenzen, was zur Lokalisierung der Schallquelle beiträgt (Moore, 2013, S. 23). Die mittlere Ohrmuschel zeigt eine ausgeprägte Resonanz bei 2 bis 5 kHz. Der anschließende Gehörgang hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Einerseits schützt dieser das Trommelfell und das Mittelohr, andererseits verkürzt er den Abstand des Innenohrs zum Gehirn und gewährleistet somit eine schnelle Informationsübertragung durch einen kurzen Hörnerv (Fastl & Zwicker, 2007, S. 23). Bedingt durch die Länge des Gehörgangs von circa 2,3 cm und seiner spezifische Anatomie, verändert auch dieser den Frequenzgang des Schallereignisses (Ruschkowski, 2013). Da der Gehörgang zu einer Seite offen und zur anderen durch das Trommelfell verschlossen ist, entstehen Resonanzen und Verstärkungen. Diese treten bei Frequenzen auf, deren Viertel der Wellenlänge der Länge des Gehörgangs entspricht. Diese Resonanzen führen unter anderem zur charakteristischen, maximalen Sensitivität bei circa 4 kHz

(s. Kapitel 2.2.3 Psychoakustik Lautstärkenwahrnehmung). Neben Ohrmuschel und Gehörgang beeinflussen aber auch die Schultern und der Kopf den wahrgenommenen Schall durch Reflexionen und Abschattungen besonders unterhalb von 1500 Hz. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 23 ff.) Zusammengefasst zeigt die Abbildung A.1 im Anhang die Einflüsse der menschlichen Anatomie auf die Frequenzverteilung des wahrgenommenen Schalls. Schließlich nimmt neben der individuellen Anatomie auch der Einfallswinkel des Schalls Einfluss und führt zu einer von Person und Winkel abhängigen individuellen Wahrnehmung.

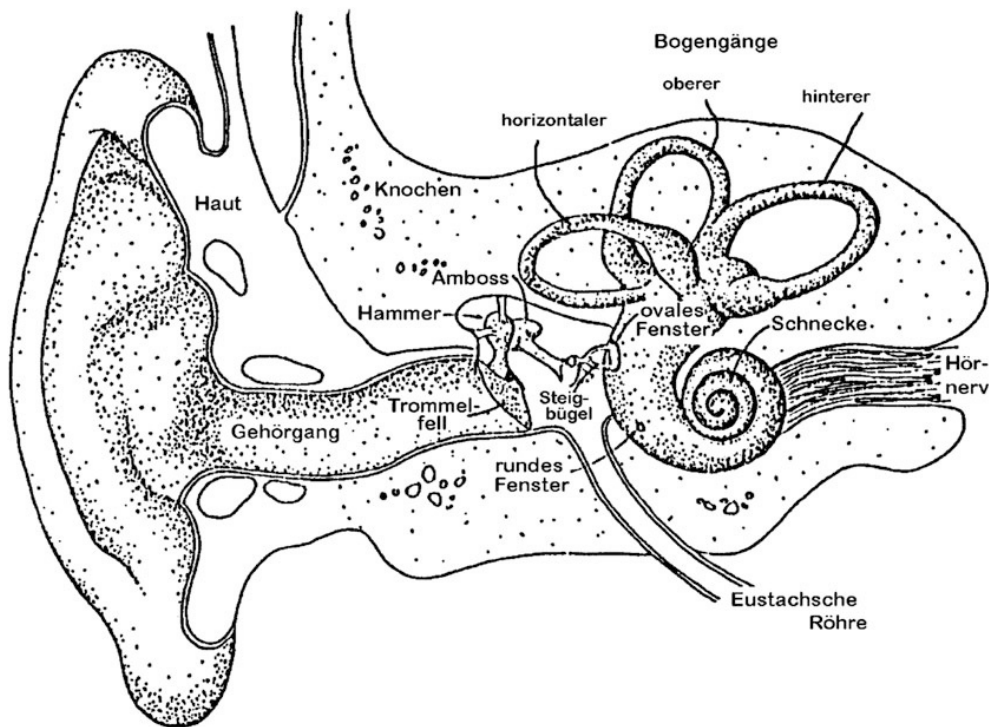


Abb. 1: Anatomie des Außen-, Mittel- und Innenohrs (Lindsay & Norman, 1977)

Mittelohr

Das Trommelfell bildet den Übergang zwischen Außenohr und Mittelohr und arbeitet als druckempfindlicher Schallempfänger. Das Mittelohr selbst besteht neben dem Trommelfell aus den drei Gehörknöchelchen, Hammer, Amboss und Steigbügel, die sich in der sogenannten Paukenhöhle befinden. Diese ist mit Luft gefüllt und steht im Druckgleichgewicht mit dem atmosphärischen Außendruck. Dies ist nötig um die ungehinderte Vibration des Trommelfells zu gewährleisten und wird durch die eustachische Röhre als durchgängige Verbindung zwischen Rachenraum und Mittelohr mittels Druckausgleich (z.B. beim Schlucken) aufrecht erhalten. (Ruschkowski, 2013) Da für den Hörprozess eine Wandlung von Luftschall (Außenohr) in Flüssigkeitsschall (Innenohr) nötig ist, fungiert die Kette aus Trommelfell und Gehörknöchelchen als Wandler. Dabei müssen Luftbewegungen mit großer Amplitude und kleiner Kraft in Flüssigkeitsbewegungen mit kleiner Amplitude und großer Kraft transformiert werden. Die Knöchelchen stehen so im Verhältnis, dass die Schallenergie beim Übergang zwischen den beiden Fluiden Luft und Wasser keine großen Energieverluste durch Reflexionen erleidet. Die Hebelwirkung der Knöchelchen bewirkt durch ihre Anordnung etwa eine Verstärkung des Faktors 2. Der Hammer

ist, wie in Abbildung 1 zu erkennen, mit dem Trommelfell verwachsen und leitet die Bewegungen über den Amboss und schließlich den Steigbügel zum sogenannten ovalen Fenster, das den Eingang des Innenohrs markiert. Das Flächenverhältnis des Trommelfells zur Fläche des ovalen Fensters trägt mit einem Faktor von circa 15 weitaus effektiver zur Verstärkung der Kraft bei als die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen alleine. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 25) Diese Impedanzanpassung aus Hebelwirkung und Flächenverhältnis zwischen Luft und Flüssigkeit ist in einem Frequenzbereich von 500 - 5000 Hz am wirkungsvollsten (Moore, 2013, S. 24) und führt bei circa 1 kHz zu einem Maximum an Druckgewinn (Fastl & Zwicker, 2007, S. 25). Die Aktivität feiner, an die Knöchelchen angewachsener Muskeln wird durch neuronale Prozesse efferent¹ gesteuert und führt zu einer Dämpfung der Bewegungen (Terhardt, 1998, S. 56). Dieser, als akustischer Reflex bekannte Mechanismus (Müller & Möser, 2018), stellt einen nur eingeschränkten Schutz gegen zu laute Schalle dar. Mit einer zeitlichen Verzögerung von circa 100 ms setzt dieser Reflex zu langsam ein, um bei Schallimpulsen schützend zu wirken (Terhardt, 1998, S. 56). Auch wirkt der Reflex nur reduzierend bei Frequenzen, die kleiner als 1500 Hz sind, obwohl höhere Frequenzen diesen auslösen können. Weitere Aufgaben und detaillierte Informationen finden sich unter anderem in Moore (2013, S. 24).

Innenohr

Das Innenohr setzt sich aus dem Gleichgewichtsorgan, dem sogenannten Vestibularorgan oder vestibulären Labyrinth mit den sogenannten Bogengängen, und dem eigentlichen Hörsinnesorgan, der Cochlea, zusammen. In der Cochlea, auch Hörschnecke, befinden sich die Sinneszellen, die sogenannten Haarzellen, eingebettet in das Corti-Organ bzw. Cortische Organ. (Ruschkowski, 2013; Zenner, 2011) Die in 2,5 Windungen aufgerollte Hörschnecke besteht aus hartem Knochen und unterteilt sich, wie in Abbildung 2 (S. 7) zu erkennen, in vier röhrenförmige Bereiche. Drei dieser Bereiche sind mit nahezu inkompressibler Lympflüssigkeit gefüllten und werden Skalen genannt, während den vierten Bereich das Corti-Organ einnimmt. Getrennt sind Scala vestibuli und Scala tympani durch die Basilarmembran. Die Reissner-Membran und das Corti-Organ umschließen die Scala media. Das Corti-Organ wird wiederum durch die Basilarmembran von der Scala tympani getrennt. In der Schneckenspitze gewährleistet eine Lücke (Helicotrema) in der Basilarmembran eine Verbindung zwischen den beiden Skalen Scala vestibuli und Scala tympani. An der Basis der Scala vestibuli sitzen das ovale Fenster, an dem der Steigbügel des Mittelohrs verwachsen ist, und an der Basis der Scala tympani das runde Fenster. Dabei wirkt das runde Fenster druckausgleichend gegenüber den Bewegungen, die der Steigbügel und das ovale Fenster erzeugen. Zwischen den beiden bereits erwähnten Skalen liegt die weitaus kleinere Scala Media. Neben ihrer Dimension unterscheidet sich die Scala media von den beiden zuerst erwähnten Skalen auch hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung der Flüssigkeit. So wirkt das durch die verschiedenen Flüssigkeiten entstehende chemische Potentialgefälle als Kapazitäten für die in den Haarzellen stattfindenden bioelektrischen bzw. biochemischen Vorgänge. Wie in Abbildung 3 (S. 8) aufgezeigt, unterteilen sich die Haarzellen, an deren Spitzen sich jeweils etwa 100 haarähnliche, submikroskopische Erweiterungen (Stereozilien) befinden, in drei Reihen äußere Haarzellen und eine Reihe innere Haarzellen. Über den Haarzellen befindet sich die Tektorialmembran,

¹efferent - Nervenfasern die vom Gehirn weg führen; afferent - Nervenfasern die zum Gehirn führen (s. 2.1.2 Neuronale Prozesse)

die von den längsten Stereozilien berührt wird und die Rezeptorzellen in einen schmalen Spalt hüllt. Von den Haarzellen führen schließlich Nervenfasern weg, die sich außerhalb des Corti-Organ zum Hörnerv bündeln. (Zenner, 2011, S. 321–323)

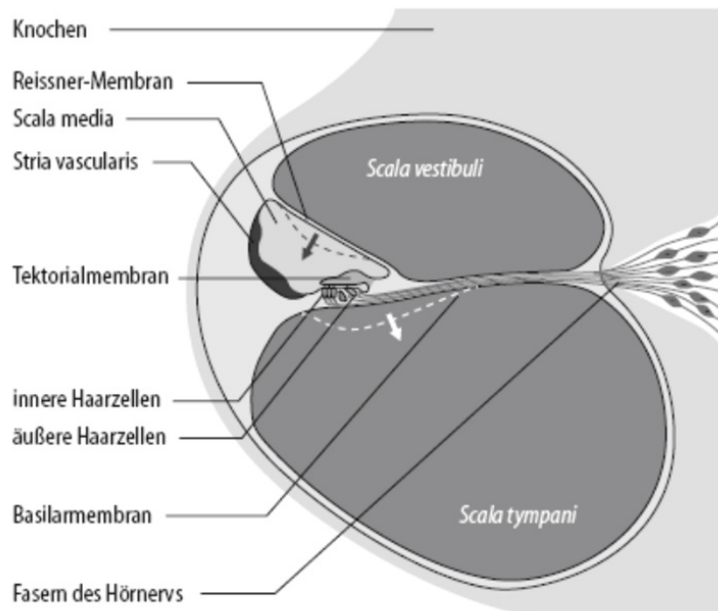


Abb. 2: Querschnitt der Cochlea (Zenner, 2011, S. 322)

Physiologie des Innenohrs

Trommelfell und Gehörknöchelchen transformieren die auf das Ohr treffenden Schalldruckwellen in Flüssigkeitsbewegungen im Innenohr. Die Druckkraft, die der Steigbügel auf die inkompressible Flüssigkeit der Scala vestibuli ausübt, führt zu einer Verdrängung der Reissner-Membran, der Scala media und des Corti-Organ. Diese weichen ihrerseits in die Scala tympani aus, deren Druckausgleich über das runde Fenster geschieht. Aufgrund der Schwingungseigenschaft folgt im weiteren Verlauf eine umgekehrte Bewegung, was zu einer steten Auf- und Abbewegung der Membran, der Scala und des Corti-Organ führt. Diese Bewegung folgt als Wanderwelle auf der Basilarmembran der Schnecke von der Basis bis in die Spitze (schematisch in Abbildung 4, S. 9). (Zenner, 2011, S. 321–323)

Die knöchernen, schneckenförmige Cochlea verjüngt sich von der Basis bis in die Spitze, während sich die Basilarmembran gegenteilig von der Basis zur Spitze von etwa 0,2 mm auf 0,6 mm verbreitert (Terhardt, 1998, S. 58). Außerdem nimmt die Basilarmembran zur Schneckenspitze an Masse zu und an Steifigkeit ab. Daraus folgt, dass Frequenzen die Basilarmembran an ganz spezifischen Stellen besonders gut zum Schwingen anregen. So finden hohe Frequenzen ihre maximale Resonanz der Membran an der Basis, also am ovalen Fenster, und tiefe Frequenzen an der Spitze der Cochlea. Dabei ist die Amplitude der Basilarmembran etwa proportional zur Lautheit. (Lindsay & Norman, 1977, S. 132 ff.) Diese Eigenschaft führt zu einer eindeutigen Zuordnung jeder Frequenz zu einem bestimmten Ort auf der Basilarmembran. Dieser als Ortsprinzip (Ortstheorie, Tonotopie) bezeichnete Effekt wird in Abbildung 5 (S. 10) verdeutlicht. Ein Schallereignis aus verschiedenen Frequenzen wird entlang der Membran entschlüsselt (Zenner, 2011, S. 326 f.) und das Ohr erzeugt, wie Lindsay und Norman ver-

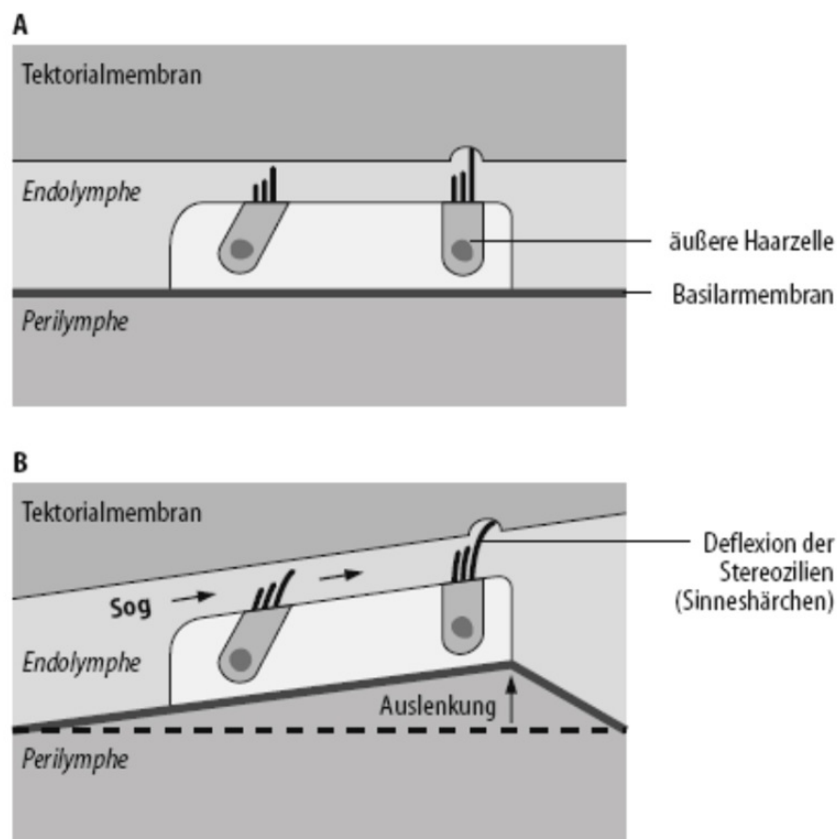


Abb. 3: Darstellung des Corti-Organs (Zenner, 2011, S. 323)

deutlichen, „a rough Fourier analysis of the incoming signal“ (Lindsay & Norman, 1977, S. 135). Wie in Darstellung 3 illustriert, führt diese Wanderwelle zu Verschiebungen zwischen Corti-Organ und Tektorialmembran. Der dadurch entstehende Sog und die Verschiebung selbst führen zu Deflexion bzw. Abscherung der Stereozilien und erzeugen das eigentliche, durch den Schalldruck induzierte Signal. Dieses gelangt über die afferenten Synapsen mit dem Hörnerv zum Gehirn. Die erwähnten Prozesse reichen allerdings nicht aus, den hohen Intensitätsumfang und die derart genaue Frequenzauflösung zu gewährleisten. Aktive Verstärkermechanismen (Schwingungen) der äußeren Haarzellen stimulieren die Wanderwelle bis zu tausendfach. Dabei werden durch diesen örtlich sehr eingegrenzten Effekt lediglich einige wenige Haarzellen intensiviert angeregt. Während somit die äußeren Haarzellen zur Verstärkung beitragen, ermöglichen die inneren Haarzellen mit anschließenden efferenten Nervenfasern die Signalübertragung zum Gehirn. (Zenner, 2011, S. 321–328)

Ein letzter hier aufgeführter Aspekt der Physiologie sind sogenannte otoakustische Emissionen. Zu unterscheiden sind drei verschiedene Arten der Emissionen. Ohne detaillierte Diskussion und Verweis auf unter anderem Fastl und Zwicker (2007) sowie Moore (2013), sind nach Moore und Röderer Tinnitus zum Teil auf derartige otoakustische Emissionen zurückzuführen (Moore, 2013, S. 37) (Roederer, 2000, S. 127). Klinisch erlauben otoakustische Emissionsmessungen Rückschlüsse auf die Funktionalität der äußeren Haarzellen (Zenner, 2011, S. 328). Im konkreten Bezug zur Schallbelastung von Musikern/-innen werden Messungen der otoakustische Emissionen beispielsweise vor und nach einer Probe vorgenommen, um akute audiologische Konsequenzen der gespielten Musik zu dokumentieren

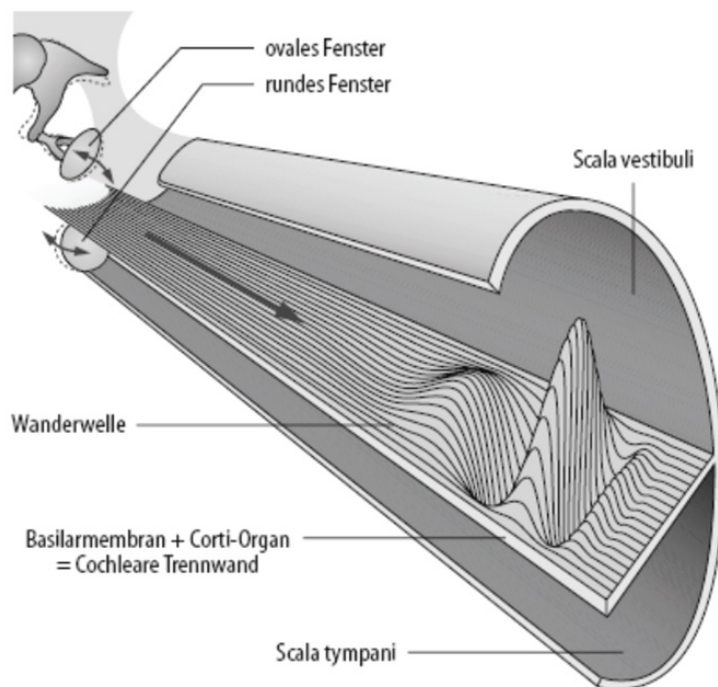


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung der Wanderwelle entlang der Basilarmembran (Zenner, 2011, S. 327)

(Reuter & Hammershøi, 2007). Weitere Anwendungen zitierten unter anderem die Review-Papers von C. Peters et al. (Peters et al., 2005), J. Holstein (Holstein, 2009) und A. Di Stadio (Di Stadio, 2017).

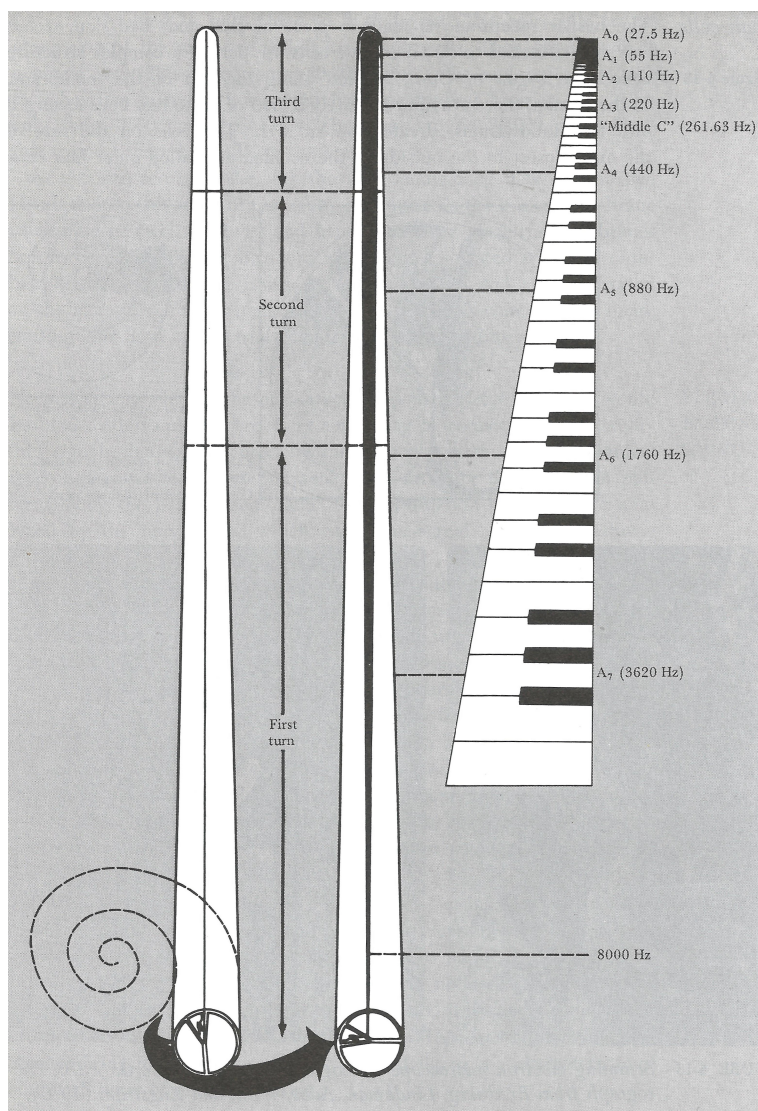


Abb. 5: „Entrollte“ Cochlea mit eingezeichneter Basilmembran (schwarz) und Erklärung des Ortsprinzips (Lindsay & Norman, 1977, S. 137)

2.1.2 Neuronale Prozesse

Im Folgenden werden die Verarbeitungsschritte des Schallsignals im menschlichen Gehirn erläutert. Zu unterscheiden sind Nervenfasern, die zu höherer Verarbeitungsebenen führen (afferente Hörbahn) und Fasern, die abwärts führen (efferente Hörbahn). Der Hörnerv besteht überwiegend aus afferenten Fasern.

Über Hörnerv, Hirnstamm und Hörbahn gelangt das Signal zum Temporallappen. 90 % der afferenten Fasern sind mit ihrer Synapse an jeweils genau eine innere Haarzelle gebunden, die, wie bereits erwähnt, für eine bestimmte Frequenz sensitiv ist (Ortsprinzip). Dies führt dazu, dass entsprechend die Nervenfasern ausschließlich durch die jeweilige Frequenz ihrer Haarzelle optimal angeregt werden, der sogenannten Bestfrequenz (oder charakteristische Frequenz). Die Feuerungsdauer der Fasern codiert die zeitliche Dauer des Schallereignisses, die Entladungsrates transferiert den Schalldruckpegel. Ein Sättigungseffekt der Fasern führt zur Limitierung der Informationswiedergabe bei hohen Pegeln.

Um dennoch Schall mit hohen Pegeln zu verarbeiten, werden Nachbarfasern aktiviert (sog. Rekrutierung). (Zenner, 2011, S. 329–332)

Stark vereinfacht führt von der Cochlea der Hauptteil der Nervenfasern in die gegenüberliegende Gehirnhälfte, ein kleinerer Teil verbleibt auf der gleichen Seite. Durch die Kreuzung der Nervenfasern findet erstmals ein binauraler² Vergleich der von beiden Ohren aufgenommenen Signale statt (Zenner, 2011, S. 329–332). Über weitere Gehirnebenen gelangt das Signal in die Vierhügelregion, in welcher neben der Frequenz- und Intensitätsauflösung auch die Lokalisation von Schallereignissen stattfindet (Maschke & Fastl, 2018). Ferner ist die Aufgabe der höheren Verarbeitungsebenen das Lernen und die Erkennung von Mustern, was besonders in der Sprachverständlichkeit entscheidend ist (Zenner, 2011, S. 329–332). Nicht unerwähnt soll bleiben, dass die Hörbahn und die Verarbeitung von Schallereignissen selbst im Schlaf fast vollständig aktiv sind (Maschke & Fastl, 2018).

2.1.3 Gesundheitliche Folgen von Lärm

Da es beim Thema Schallschutz um die Vorbeugung gesundheitlicher Folgen geht, wird in diesem Abschnitt näher darauf eingegangen. Zu trennen sind aurale (das Ohr betreffende) und extra-aurale (z.B. psychovegetative) Folgen einer Schallbelastung. Darüber hinaus sind bleibende sowie reversible Beeinträchtigungen zu unterscheiden. Die aurale Schädigung gilt als die einzige nachgewiesene irreversible Gehörschädigung und zählt mit der Lärmschwerhörigkeit zu den am weitesten verbreiteten Berufskrankheiten. (Zenner et al., 1999)

Zu den aurale Beeinträchtigungen gehören Kommunikationsstörungen, Tinnitus und Hörverlust. Die Kommunikationsstörung durch Abnahme der Sprachverständlichkeit ist dabei besonders für bereits Hörgeschädigte belastend (Maschke & Fastl, 2018). In Bezug auf die Schallbelastung von Orchestermitgliedern führt Brusis in „Akuter Hörverlust beim Orchestermusiker“ die Einteilung der akuten Schalltraumata in Knalltrauma, Explosionstrauma, akute Lärmtraumata und akustischer Unfall an (Brusis, 2011).

Ein Knalltrauma tritt bei einmaligen oder wiederholten sehr hohe Schalldruckpegeln mit Spitzen von 160-190 dB auf. Eine Schädigung des Innenohrs ist bei einer Dauer des Ereignisses von 1-3 ms zu erwarten. Ist die Einwirkungsdauer größer als 3 ms wird von einem Explosionstrauma gesprochen. Solche Ereignisse können zum Reißen des Trommelfells führen. Knall- und Explosionstraumata entstehen typischerweise bei Schießübungen, Platzen von großen Reifen oder Kesseln, Explosionen in der chemischen Industrie oder bei sonstigen Explosionen. Akute Hörschäden entstehen durch hohe Schalldruckpegel von 130 bis 160 dB, die einige Minuten anhalten. (Brusis, 2011) Toppila et al. (2011) zitieren einen Grenzwert von 125 dB, ab welchem stoffwechselbedingte Schäden in mechanische Schäden übergehen können (Toppila et al., 2011). Die Schädigung ist unmittelbar nach Ende der Einwirkung bemerkbar. Eine Besserung der akustischen Situation tritt nach einigen Stunden oder Tagen ein. Bei einem akustischen Unfall handelt es sich um eine Kombination aus einer mittleren Schallbelastung und einem speziellen körperlichen Unfall, die zu einer permanenten Gehörschädigung führt. Akustische Unfälle treten jedoch selten auf und Brusis erwähnt keine Fälle unter Orchestermitgliedern. (Brusis, 2011)

Tinnitus oder Ohrgeräusche, die durch Schallexposition entstehen, gehen meist mit einem über-

²monaural - ein Ohr betreffend; binaural - beide Ohren betreffend

wiegend zeitlich begrenzten Hörverlust und einem Hörsturz einher. Die Ursachen sind dabei nicht gänzlich geklärt. Zu beobachten ist allerdings ein Zusammenhang von Stress und Tinnitus. (Maschke & Fastl, 2018) Nach aktuellem medizinischen Stand gilt der Tinnitus als komplexes und schwer zu behandelndes Krankheitsbild (Langguth et al., 2015).

Extra-aurale oder chronische Beeinträchtigungen, die durch akustische Belastungen verursacht werden, gelten verglichen mit akuten, auralen Schäden als gut verstanden. Konsequenzen und weitere indirekte Auswirkungen von Lärm sind allgemein anerkannt. (Röösli, 2013) Vegetative Störungen als Reaktion auf Lärm sind beispielsweise Veränderungen des Puls, erhöhte Stresshormonkonzentrationen (Adrenalin, Cortisol), Änderungen der Hauttemperatur usw. (Maschke & Fastl, 2018). Röösli spricht von einer Trennung in primäre, sekundäre und tertiäre Auswirkungen. Die Erhöhung des Blutdrucks entspricht dabei einer beispielhaften primären Reaktion, die direkt bei der Lärmexposition auftritt. Die sekundären Auswirkungen gelten als die Folgen der primären und äußern sich häufig in Müdigkeit und verminderter Konzentrationsfähigkeit. Tertiäre Konsequenzen sind im Gegensatz zu den primären und sekundären nicht reversibel und stellen Krankheitsbilder, wie chronischer Bluthochdruck dar. (Röösli, 2013) Lärmbelastung wird als Stressor angesehen und hat nachgewiesene Effekte auf einige Stoffwechselfvorgänge des menschlichen Körpers. Dazu zählen Probleme des Zuckerhaushaltes bis hin zu Diabetes (Röösli, 2013), Veränderungen der Blutfette, Fließeigenschaften des Blutes und einige andere (Lercher, 1998). Die kardiovaskulären Krankheiten Bluthochdruck, Herzinfarkt und Schlaganfall sind den Autoren Röösli, Maschke und Fastl zufolge in Zusammenhang mit Lärm am umfänglichsten untersucht (Maschke & Fastl, 2018; Röösli, 2013).

Die Lärmforschung fokussiert sich besonders auf die Konsequenzen der Lärmbelastung auf den Schlaf. Der Schlaf als Regenerierung des Körpers in den Tiefschlafphasen (Deltaschlaf) und des Geistes im REM-Schlaf³, gilt als sehr empfindlich (Maschke & Fastl, 2018). Da das Gehör, wie bereits erwähnt, auch im Schlaf aktiv ist, Eindrücke verarbeitet und mit Blutdruck- und Pulsänderungen reagiert, gelten selbst sehr niedrige Geräuschpegel als schlafstörend, auch wenn sie nicht zwingend ein Aufwachen verursachen (Röösli, 2013).

Zuletzt werden nichtakustische Faktoren, sogenannte Moderatoren, erläutert, die gerade in der Psychoakustik in Bezug auf Musik von Bedeutung sind. Lärm als individuell entstehender, psychologischer Eindruck ist nicht nur vom Schalldruckpegel des Ereignisses abhängig, sondern auch von situativen, personalen und sozialen Faktoren. Ein wichtiger situativer Moderator ist der Einfluss der Tageszeiten auf die Lärmempfindung. So zitieren Maschke und Fastl den amerikanischen Wissenschaftler Fields, der aus lärmpsychologischer Sicht den Tag in vier Zeitzonen teilt. Den Tag (9-16 Uhr), die Nacht (0-5 Uhr) und zwei Übergangszeiten. Demzufolge empfindet der menschliche Körper Lärm gerade in der Nacht und den Übergangszeiten als besonders störend. (Maschke & Fastl, 2018) Musiker/-innen, die Orchesterschichten in Opern etc. leisten, sind somit gerade zu diesen Zeiten einem Hauptteil ihrer Schallbelastung ausgesetzt. Ein entscheidender individueller Faktor ist die Einschätzung der eigenen Lärmempfindlichkeit. Aufgrund der unscharfen Grenze zwischen individuellen und sozialen Moderatoren sollten diese besonderen Fokus erlangen. Dabei spielen die generelle Bewertung einer Lärmquelle, das Vertrauen in die Verantwortlichen für Lärmschutz, die individuelle Historie der Lärmbelastung und die Erwartungen eine entscheidende Rolle. Individuelle Moderatoren wie Alter, Geschlecht, Aus-

³rapid eye movement-Schlaf (Traumschlafphase)

bildung und Hausbesitz haben nach Maschke und Fastl keinen Einfluss. (Maschke & Fastl, 2018) Ausführliche Diskussion, Versuche und Bearbeitung dieser demographischen Einflussfaktoren bzw. Organismusvariablen finden sich in der Dissertation von Ruschkowski (2013).

2.2 Akustische Grundlagen

Das Kapitel der akustischen Grundlagen umfasst Aspekte der technischen Akustik, der Psychoakustik und deren Messtechniken. Verbreitete Messgrößen, Berechnungsverfahren und Messmethoden werden erläutert und auf relevante Themen wird eingegangen.

2.2.1 Technische Akustik

Schallereignisse bestehen aus zwei charakteristischen Merkmalen, der Klangfarbe und der Lautstärke. Die Klangfarbe äußert sich in der physikalischen Größe der Frequenz in Hertz (Hz), während die Lautstärke durch die Schallstärke in der Messgröße des Schalldrucks (N/m^2) ausgedrückt wird. Die Akustik beschäftigt sich dabei nicht nur mit dem für Menschen hörbaren Bereich (ca. 16 Hz - 16 kHz), sondern untersucht auch den Infraschall (<16 Hz) und den Ultraschall (>16 kHz). Die Grenzen des hörbaren Bereich sind stark abhängig von äußeren und individuellen Gegebenheiten und unterscheiden sich von Quelle zu Quelle. (Möser, 2015, S. 1 ff.) Die vorliegende Bachelorthesis beschränkt sich lediglich auf den hörbaren Bereich.

Grundbegriffe

Schallquelle Unzählige Schallquellen bilden den akustischen Alltag des menschlichen Gehörs. Musik stellt dabei nur eine dar und ist in der Regel beabsichtigt sowie möglichst frei von Störquellen (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015).

Schallgeschwindigkeit c Die Schallgeschwindigkeit wird durch das zu passierende Medium und dessen Temperatur bzw. Dichte beeinflusst. Der Luftschall beträgt bei 15 °C, $c = 341 \text{ m/s}$. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015)

Schallschnelle ν Die Schallschnelle gibt die Geschwindigkeit an mit der die (Luft-)Teilchen um ihre Ruhelage schwingen. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015)

Schalldruck p Der Schalldruck p entspricht einem Wechseldruck in Raum und Zeit mit periodischer Schwingung und ist um ein Vielfaches kleiner als der atmosphärische Druck (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015).

Schallfeld Innerhalb eines Schallfeldes hängen die Größen Schalldruck und Schallschnelle von der Art der Quelle und des Raumes ab. Die Schallausbreitung wird vereinfacht entweder als Punktschallquelle oder als ebene Schallwand angesehen, was für die akustische Messtechnik ausschlaggebend

ist. Der Frequenzgang der Mikrofonübertragung wird seitens der Hersteller meist für die ebene Schallwand angegeben, da diese mit einigem Abstand zur Quelle (selbst bei Punktschallquellen) als solche anzusehen ist. Hindern räumliche Eigenschaften die ungestörte Ausbreitung, entstehen komplexe Schallfelder. Gegensätzlich zur freien Ausbreitung, dem Freifeld, steht das Diffusfeld. Dieses stellt einen Sonderfall dar, der an jeder Stelle des Feldes den gleichen Schalldruck aufweist. (Möser, 2015, S. 235) (Werner, 2018, S. 3–4) Eine Unterscheidung ist in der Anwendung oft gefordert. So ändert sich die Hörschwelle in Abhängigkeit der Schallfeldeigenschaften. Beachtet wird dies beispielsweise in der Kalibrierung von audiometrischen⁴ Geräten (DIN EN ISO 389-7, Differenzwerte) oder in der Psychoakustik bei der Erstellung von Lautheitsmodellen (Fastl & Zwicker, 2007).

Schallintensität I Die Intensität entspricht der Schalleistung pro Flächeneinheit. Sie dient außerdem als Zwischengröße für die Schalleistungsbestimmung. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015)

Schalleistung P Die Schalleistung entspricht der von einer Quelle abgegebenen Energie pro Zeiteinheit (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015).

Schallimpedanz Z Die Schallimpedanz zeigt die Erzeugung der Schallschnelle durch eine Druckerregung und stellt den Wellenwiderstand eines Mediums dar (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009a; Hering & Schönfelder, 2018; Möser, 2015).

Schallstärke

Aufgrund des sogenannten Weber-Fechner-Gesetzes, das einen logarithmischen Zusammenhang von menschlicher Wahrnehmung und Reiz beschreibt, wird nicht der Druck selbst sondern der Pegel angegeben. Dabei wird der Schalldruckpegel als L_P bezeichnet und erhält die Einheit Dezibel (dB). Gebildet wird der Schalldruckpegel nach Gleichung 1:

$$L_p = 10 \lg \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p_{eff}}{p_0} \quad [dB] \quad (1)$$

Die Eingangsgröße p_{eff} berechnet sich nach Gleichung 2 und wird Effektivwert des Schalldrucks genannt. Der sogenannte Bezugsschalldruck ist international mit $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ festgelegt. Der Bezugsschalldruck entspricht dem Schalldruck an der Hörschwelle (bei 1000 Hz) und bewirkt, dass diese bei genannter Frequenz 0 dB annimmt.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad [Pa] \quad (2)$$

Die im Alltag auftretenden Schalldruckpegel umspannen einen weiten Schalldruckpegelbereich und können dabei sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Die Darstellung 6 (S. 15) soll einen Eindruck für verschiedene Situationen geben. Anzumerken ist, dass sich der Wert der Schmerzgrenze

⁴Audiometrie, Tonaudiometrie oder Schwellenaudiometrie - klinisches Verfahren zur Feststellung der Hörschwelle (Zenner, 2011, S. 318)

von Quelle zu Quelle unterscheidet (130 dB; 140 dB). (Fastl & Zwicker, 2007; Feldmann, 2018; Möser, 2015; Müller & Möser, 2004; Werner, 2018).

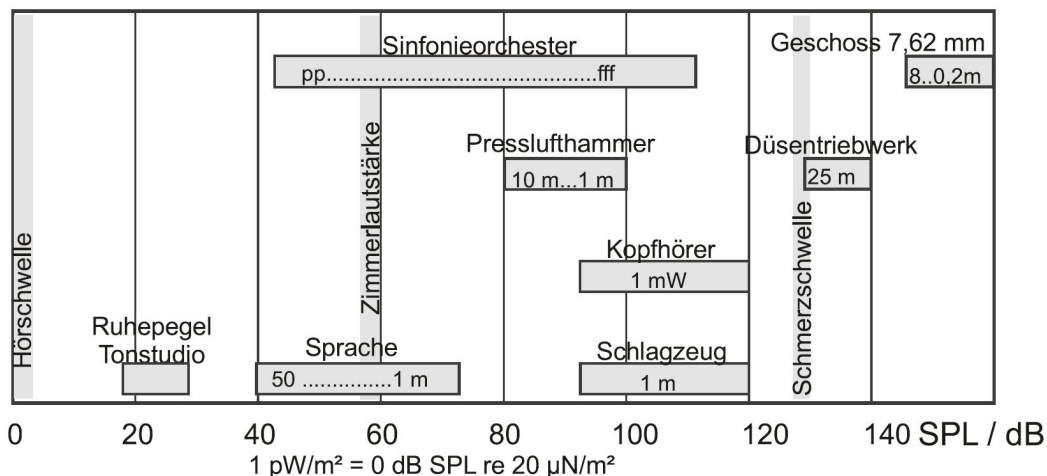


Abb. 6: Beispiele für alltägliche Schalldruckpegel; SPL - Sound Pressure Level bzw. Schalldruckpegel (Werner, 2018, S. 3)

Neben dem Schalldruck werden die Größen Schallschnelle ν , Schalleistung P und die Schallintensität I ebenfalls in Pegeln ausgedrückt. Weiterführende Informationen und Bildungsgesetze finden sich unter anderem in Müller und Möser (2004, S. 1 ff.). Der Schalldruckpegel wird im englischsprachigen Raum als „Sound pressure level“ bezeichnet und findet sich häufig unter der Abkürzung SPL.

Frequenzbewertung

Da das menschliche Ohr frequenzabhängig unterschiedlich sensitiv ist, versuchen Frequenzbewertungen diesem Phänomen Rechnung zu tragen. Frequenzbewertungen sind in den meisten akustischen Anwendungen verbaut und international sind die Frequenzbewertungen A, C und Z am weitesten verbreitet. Ein A-bewerteter Schalldruckpegel wird L_{pA} (oder nur L_A) in dB(A) genannt (Feldmann, 2018). Frequenzbewertungen werden durch Pegelzuschläge und Pegelabschläge gebildet. Dazu listet DIN EN 61672-1 für Nennfrequenzen die Werte oder gibt im Anhang der Norm Berechnungsformeln an (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2014). Die A-Bewertungskurve ist nach Kalivoda, Schick, Bernstein, Gottlob und Vogelsang ungefähr mit der 40 phon Kurve (s. Abb. 14 Kurven gleicher Lautstärke, S. 26) (Kaliwoda, 1998) (Schick, 1990, S. 29 ff.) (Gottlob & Vogelsang, 2004, S. 113) (Bernstein, 2019, S. 79) und nach Moore mit der 30 phon Kurve vergleichbar (Moore, 2013, S. 136). Der C-bewertete Schalldruckpegel ist zwischen 100 Hz und 5000 Hz nahezu linear (Feldmann, 2018), kommt häufig bei hohen Pegeln zum Einsatz und nähert grob die 100 phon Kurve an (Kaliwoda, 1998, S. 110). Die Z-Bewertung steht für „Zero“ und zeigt den unbewerteten Schalldruckpegel. Des Weiteren gibt es noch einige andere Bewertungen, die allerdings selten oder nur in speziellen Fällen verwendet werden. In Abbildung 7 (S. 16) sind die erwähnten Bewertungskurven graphisch dargestellt. (Feldmann, 2018)

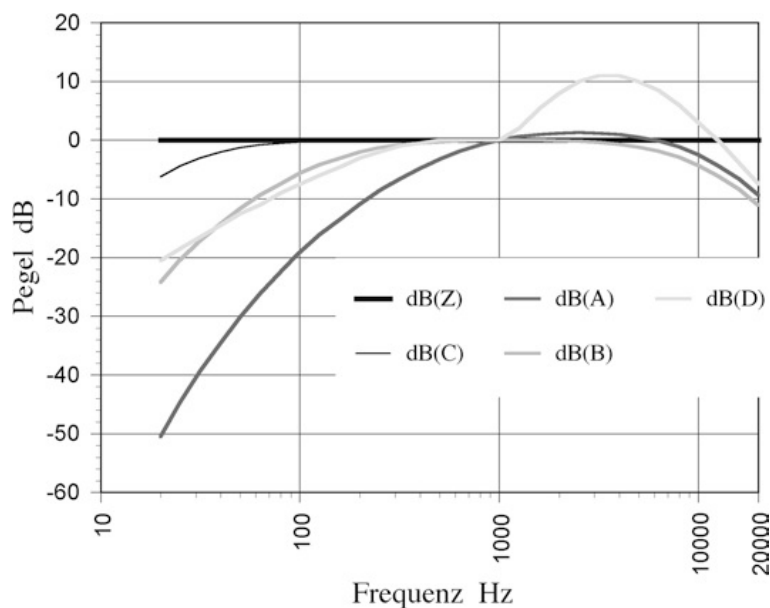


Abb. 7: Bewertungskurven (Feldmann, 2018, S. 3)

Zeitbewertung

Um den Effektivwert des Schalldrucks (Gleichung 2, S. 14) zu errechnen, muss die Integrationszeit gegenüber der längsten im Schallsignal vorkommenden Periodendauer groß sein. Theoretisch sollte diese unendlich sein, weswegen in der Praxis der Effektivwert mit einem sogenannten gleitenden quadratischen Mittelwert angenähert wird. Das Schallsignal bzw. der Druckverlauf über die Zeit wird mit einer Zeitkonstante τ geglättet (zeitbewertet). Je nach Glättung τ pendelt der geglättete Mittelwert mit einer Restwelligkeit um den wahren Effektivwert. Abbildung 8 stellt diesen Umstand schematisch dar. Häufig verwendet sind die Zeitbewertungen **slow**, **fast** und **impulse**. (Feldmann, 2018)

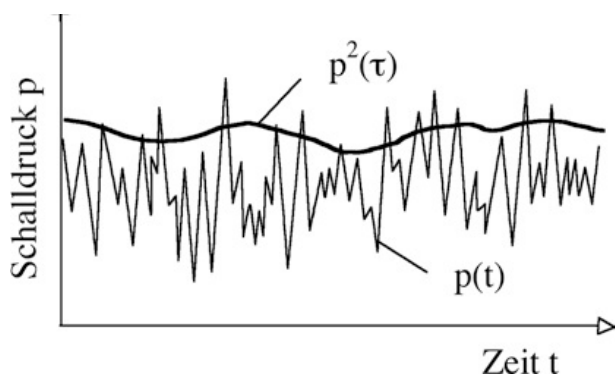


Abb. 8: Schematische Darstellung der Zeitbewertung und Glättung (Feldmann, 2018, S. 4)

Die Zeitbewertung **slow** mit einer Zeitkonstante $\tau = 1 \text{ s}$ reagiert träge auf Pegeländerungen und hat eine niedrige Restwelligkeit. Nahezu stationäre, impulsarme Schallereignisse lassen sich messen und bewerten. (Feldmann, 2018)

Die Zeitbewertung **fast** bewertet mit einer Zeitkonstante von $\tau = 0,125 \text{ s}$ und eignet sich für schwankende Schallereignisse. Beispielsweise ist diese im Taktmaximalverfahren der TA Lärm verpflichtend.

(Feldmann, 2018) Ferner gilt die fast-Bewertung als Standardeinstellung für Schalldruckpegelmessungen (Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2017).

Die Zeitbewertung **Impuls** versucht mit verschiedenen Zeitkonstanten das menschliche Gehör bei impulsiven Schallsignalen (Knalle etc.) anzunähern. Diese werden von Impulsschallpegelmessern ermittelt. Abbildung 9 zeigt grafisch die unterschiedlichen Bewertungen und deren Verhalten bezüglich eines idealen Pegelsprungs.

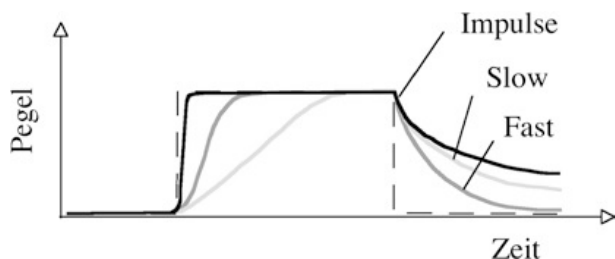


Abb. 9: Vergleich der verschiedenen Zeitbewertungen (Feldmann, 2018, S. 4)

Die bei einigen Schallpegelmessgeräten verwendete Bewertung **peak** oder *Spitze* stellen eine sehr schnelle, nicht genormte Bewertung dar (Feldmann, 2018). Die Peakwerte sind meist C-bewertet ($L_{C,peak}$) und unter anderem von der LärmVibrationsArbSchV als Beurteilungsgrundlage vorgegeben.

Maximalpegel

Der Maximalpegel stellt den maximalen gleitenden Effektivwert eines zeitlich veränderlichen Schallerignisses dar (Feldmann, 2018, S. 4 f.).

Taktmaximalpegel

Der in der bereits erwähnten TA Lärm vorgeschriebene Taktmaximalpegel ist A-frequenzbewertet und fast-zeitbewertet. Das Schallsignal wird für normierte Zeitintervalle (Takte) ausgewertet und der jeweilige Maximalwert pro Takt wird ermittelt (sog. Taktmaximalpegel) (Feldmann, 2018, S. 5).

Mittelungspegel

Der Mittelungspegel beurteilt Schallereignisse, die über einen längeren Zeitraum andauern. Dieser wird besonders bei schwankenden Schallereignisse mit Pegeldifferenzen von 30 dB verwendet (z. B. Industrie, Verkehr etc.). Eine Mittelung des Schalldruckpegels über einen ausreichend langen Zeitraum nähert den wahren Effektivwert nach Gleichung 3 an. Der entstehenden Wert wird energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{Eq} genannt (auch bewerte, z. B. L_{AEq}).

$$L_{Eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{Eq,i}} \right) \quad [dB] \quad (3)$$

mit $L_{Eq,i}$ als die einzelnen Mittelungspegel und mit der Anzahl n an Einzelpegeln. Dieser Einzahlwert gibt den Schalldruck eines steten Geräusches wieder, das über die gleiche Zeitspanne die äquivalente

Schallenergie wie das schwankende Originalsignal freisetzt. (Feldmann, 2018, S. 5 ff.) Hauptsächlich die Stärke, Dauer und Häufigkeit aller Schallsegmente beeinflussen den energieäquivalenten Dauerschallpegel (Gottlob & Vogelsang, 2004, S. 106). Die Bezeichnung des Dauerschallpegels kann variieren, wird aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit wie oben verwendet.

Perzentilpegel

Perzentilpegel sind eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung von zeitvarianten Schallereignissen. Der in n % der Messzeit übertroffene Pegel gibt den Perzentilpegel L_n an (Gottlob & Vogelsang, 2004, S. 106). Besonders in der Psychoakustik werden Lautheiten als Perzentilwert angegeben (s. Kapitel 6 Messungen).

Schalldosis

Die Schall- oder auch Lärmdosis AE wird in der Einheit $[Pa^2h]$ ausgegeben und entspricht einer energieproportionalen Messgröße.

$$AE = \int_0^T p_{AF}(t)^2 dt \quad [Pa^2h] \quad (4)$$

Wie die Gleichung 4 zeigt, ist die Schalldosis abhängig von der Messdauer und der Größe des Schalldruckpegels. Aus der Schalldosis lässt sich der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{Eq} bilden, wobei $1 Pa^2h$ Lärmdosis einem L_{AEq} von $85 dB(A)$ mit einer Beobachtungsdauer von 8 h entspricht. Der Schallexpositionspegel L_{AE} stellt ebenfalls eine Form der Dosisbetrachtung dar und bildet sich aus dem energieäquivalenten Dauerschallpegel und einer Zeitgewichtung. (Feldmann, 2018, S. 9)

Die LärmVibrationsArbSchV gibt den Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ als Grenzwertgröße vor. Dieser errechnet sich aus dem energieäquivalenten Dauerschallpegel gewichtet mit dessen Einwirkungszeit bezogen auf eine 8h-Schicht. Unter definierten Umständen erlaubt die Verordnung auch eine Beurteilung der Schallbelastung mittels des Wochen-Lärmexpositionspegels. (LärmVibrations-ArbSchV, Bundesregierung (2007)) (Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2017) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009b)

Beurteilungsgrößen

Da die Wahrnehmung eines Schallereignisses nicht nur von der Schallstärke, sondern auch von qualitativen Faktoren, abhängig ist, wird im Immissionsschutz der Beurteilungspegel L_r über eine Zeit T_r gebildet. Im Arbeitsschutz wird $T_r = 8 h$ als Messzeit verwendet.

$$L_r = L_{AEq} + \sum K_i \quad [dB(A)] \quad (5)$$

Die Variablen K_i der Gleichung 5 stellen Pegelzu- bzw. abschläge dar, welche die Schallcharakteristik berücksichtigen sollen. Unter anderem gehen Tonhaltigkeit, Informationshaltigkeit und Einflüsse der

Schallquellenarten in die Berechnung ein. Genauere Ausführungen finden sich in Feldmann (2018, S. 10–12) sowie Gottlob und Vogelsang (2004, S. 106–108).

2.2.2 Messtechnik

Da im Rahmen dieser Arbeit Messungen im Orchester vorgenommen wurden, gibt dieser Abschnitt einen kurzen Überblick über die gängigsten Methoden der akustischen Messtechnik. Darüber hinaus werden wichtige Anwendungsaspekte mit Bezug auf die eigenen, durchgeführten Messungen beleuchtet.

Luftschallmessung

In der Messtechnik wirken auf die Mikrofone Effekte des Schalls (Schalldruck, Intensität, Schallschnelle, Schallfeld, etc.), der Raumeigenschaften, der klimatischen Bedingungen sowie der Mikrofone selbst. (Werner, 2018)

Das Mikrofon mit Stativ etc. stellt zwar einen Störkörper im Schallfeld dar, allerdings sind die Folgen dieser Störkörper auf die Schallquelle nach Werner meist vernachlässigbar und werden im Verlauf vorliegender Arbeit nicht mehr berücksichtigt (Werner, 2018). Ebenso mögliche Fehlerquellen sind falscher Aufbau, besonders bei Mikrofonen mit ausgeprägter Richtcharakteristik (Werner, 2018). Dies ist bei eigenen getätigten Messungen nachrangig, da verwendetes Mikrofon eine Kugelcharakteristik aufweist und folglich eine geringe Richtcharakteristik besitzt (Feldmann, 2018, S. 13). Fremdgeräusche durch Wind oder Luftstöße, Vibrationen innerhalb der Mikrofongehäuse oder die Übertragung von Körperschall über Boden, Stativ und Mikrofonhalterung stellen weitere Fehlerquellen dar (Werner, 2018). Aufgrund der eigenen Messungen in Probenräumen oder Konzertsaal sind Windgeräusche ausgeschlossen und Luftstöße entstehen vorrangig bei Explosivlauten der Sprach- oder Gesangsaufnahme (Pop-Artefakte). Die Wahl hochwertiger Mikrofone schließt im Normalfall Störgeräusche durch vibrierende Mikrofontteile aus. (Werner, 2018) Körperschallübertragungen sind ebenfalls gering, da einerseits während den Probenarbeiten eingeschränkter Trittverkehr im Saal stattfand, andererseits eine elastische Lagerung des Mikrofons gewählt wurde.

Zusätzliche Einflüsse auf die Messqualität haben Wandlungseffekte durch die verwendete Elektronik. Da angenommen wird, dass die Wahl eines hochwertigen Mikrofons diese Problematiken ausschließt bzw. ausreichend minimiert, wird auf weitere Darstellung verzichtet.

Ein unumgänglicher Teil akustischer Messungen stellt die Kalibrierung dar, um die Feststellung der Funktionstüchtigkeit der Messmikrofone zu überprüfen. Diese lässt sich mittels vier Methoden durchführen, mithilfe der Reziprozitätsbeziehungen, dem Vergleich mit einem Referenzmessmikrofon, einer bekannten mechanischen Wirkung des Schallfelds oder einem bekannten Schallfeld. Letztere Methode entspricht einer Kalibrierung mit einem Schallkalibrator. (Vorländer, 2004) Diese sind am weitesten verbreitet (Vorländer, 2004) und wurden auch bei den Messungen dieser Bachelorthesis verwendet.

Wandlerprinzip und Schallwandler

Die auf ein Mikrofon eintreffenden Schallwellen versetzen eine Membran in Schwingung, die wiederum über verschiedene elektroakustische Prinzipien in elektrische Spannung umgewandelt wird. Das elek-

trostatische Wandlerprinzip ist mit dem Kondensatormikrofon am weitesten verbreitet. Eine leitende Membran und eine starre Gegenkathode wirken als Plattenkondensator, wobei sich durch die Auslenkung der Membran die Kapazität und einhergehend die Spannung ändern. Weitere elektrotechnische Voraussetzungen (wie die Vorpolarisierung) gewährleisten Anwendungen bis circa 140 dB. Üblicherweise besitzen die Membranengehäuse bzw. Mikrofonkapseln einen Durchmesser von 1/2", wobei auch 1-, 1/4- und 1/8-Zoll Durchmesser zu finden sind. Kondensatormikrofone benötigen aus funktionstechnischer Sicht einen Vorverstärker auf den das eigentliche Mikrofon, genauer die Mikrofonkapsel, aufgesetzt ist. (Vorländer, 2004, S. 26 f.) Wird in dieser Bachelorarbeit von Mikrofon gesprochen, ist korrekterweise immer die Kombination aus Vorverstärker und Kapsel gemeint. Eine Übersicht verschiedener Wandlerprinzipien findet sich in Hering und Schönfelder (2018, S. 468)

Darüber hinaus sind die Richtcharakteristika der Luftschallwandler, wie eben erwähnt, zu berücksichtigen. Grundsätzlich gibt es Achter, Nieren, Keulen und Kugel-Charakteristika. Das ideale Kugelmikrofon würde Schalldrücke aus allen Richtungen gleich auffassen. (Hering & Schönfelder, 2018, S. 469) Qualitativ hochwertige Messmikrofone weisen eine annähernde Kugelcharakteristik (Werner, 2018, S. 38) bzw. keine signifikante Richtcharakteristik auf (Feldmann, 2018, S. 13).

Messmikrofone lassen sich in Güteklassen unterteilen. Klasse 0 Mikrofone stellen die Mikrofone für die Laboratorien dar und dienen als Bezugsnormale. Die Messmikrofone für die Praxisverwendung sind in 3 Klassen kategorisiert. Die Klasse 1 stellt die höchsten Genauigkeitsanforderungen (Feldmann, 2018, S. 12–13). Die exakten Richtwerte für die Pegellinearität der Klassen findet sich unter anderem in DIN EN 61672-1.

2.2.3 Psychoakustik

Auf der Basis der technischen Akustik und der Physiologie des menschlichen Gehörsinns baut die Psychoakustik auf. Die Psychoakustik hat in unterschiedlichsten Fachgebieten eine Bedeutung und spielt unter anderem auch in musikwissenschaftlichen Untersuchungen eine Rolle. Dies erlaubt zum einen die Betrachtung der Psychoakustik durch Fachliteratur der Musikwissenschaften, zum anderen durch, wie es Roederer bezeichnet, „technische Literatur“ (Roederer, 2000, S. 127). Während in der „musikalischen“ Literatur der Psychoakustik die Lautstärke bzw. die Dynamik als stilistisches Mittel beleuchtet wird und die Lautheit weniger von Interesse ist (u. a. Fastl und Zwicker (2007, S. 364)), liegt der Fokus in der „technischen“ Literatur auf Modellen, Methoden und der Beschreibung von Schallbelastung. Da vorliegende Bachelorthesis versucht die durch Musik erzeugte Schallbelastung mithilfe eines Lautheitsmodells zu erörtern, liegt der inhaltliche Schwerpunkt auf der „technische Literatur“.

Untergliedert ist folgender Abschnitt in die Grundlagen der psychoakustischen Schallanalyse, die primären und die komplexen Parameter. Diese Strukturierung dient lediglich der Übersichtlichkeit und orientiert sich an Maschke und Jakob (2018). Da einige Literatur in englischer Sprache vorliegt, werden neben den deutschen Fachbegriffen die englischen Übersetzungen aus Maschke und Jakob (2018) sowie Fastl und Zwicker (2007) angegeben.

Grundlagen der psychoakustischen Schallanalyse

Grund für die Betrachtung von Schallereignissen mittels psychoakustischer Ansätze sind die Problematiken der „einfachen“ Schallpegelmesstechnik und deren mangelhafte Darstellung der menschl-

chen, auditiven Wahrnehmung (Maschke & Jakob, 2018). Während diese Problematiken in Kapitel 5 detailliert diskutiert werden, beleuchtet dieser Gliederungspunkt die Grundlagen der psychoakustischen Schallanalyse. Besonders bei folgenden Themen sei auf die zitierte Literatur verwiesen, da auf ausführliche Erörterung verzichtet werden muss.

Hörfläche (hearing area) und Hörschwelle (absolute threshold) Die menschliche Hörfläche lässt sich zu geringen Schallpegeln durch die Hörschwelle und zu hohen Pegeln durch die Schmerzgrenze begrenzen. In Abbildung 10 ist die Hörfläche dargestellt. Die Pegel der Darstellung beziehen sich auf Freifelddaten und einen Bezugsschalldruck von bekannten $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$. Die Werte der Hörschwelle und Schmerzgrenze gelten für stationäre Sinustöne (d. h. einer Mindestdauer von 100 ms). (Fastl & Zwicker, 2007, S. 17 ff.) Die Hörschwelle wird in Versuchen erstellt und entspricht den Schalldruckpegeln die nötig sind, um Töne bestimmter Frequenzen gerade noch zu hören. Diese Werte sind sehr individuell und stellen Mittelwerte (50 %-Perzentil) der Hörschwellen von sogenannten otologisch normalen Personen⁵ dar. (Maschke & Jakob, 2018) Die Hörschwelle ist in DIN EN ISO 389-7 genormt und enthält Daten für Frei- und Diffusfeld. Die ermittelten Werte der Norm beziehen sich auf reine Töne, terzbandbreite Rausch-Signale und auf alle Rausch-Signale unter 8 kHz, die schmaler sind als eine Frequenzgruppe⁶ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2017). Außerdem stellen sich ausgeprägte Unterschiede ein, wenn die Hörschwelle für ein Ohr (monaural) oder beidseitig (binaural) ermittelt wird (Moore, 2013, S. 57 ff.).

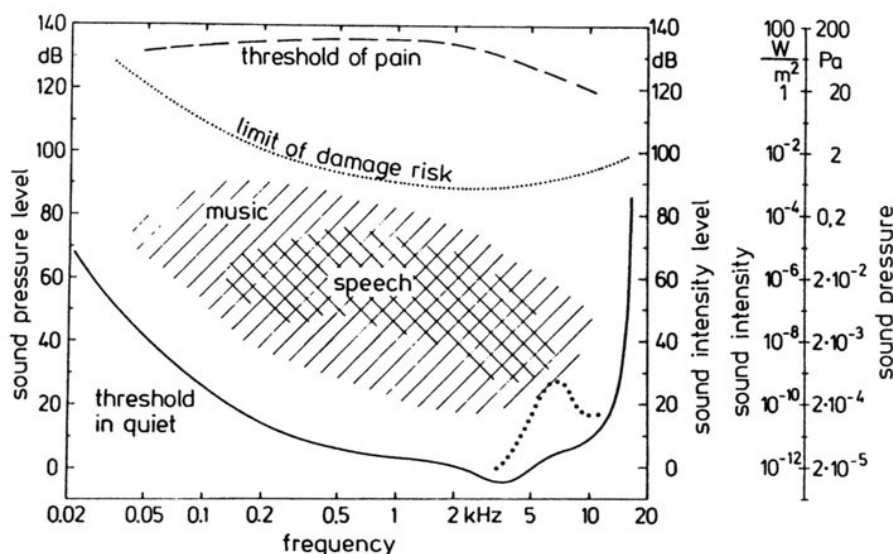


Abb. 10: Hörfläche zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze. Schraffiert sind die Bereiche angegeben, die durch Musik und Sprache eingenommen werden. Punktiert (klein) ist die Grenze des schädigenden Risikos angegeben und (dick) punktiert (an der Hörschwelle) ist die Hörschwelle von Hörgeschädigten durch zu laute Musik angedeutet. (Zwicker & Fastl, 1999, S. 17)

Verdeckung (masking) Verdeckungseffekte sind im Alltag und der Musik allgegenwärtig. Diese entstehen, sobald dem menschlichen Gehör mehrere Schallereignisse gleichzeitig geboten werden. Ein

⁵Person mit auditiv normalem Gesundheitszustand - detaillierte Definition in DIN EN ISO 389-7

⁶Frequenzgruppen, siehe Gliederungspunkt 2.2.3 Psychoakustik Frequenzgruppen

passierender LKW während einer Konversation lässt bei gleicher Gesprächslautstärke die Verständlichkeit sinken oder führt zu erhöhter Gesprächsstärke. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 61) Nach Roederer ist die Verdeckung in der polyphonen Musik und besonders in Orchestern ein signifikanter Effekt. Spielt ein leises Instrument gleichzeitig mit lauten Instrumenten, ist dessen Hörbarkeit nicht gegeben bzw. eingeschränkt (Roederer, 2000, S. 114 f.).

Die Verdeckung wird in der Psychoakustik anhand von künstlichen Stimuli ermittelt. Üblicherweise dienen Sinustöne als Testtöne, die durch Störgeräusche (Sinustöne, Rauschen und Mischgeräusche) verdeckt werden. (Fastl, 1998, S. 126) Der Pegel eines Testtons, der nötig ist, diesen bei gleichzeitigem Beisein eines sogenannten Verdeckers (Störgeräusch) gerade noch zu hören, wird als Mithörschwelle (masked threshold) bezeichnet (Maschke & Jakob, 2018). Verdeckung bedeutet jedoch nicht nur einen Testton nicht mehr zu hören (vollständige Verdeckung), sondern eine Lautheitseinbuße jenes Tons gilt ebenfalls als Verdeckung (unvollständige Verdeckung) (Fastl & Zwicker, 2007; Zwicker, 1982). Anders ausgedrückt, der Testton muss das Störgeräusch übertönen um wahrgenommen zu werden (Ziemer, 2020, S. 73). Verdeckung oder auch Maskierung lässt sich in zwei Arten unterteilen, die spektrale Verdeckung, die besonders durch Frequenz und Pegel beeinflusst wird, und die zeitliche Verdeckung.

Die spektrale Verdeckung wird bei gleichzeitiger Anwesenheit eines reinen Tons (Sinuston) und eines Verdeckers deutlich. Die Literatur führt die Störgeräusche Breitbandrauschen (weißes Rauschen), Schmalbandrauschen, Tiefpass- und Hochpassrauschen, reine Töne und komplexe Töne an (Fastl & Zwicker, 2007, S. 62 ff.). Zusätzlich sei auf die Asymmetrie der Verdeckung hingewiesen. Störgeräusche wie Rauschsignale und Schmalbandrauschen verdecken in Abhängigkeit der Testtonfrequenz. Besonders bei reinen Testtönen, die durch ein Schmalbandrauschen verdeckt werden, zeigt sich eine effektivere Maskierung der höheren Frequenzen als der tieferen (Fastl, 1998, S. 126). Sichtbar wird dieser Zusammenhang durch die Abbildungen 11 und A.2 (s. Anhang). Ist der Schalldruckpegel eines Testtons niedriger als die „Verdeckungsschleife“ des Störsignals (Abbildung 11), bleibt der Testton verborgen (Maschke & Jakob, 2018). Die erkennbaren Verdeckungsverläufe werden als Mithörschwellenmuster bezeichnet.

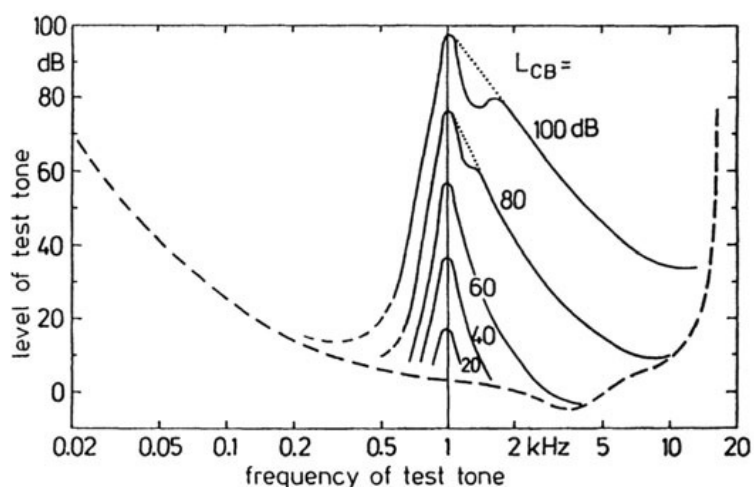


Abb. 11: Mithörschwelle reiner Testtöne verdeckt durch frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen (Zwicker & Fastl, 1999, S. 65)

Die zeitliche Verdeckung ist messbar anhand von Störgeräuschen (kürzer als 500 ms) und Testtönen (kürzer als 10 ms). Die zeitliche Verdeckung lässt sich in drei Phasen zerlegen. Die Vorverdeckung (pre masking), die Simultanverdeckung (simultaneous masking) und die Nachverdeckung (post masking) stellen diese drei Abschnitte dar (Abbildung 12). Wird der Testton vor Beginn des Maskierers präsentiert, ist die Vorverdeckung bemerkbar. Die Nachverdeckung stellt sich indessen ein, wenn der Testton nach dem Verdecker dargeboten wird. Werden beide Schalle gleichzeitig offeriert, tritt die Simultanverdeckung auf. Die bereits erwähnte spektrale Verdeckung ist letzterer zuzuordnen. (Fastl, 1998, S. 128) Die Vorverdeckung ist hier nicht, wie es Fastl und Zwicker beschreiben, als „in die Zukunft hörend“, sondern als nötige Sensibilisierungszeit des Gehörs zu verstehen (Fastl & Zwicker, 2007, S. 220). Die Nachverdeckung kann nach Fastl (1998) als „das Ausklingen der Wirkung von Geräuschen im Gehör“ (Fastl, 1998, S. 128) verstanden werden. Der „overshoot“ Effekt wird in der Literatur behandelt, hat aber keinen weiteren Einfluss auf die in vorliegender Bachelorthesis verwendeten Modelle.

Die Verdeckung spielt bei der Lautheitsbetrachtung von zeitvarianten Geräuschen eine wichtige Rolle.

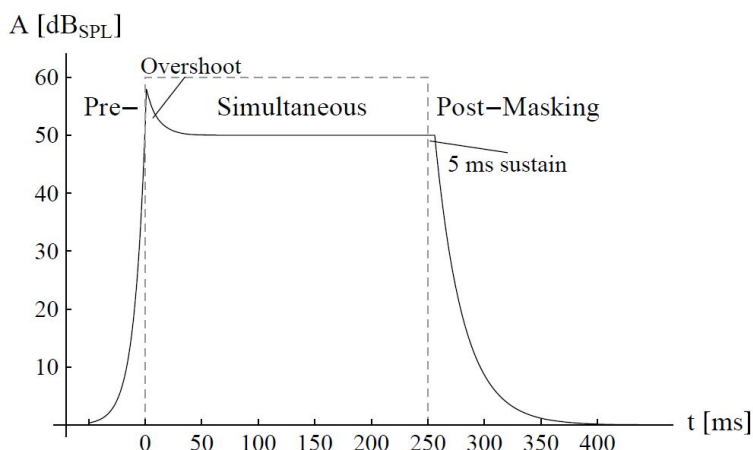


Abb. 12: Zeitliche Verdeckung (Ziemer, 2020, S. 78)

Frequenzgruppen (critical bands) Die Frequenzgruppen sind in der Psychoakustik von zentraler Bedeutung und stellen die Grundlage für die quantitative Beurteilung vieler Größen (Fastl, 1998, S. 132). Frequenzbänder bestimmter Breite werden als Frequenzgruppen bezeichnet. Diese Aufteilung berücksichtigt die Tatsache, dass sich Messungen mit Bandbreiten kleiner der Frequenzgruppenbreite gänzlich von Messungen mit größerer Bandbreite unterscheiden (Terhardt, 1998, S. 264). Zwei Schalleignisse, deren Frequenzabstand größer ist als die Frequenzgruppenbreite, werden lauter wahrgenommen, als zwei Ereignisse gleichen Pegels innerhalb einer Gruppe (Maschke & Jakob, 2018). Ermitteln lassen sich diese Frequenzbreiten nach Fastl anhand einiger Versuche (Fastl, 1998, S. 130) und stehen in engen Zusammenhang mit der Tonheit z in Bark (vgl. Tönhöhenwahrnehmung). 1 Bark gibt dabei die Gruppenbreite vor und untergliedert das Frequenzspektrum in 25 (0-24) Frequenzgruppen (sog. Bark-Skala). Abbildung 13 (S. 25) aus Zwicker und Fastl (1999) zeigt die Untergliederung des Spektrums. Evident ist, dass die Gruppenbreite nicht konstant bleibt, sondern sich ab der Mittenfrequenz von circa 500 Hz ändert. Bis dorthin entsprechen 100 Hz einer Gruppenbreite, darüber hinaus bilden 20 % der Mittenfrequenz die Breite einer Gruppe (Maschke & Jakob, 2018). Physiologisch ist der

Effekt der Frequenzgruppen durch die Basilarmembran und das Ortsprinzip erklärbar. Jede Frequenz regt einen bestimmten Bereich der Membran zur Resonanz an. Liegen zwei Schallereignisse innerhalb einer Frequenzgruppe, beeinflussen sich beide Resonanzorte, wodurch unter anderem sich ändernde Tonhöhe, Rauigkeit und schwankende Lautheit zu Tage treten. Liegen die Frequenzen beider Ereignisse außerhalb der Gruppenbreite, überlappen sich die Resonanzstellen nicht und getrennte Töne sind vernehmbar. (Roederer, 2000, S. 37–44)

Die genannte Einteilung des Spektrums muss differenziert betrachtet werden. Die Frequenzgruppenbänder sind der Physiologie folgend keinesfalls ortsgebunden, sie sind frei verschiebbar. Außerdem reagieren sie dynamisch und passen sich den Schallereignissen an (Ziemer, 2020, S. 74) (Ruschkowski, 2013). Dennoch werden sie in der Psychoakustik als stationär angesehen.

In der Praxis müssten die Frequenzgruppen durch eigene Filter erzielt werden. Da aber meist Terzfilter in der Messtechnik verwendet werden, findet eine Approximation statt. Fastl und Zwicker (2007) beschreiben die Schritte zur Anpassung der Frequenzgruppenbänder aus Terzbändern detailliert (Fastl & Zwicker, 2007, S. 233). Vereinfacht lässt sich aber zusammenfassen, dass oberhalb 500 Hz die Frequenzgruppen (20 % der Mittenfrequenz) mit Terzen (23 % der Mittenfrequenzen) angenähert werden, während unterhalb 500 Hz mehrere Terzbänder zu den 100 Hz breiten Gruppen zusammengefasst werden (Maschke & Jakob, 2018).

Primäre psychoakustische Parameter

Lautstärkenwahrnehmung (sound intensity perception) Die menschliche Lautstärkenwahrnehmung (Lautheit) hängt von den Schallcharakteristika Frequenz und Bandbreite, Schalldruckpegel, Verdeckung sowie der zeitlichen Beschaffenheit ab (Maschke & Fastl, 2018). Bereits 1920 wurde klarer, dass die Lautheit nicht alleine durch den Schalldruckpegel in dB beschrieben werden kann. Daraufhin entwickelte Stanley S. Stevens Konzepte, die die Psychophysik und besonders die Psychoakustik bis heute prägen. (Ruschkowski, 2013) Die aktuell geläufigsten psychoakustischen Modelle basieren meist auf den Ergebnissen der „Münchener Schule“ mit Eberhard Zwicker und Hugo Fastl (Maschke & Jakob, 2018).

Lautstärkepegel (loudness level) Der Lautstärkepegel L_N und die Kurven gleicher Lautstärke (Isophone) sind seit langem bekannt und bilden auf einfache Weise den Zusammenhang der Frequenzabhängigkeit und der wahrgenommenen Lautstärke (Lautheit) für Sinustöne bzw. schmalbandige Geräusche ab (Terhardt, 1998, S. 271 ff.). Erstellte wurden diese durch Hörversuche mittels Vergleich eines Schallereignisses (Sinuston bzw. schmalbandiges Rauschen) und eines Referenztons (1 kHz Sinuston). Somit hörten die Versuchspersonen alternierend Testtöne verschiedener Frequenzen sowie den Referenzton und regulierten getrennt zum einen den Pegel des Referenzton zum anderen den Pegel des Testtons bis beide Schallereignisse der gleichen Lautheit entsprachen. Die entstandenen Kurven reichen über das hörbare Spektrum und erhielten die Einheit phon. (Moore, 2013, S. 133 ff.) Dargestellt wird dieser Zusammenhang als Kurven gleicher Lautstärke (Abbildung 14, S. 26). Beispielsweise hat ein Ton mit der Frequenz von 63 Hz und einem Schalldruckpegel von 80 dB einen zugehörigen Lautstärkepegel von nur 50 phon. Demnach wird ein 1 kHz Sinuston mit 50 dB gleich laut

z Bark	f_u, f_o Hz	f_m Hz	z Bark	Δf_G Hz	z Bark	f_u, f_o Hz	f_m Hz	z Bark	Δf_G Hz
0	0				12	1720			
		50	0,5	100			1850	12,5	280
1	100				13	2000			
		150	1,5	100			2150	13,5	320
2	200				14	2320			
		250	2,5	100			2500	14,5	380
3	300				15	2700			
		350	3,5	100			2900	15,5	450
4	400				16	3150			
		450	4,5	110			3400	16,5	550
5	510				17	3700			
		570	5,5	120			4000	17,5	700
6	630				18	4400			
		700	6,5	140			4800	18,5	900
7	770				19	5300			
		840	7,5	150			5800	19,5	1100
8	920				20	6400			
		1000	8,5	160			7000	20,5	1300
9	1080				21	7700			
		1170	9,5	190			8500	21,5	1800
10	1270				22	9500			
		1370	10,5	210			10500	22,5	2500
11	1480				23	12000			
		1600	11,5	240			13500	23,5	3500
12	1720				24	15500			
		1850	12,5	280					

Abb. 13: Frequenzgruppenbreiten mit Grenzfrequenzen und Mittenfrequenz f_m (Zwicker & Fastl, 1999, S. 159)

wahrgenommen, wie ein 63 Hz Ton mit einem Pegel von 80 dB. In Abbildung 14 ist die über das Spektrum verteilte sehr verschiedene Lautstärkenwahrnehmung zu erkennen. Bei tiefen und hohen Frequenzen werden deutlich höhere Schalldruckpegel benötigt, um eine gleiche Lautheit zu erzielen. Wie Moore und Ruschkowski erörtern, ist die Form der Kurven gleicher Lautstärke stark von der gewählten Versuchsmethode abhängig (Moore, 2013, S. 133 ff.) (Ruschkowski, 2013). Die in Abbildung 14 gezeigten Kurven sind daher der Norm (DIN ISO 226) entnommen. Diese wurden in großangelegten Studien mehrerer Laboratorien erstellt und festgelegt. Wichtig für die Psychoakustik ist die Beobachtung, dass oberhalb der 40 phon Kurve eine Zunahme von 10 phon einer ungefähren Verdopplung der Lautheit entspricht (Maschke & Fastl, 2018).

Lautheit (loudness) Da die logarithmische Pegelskala in dB lediglich Auskunft gibt, ob ein betrachtetes Schallereignis lauter oder leiser als ein anderes ist, entwickelte S. S. Stevens das Potenzgesetz $L = kI^{0,3}$ und die Verhältnislautheit in sone (Moore, 2013, S. 133 ff.). Sone stellt im Gegensatz zu dB eine Ratio- bzw. Verhältnisskala dar. Diese besagt, dass eine Verdopplung des Sone-Werts einer Verdopplung der wahrgenommenen Lautstärke (Lautheit) entspricht. Die Lautheit besitzt nach wie

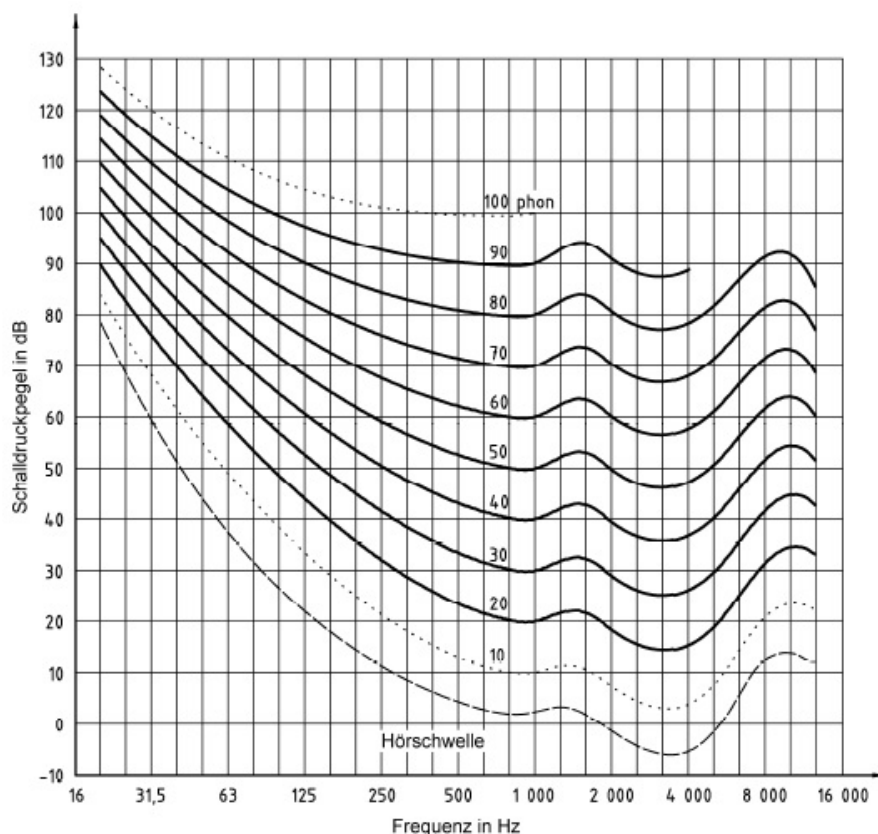


Abb. 14: Kurven gleicher Lautstärkepegel für reiner Töne im Freifeld (binaural, frontale Beschallung) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2006); Sowohl die 10 phon als auch die 100 phon Kurve sind aufgrund fehlender Labordaten punktiert dargestellt. Dennoch zeigen Diagramme anderer Autoren diese (z. B. Abbildung A.6 aus Zwicker und Fastl (1999, S. 204))

vor keine einheitliche Bezeichnung und findet sich als L, N oder S in der Literatur. (Ruschkowski, 2013) Im Verlauf dieser Bachelorthesis wird die Bezeichnung N nach DIN 45631 verwendet.

Abbildung 15 (S. 27) zeigt, welche Pegeldifferenz nötig ist, um eine Verdopplung der Lautheit herbeizuführen. Deutlich erkennbar ist der Zusammenhang einer Verdopplung der Lautheit und einem Zuwachs von 10 dB oberhalb 40 dB.

Gleichung 6 gibt die Berechnungsformel nach Norm für die Lautheit oberhalb 40 phon an (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1991).

$$N = 2^{0,1 \cdot (L_N - 49)} \quad [sone] \quad (6)$$

Der Referenzton (1 kHz) mit 40 dB ist mit einer Lautheit von 1 sone definiert. Dem Potenzgesetz und der Ratioskala folgend, entsprechen demnach 50 phon 2 sone, 60 phon 4 sone, 70 phon 8 sone usw. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 203 ff.). Umgekehrt kann die Lautheit N mithilfe folgender Gleichungen auch in Lautstärkepegel transformiert werden (DIN 45631).

$$\frac{L_N}{phon} = 40 + 33,22 \cdot \log \frac{N}{sone} \quad N > 1 sone \quad (7)$$

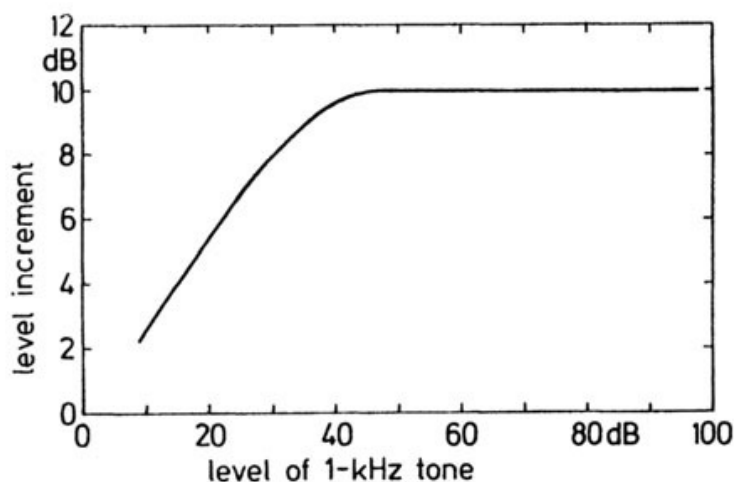


Abb. 15: Pegelzuwachs der für eine Verdopplung der Lautheit nötig ist (Zwicker & Fastl, 1999, S. 206)

$$\frac{L_N}{\text{phon}} = 40 \left(\frac{N}{\text{sone}} + 0,0005 \right)^{35} \quad N < 1 \text{ sone} \quad (8)$$

Auf die Lautheit haben neben dem Schalldruckpegel noch andere Faktoren einen Einfluss. So spielen spektrale Effekte eine große Rolle. Abbildung 16 (S. 28) zeigt mit durchgezogener Linie den Verlauf der Lautheit des Referenztons und in punktierter Linie die Lautheitsfunktion eines gleichmäßig anregenden Rauschens. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 206 f.) (Fastl, 1998, S. 136) Abbildung A.3 im Anhang verdeutlicht dies ebenfalls durch die Darstellung von Versuchsergebnissen zu Lautheitsvergleichen zwischen Sinuston und Breitbandrauschen. So wird ein Schallereignis lauter wahrgenommen sobald dessen Spektrum die Frequenzgruppenbreiten überschreitet (Fastl & Zwicker, 2007, S. 203 ff.) (Moore, 2013, S. 133 ff.) (Terhardt, 1998, S. 278 ff.). Ein Breitbandrauschen (z. B. rosa Rauschen) wird als dreimal so laut wahrgenommen wie ein einzelner (Sinus-)Ton (DIN 45631/A1 weist in einem Beispiel den Faktor vier zwischen rosa Rauschen und Sinuston nach). Anders beschrieben, benötigt ein Sinuston einen 15 dB höheren Pegel als ein Breitbandrauschen, um eine gleiche Lautheit zu erzielen. Ferner stellen zeitliche Eigenschaften einen Einfluss auf die Lautheit dar. So sind Töne erst ab einer Dauer von 100 ms bezüglich der Lautheit als stationär anzusehen. Darunter reduziert die Halbierung der Dauer die Lautheit um 3 phon. (Terhardt, 1998, S. 278 ff.) (Maschke & Fastl, 2018)

Einen zusätzlichen Einfluss auf die Lautheit stellt die monaurale oder binaurale Betrachtung von Schallereignissen dar. So sinkt die Lautheit bei gleichbleibender Schallstärke auf 70 bis 50 % der binauralen Lautheit, sobald eine monaurale Schallsituation eintritt (Terhardt, 1998, S. 280). Die Berücksichtigung dieses Effektes wird allerdings zu Beantwortung der gestellten Forschungsfrage vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass monaurale Situationen im Orchesteralltag nicht oder zumindest selten stattfinden.

Lautheitsmodelle (model of loudness) Mittels sogenannter Lautheitsmodelle versucht die Psychoakustik die menschliche Lautstärkenwahrnehmung zu quantifizieren. Im Idealfall sollte somit ein Lautheitsmodell die wahrgenommene Lautstärke, bezogen auf den Durchschnitt der Normalhörenden, korrekt präzisieren. Obwohl die komplexen Eigenschaften der Lautstärkenwahrnehmung nach wie vor

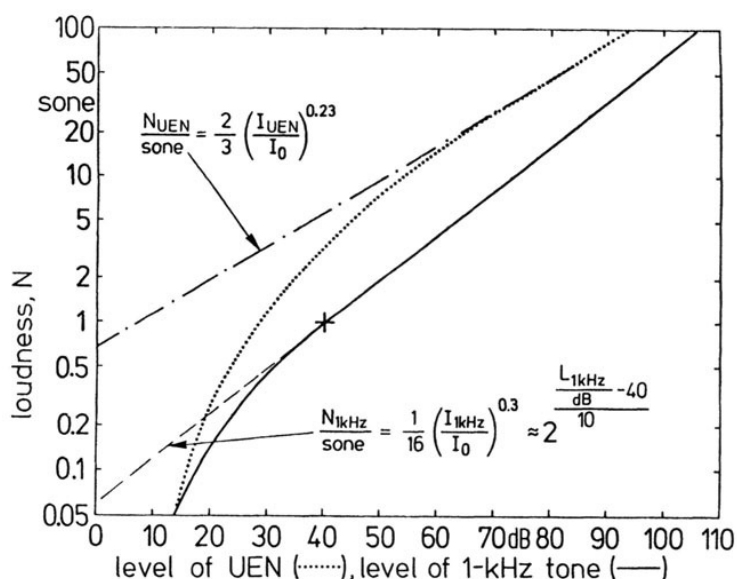


Abb. 16: Lautheitsfunktionen für 1 kHz Ton (durchgezogene Linie) und gleichmäßig angeregtes Rauschen (punktirt) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 207)

nicht gänzlich verstanden sind, wurden einige Modelle entwickelt. (Moore, 2013, S. 139) Abbildung 17 zeigt den schematischen Aufbau der häufigsten Lautheitsmodelle. Illustriert ist das Modell nach Moore et al., jedoch unterscheiden sich andere Lautheitsmodelle in der Regel nur in Reihenfolge und Umsetzung der Stufen (Moore, 2013, S. 139) (Ruschkowski, 2013).

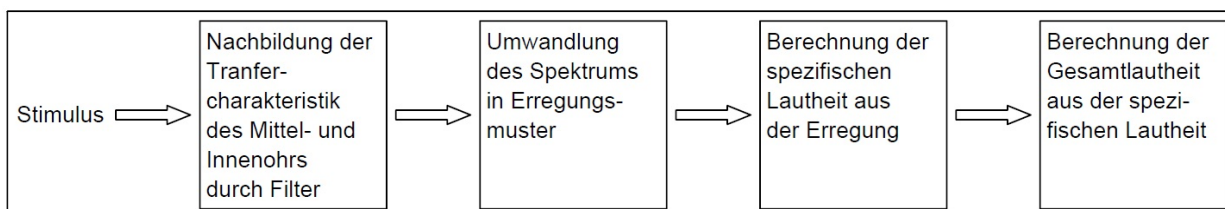


Abb. 17: Struktur des Lautheitsmodells nach Moore (2013, S. 140)

Vereinfacht dargestellt, wird ein Schallereignis zunächst nach Vorgabe der Barkskala zerlegt und anschließend wird für jede Frequenzgruppe der Frequenzgruppenpegel L_G ermittelt.

Im nächsten Schritt werden aus den Frequenzgruppenpegeln die Erregungspegel L_E erstellt. Mittels der Erregungspegel werden spektrale Verdeckungseffekten berücksichtigt. Dabei entspricht das sogenannte Erregungspegel-Tonheitsmuster vereinfacht den Mithörschwellenmustern (s. 2.2.3 Psychoakustik Verdeckung). (Fastl, 1998, S. 132) So wird berücksichtigt, dass ein Ton oder frequenzgruppenbreites Rauschen nicht nur die Basilarmembran im Bereich des Schallereignisses erregt, sondern auch benachbarte Bereiche gereizt werden (Ruschkowski, 2013). Die Kernerregung bezeichnet die Erregung innerhalb der Frequenzgruppenbreite, während die Erregungen außerhalb dieser als Flankenerregung definiert werden. Die Form und Steilheit der Flankenerregung orientiert sich an der Mithörschwelle von Schmalbandmaskierern (Terhardt, 1998, S. 280 ff.). Abbildung 18 (S. 29) zeigt das Erregungsmuster für ein frequenzgruppenbreites Rauschen mit Mittenfrequenz 1 kHz. Letztendlich entsteht für ein komplexes Schallereignis ein Erregungsmuster entlang der Barkskala und in den

Grenzen der Hörschwelle (s. Anhang Abbildung A.4).

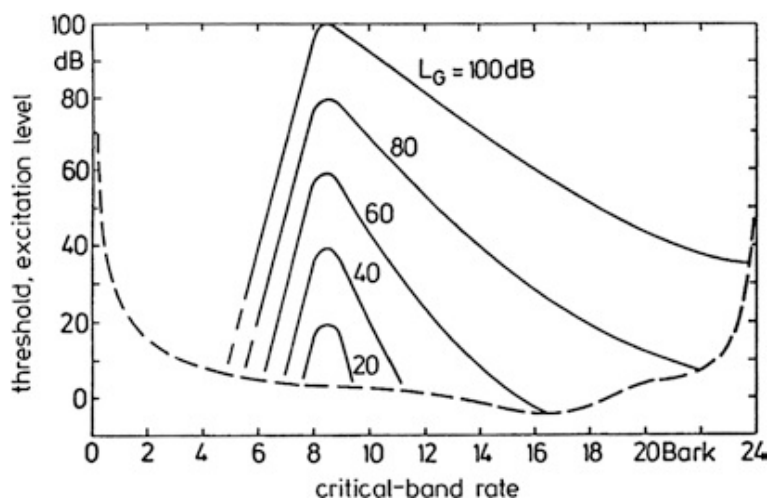


Abb. 18: Erregungsmuster eines frequenzgruppenbreiten Rauschens mit Mittenfrequenz 1 kHz (Zwicker & Fastl, 1999, S. 168)

Anschließend wird aus dem Erregungspegel-Tonheitsmuster die Zwischengröße spezifische Lautheit gebildet. Die spezifische Lautheit N' wird in $\frac{\text{some}}{\text{Bark}}$ angegeben und mittels einiger Formel berechnet. Der Inhalt der Fläche, die durch die spezifische Lautheit eingegrenzt wird, stellt die globale Lautheit (Gleichung 9) dar. Mathematisch wird dies durch das Integral der spezifischen Lautheit über die Tonheit z (Barkskala) ausgedrückt. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 220 ff.)

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz \quad [\text{some}] \quad (9)$$

Folgendes Beispiel soll dies veranschaulichen. Abbildung 19 (S. 30) zeigt in beiden linken Grafiken die Frequenzgruppenpegel L_G als Funktion der Tonheit z , während beide Schallereignisse einen Gesamtpegel von 64 dB (Rauschen: $50 \text{ dB} + (10 \cdot \lg 24) \text{ dB} = 64 \text{ dB}$) besitzen. Die Erregungsmuster sind in der Mitte dargestellt. Das gleichmäßig anregende Breitbandrauschen erzeugt über die gesamte Barkskala eine gleichmäßige Erregung, während das Schmalbandrauschen das oben erwähnte Muster erzielt (Abbildung 18). Die rechten Grafiken zeigen die spezifische Lautheit N' in $\frac{\text{some}}{\text{Bark}}$ beider Schallsignale und die schraffierte Fläche verdeutlicht die globale Lautheit N als Integral über die spezifischen Lautheit. Die Flächen stehen in direktem Zusammenhang mit der Lautheit. So bedeutet die viermal größere Fläche des Breitbandrauschens eine viermal so große Lautheit. Aus Verständlichkeitsgründen ist dieses Beispiel sehr vereinfacht (Filter für Transfercharakteristik etc. fehlen). (Fastl & Zwicker, 2007, S. 220–238) (Terhardt, 1998, S. 280–283) (Moore, 2013, S. 139 f.) (Fastl, 1998, S. 136 f.) Ausführliche Informationen, Berechnungsformeln (besonders spezifische Lautheit) und Versuchsergebnisse finden sich in genannter Literatur (besonders Fastl und Zwicker (2007)).

Nicht unerwähnt soll bleiben, dass die Verhältnislautheit *sone* nicht der einzige Skalierungsversuch zur Quantifizierung der Lautheit ist. Im Rahmen dieser Bachelorthesis sei diesbezüglich allerdings auf Ruschkowski (2013) verwiesen.

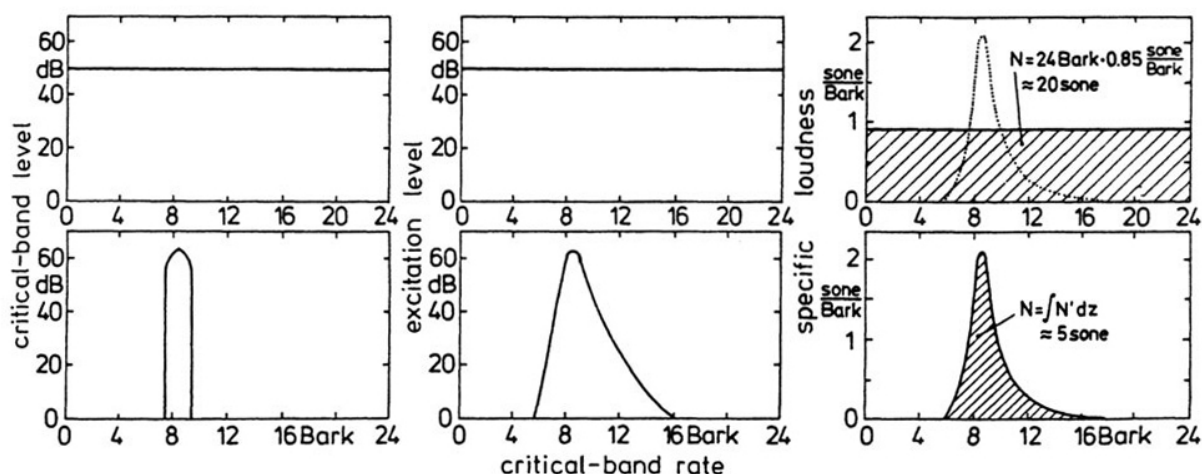


Abb. 19: Vereinfachte Darstellung des Lautheitsmodells nach Zwicker anhand eines Breitbandrauschens (gleichmäßig anregendes Rauschen) und eines frequenzgruppenbreiten Rauschens (1 kHz Mittenfrequenz) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 221)

Lautheitsmodell nach E. Zwicker bzw. DIN 45631/A1 Das Lautheitsmodell von Eberhard Zwicker für stationäre Schallereignisse bildet die Basis für das in vorliegender Arbeit verwendete Lautheitsmodell. Das Modell für stationäre Schalle ist in der deutschen Norm DIN 45631:1991 standardisiert und Zwicker entwickelte eine Erweiterung für zeitvariante Schallereignisse. Diese Erweiterung ist in der Änderung 1 festgelegt (DIN 45631/A1:2010). International ist das variante Verfahren in DIN ISO 532:2017 genormt und seit dem 13.12.2019 liegt die korrigierte Version der Norm zur öffentlichen Stellungnahme bis 13.02.2020 als Entwurf aus (E DIN ISO 532:2020; Nachfolgend wird diese Version zitiert). Die DIN ISO 532 unterteilt sich in DIN ISO 532-1 und DIN ISO 532-2. Der erste Teil enthält das Lautheitsmodell nach Zwicker sowohl für variante als auch für invariante Schalle und „basiert auf DIN 45631:1991 [...] [sowie] auf DIN 45631/A1:2010“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020). Der zweite Teil enthält das Moore-Glasberg-Verfahren für stationäre Schallereignisse. Letzteres wird in vorliegender Arbeit nicht behandelt. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1991) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)

Das Verfahren für zeitvariante Schallereignisse baut auf dem Verfahren für zeitinvariante Schalle auf und erhält zusätzlich Faktoren zur Berücksichtigung der Zeitvarianz. Die Lautheitsberechnung stationärer Schalle wird in beiden Normen durch eine manuelle Vorgehensweise beschrieben, da dies zur Verständlichkeit beiträgt und eine Softwareimplementierung konzeptionell ebenso vorgeht. Mithilfe gemessener Terzpegeldaten lässt sich anhand von Interaktionsdiagramme die Lautheit erstellen. Voraussetzung hierfür ist ein Klasse 1 Messsystem und ein Klasse 1 Terzbandfilter. Auf die detaillierte Vorgehensweise der Lautheitsbildung durch Diagramme wird hier verzichtet, jedoch werden die drei Verfahrensschritte inhaltlich beleuchtet. Schritt 1 berücksichtigt die Eigenschaft des Gehörs unterhalb von 300 Hz weniger sensitiv zu reagieren. Die jeweiligen Terzbandpegel werden dahingehend nach gegebenen Tabellenwerten reduziert. Schritt 2 berücksichtigt die bereits erwähnte Problematik, dass die Tonheitsskala (Frequenzgruppenbänder) durch Terzbänder angenähert werden muss. So entspricht oberhalb von 300 Hz die Frequenzgruppenbreite etwa der Terzbandbreite. Darunter müssen mehrere Terzbänder durch Leistungssumation vereint werden, um die nötige

Frequenzgruppenbreite zu erzeugen. Im dritten Schritt wird zuerst eine Unterscheidung in Diffus- oder Freifeld unternommen, gefolgt von der Erstellung des sogenannten Lautheitsprofils der spezifischen Lautheit über der Tonheit in Bark. Lautheitsprofile zeigen die Lautheiten pro Frequenzgruppenband und werden zu Analysezwecke verwendet. So stechen Frequenzgruppen hervor, die besonders zur Lautheit beitragen. Auch Maskierungen einzelner Frequenzbänder werden deutlich. Die Gesamtlautheit entspricht letztendlich der Fläche des Lautheitsprofils bzw. dem Integral über die spezifische Lautheit (s. 2.2.3 Psychoakustik Lautheit). Abbildung 20 (S. 32) zeigt ein Diagramm der manuellen Vorgehensweise mit eingezeichneten Lautheitsprofilen. Die durchgezogene, fette Linie stellt das Profil eines Geräusches dar. Das punktierte Profil ist die spezifische Lautheit eines 1 kHz Tons (8,5 Bark, 70 dB). Die senkrechten Flanken zur Linken und die abfallenden Kurven zur Rechten werden in den Normen nicht erläutert, entsprechen aber der Approximation der tatsächlichen Form der spezifischen Lautheit (s. Abbildung 19) (Fastl & Zwicker, 2007, S. 227, 233). Im gezeigten Profil des Geräusches ist bei dem Terzband mit Mittenfrequenz 630 Hz eine Verdeckung dieser Lautheitsanteile zu erkennen. Die spezifische Lautheit dieses Bands trägt durch Verdeckungseffekte nicht zur Gesamtlautheit bei, da der zugehörige Pegel unterhalb der Profilkurve liegt. Die Gesamtlautheit wird nun durch Erstellen eines zum Profil flächenäquivalenten Rechtecks erzeugt. Angedeutet ist dieses durch die horizontale gestrichelte Linie. Durch die beiden Skalen links und rechts des Diagramms ist die Lautheit ablesbar (24 sone, 86 phon). (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1991) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)

Das Verfahren für zeitvariante Schallereignisse wird aus der DIN ISO 532-1 zitiert, da diese detaillierter beschreibt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die ISO 532 auf der DIN 45631 basiert. Zusätzlich zum Verfahren invarianter Schalle müssen Effekte der Zeitstruktur berücksichtigt werden. Abbildung 21 (S. 33) zeigt das Blockdiagramm eines exemplarischen Messgeräts zur Erfassung varianter Schalle. Alle Recheneinheiten, die für zeitliche Effekte implementiert werden müssen, sind strichpunktiert umrandet. Die restlichen Komponenten entsprechen der Implementierung für invariante Lautheitsmesser. Die Norm verweist den Leser für genaue Erklärung der einzelnen Schritte auf den an die Norm angefügten Programmcode. Der Block NL beispielsweise nähert das nichtlineare Abklingverhalten der Ohren an. So fällt die Dämpfung nach kurzen Schallen steiler ab als nach langen. Außerdem wird der Effekt der sinkenden Lautheit bei kürzer werdender Dauer berücksichtigt (s. 2.2.3 Psychoakustik Lautheit). (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1991) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020) Für ausführlichere Informationen sei auf die genannten Normen verwiesen. Außerdem stützen sich diese in weiten Teilen auf das Buch: Psychoacoustics Facts and Models von Hugo Fastl und Eberhard Zwicker (2007).

Sowohl die ISO 532-1 als auch die DIN 45631/A1 enthalten einen Programmcode des Algorithmus für das Lautheitsmodell. Die ISO 532-1 sieht das angegebene Programm und beigefügte Testsignale als Prüfverfahren für (fremde) Implementierungen vor. Grenzen der spezifischen Lautheit, die gegenüber dem gegebenen Programm (ISO 532-1) einzuhalten sind, sind ebenfalls standardisiert.

Tonhöhenwahrnehmung (pitch perception) Die Tonhöhenwahrnehmung spielt in der „musikalischen“ Psychoakustik eine große Rolle und wird (in der abendländischen Musik) harmonische Ton-

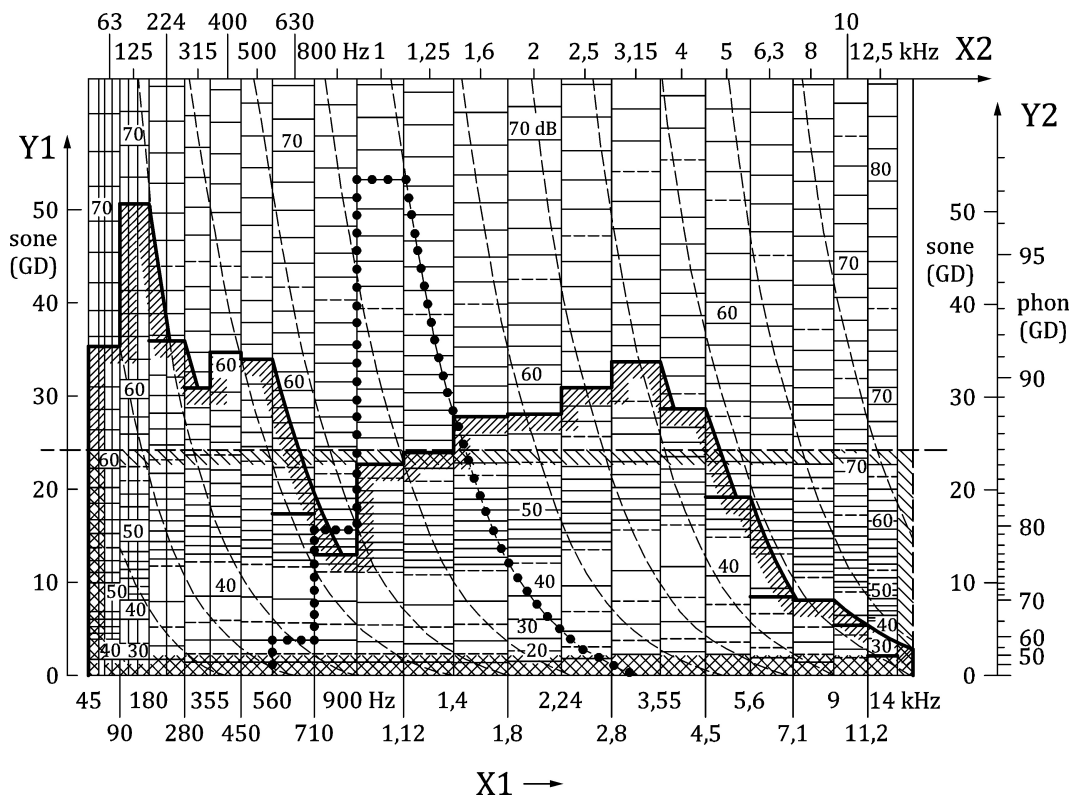


Abb. 20: Darstellung der Lautheitsprofile (spezifische Lautheit) für ein Rauschsignal (fett, durchgezogen) und einen Sinuston (70 dB, fett, gepunktiert); horizontale, gestrichelte Linie stellt die Gesamtlautheit dar (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)

höhe genannt. Wird die Tonhöhe um eine Oktave erhöht so steigt die Frequenz um das Doppelte an. (Maschke & Jakob, 2018)

Die „technische“ Psychoakustik erzeugt durch Tonhöhenhalbierungen und Verdopplungen gänzlich verschiedene Zusammenhänge der Tonhöhe. Diese wird in Abgrenzung zur harmonischen Tonhöhe als Verhältnistonhöhe (ratio pitch) bezeichnet. (Maschke & Jakob, 2018) Die Verhältnistonhöhe wird als Tonheit z in der Einheit mel abgebildet und Zwicker definierte $125 \text{ Hz} = 125 \text{ mel}$ als Referenzwert (Fastl & Zwicker, 2007, S. 111 ff.). Neben der Frequenz, kann der Schalldruckpegel, wenn auch in geringem Maße, die Tonhöhe beeinflussen. Größere Tonhöhenverschiebungen werden durch die Anwesenheit anderer Töne oder Geräusche erzeugt. (Maschke & Fastl, 2018) Aufgrund der Kongruenz zwischen der Tonheit z und der Bark-Skala, entsprechen 100 mel 1 Bark (Maschke & Jakob, 2018).

Die Tonhaltigkeit (pitch strength), die Ausprägtheit der Tonhöhe oder Tonalität gibt an wie tonal ein Schallereignis ist. Sinustöne werden als stark tonal bzw. mit großer Tonhaltigkeit wahrgenommen, während Rauschsignale eine geringe Tonalität besitzen. Schallereignisse (ungewollter Art) mit ausgeprägter Tonhöhe gelten als besonders lästig (Maschke & Jakob, 2018), während in der Musik eine starke Tonalität angestrebt wird (Roederer, 2000, S. 6 f.). Genormt ist die Tonhaltigkeit in der DIN 45681.

Schärfe (sharpness) Ausschlaggebend für die Schärfe sind das Spektrum eines Schallereignisses und die Mittenfrequenz bei schmalbandigen Geräuschen. Die Lautheit und Pegelanstiege sind bei

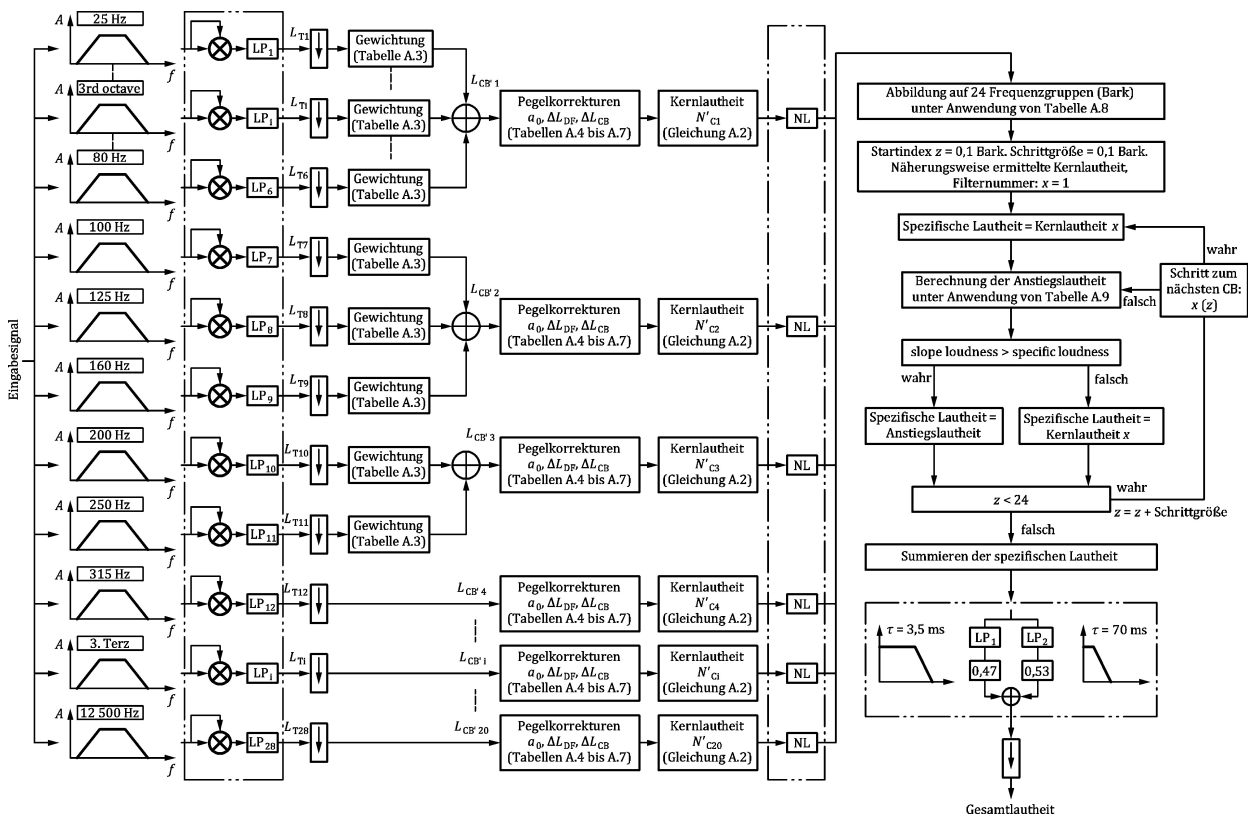


Abb. 21: Blockschaltbild zur Implementierung varianter Schallereignisse (strichpunktierte Komponenten kommen durch Zeitvarianz hinzu) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)

Betrachtung der Schärfe nachrangig, so verdoppelt sich die Schärfe lediglich bei einem Anstieg von 30 dB auf 90 dB. Die Schärfe von 1 acum wird einem Schmalbandrauschen mit einer Mittenfrequenz von 1 kHz und einem Schalldruckpegel von 60 dB attribuiert. (Maschke & Jakob, 2018) Je mehr hochfrequente Schallanteile in einem Ereignis enthalten sind, desto schärfer wird jenes in der Regel wahrgenommen (Maschke & Fastl, 2018). Die Schärfe ist unter Aufzählung verschiedener Berechnungsverfahren in DIN 45692 genormt.

Rauigkeit (roughness) Werden zwei Töne gleichzeitig wahrgenommen deren Amplituden gleich und deren Frequenzen (f_1, f_2) leicht unterschiedlich sind, wird zuerst eine Schwebung wahrgenommen. Es wird ein Ton mit einer Frequenz von $f = f_1 + \Delta f/2$ und einer Lautheitsschwankung hörbar. Rauigkeit tritt an Stelle der Schwebung, wenn der Frequenzunterschied beider Töne circa 15 Hz überschreitet. (Maschke & Jakob, 2018) Wird der Frequenzabstand größer, beginnen sich beide Frequenzen hörbar zu trennen. Physiologisch resoniert die Basilarmembran nicht mehr nur an einer Stelle, sondern wird zweifach angeregt und zwei Wahrnehmungssignale entstehen. Jedoch bleiben die getrennten Töne als rau wahrnehmbar, solange der Frequenzunterschied die Frequenzgruppenbreite nicht überschreitet. Erst nach Überschreitung der Breite klingen beide Töne glatt bzw. rein. (Roederer, 2000, S. 38–43) Bei künstlichen Stimuli tritt Rauigkeit durch Frequenz- und Amplitudenmodulation auf. Der Rauigkeit wird die Einheit asper zugeschrieben. 1 asper definiert sich durch einen 1 kHz Referenzton mit einem Pegel von 60 dB, einer Modulationsfrequenz von 70 Hz und einer Amplitudenmodulation von 1. (Maschke & Fastl, 2018) Abbildung 22 (S. 34) veranschaulicht erwähnte Effekte.

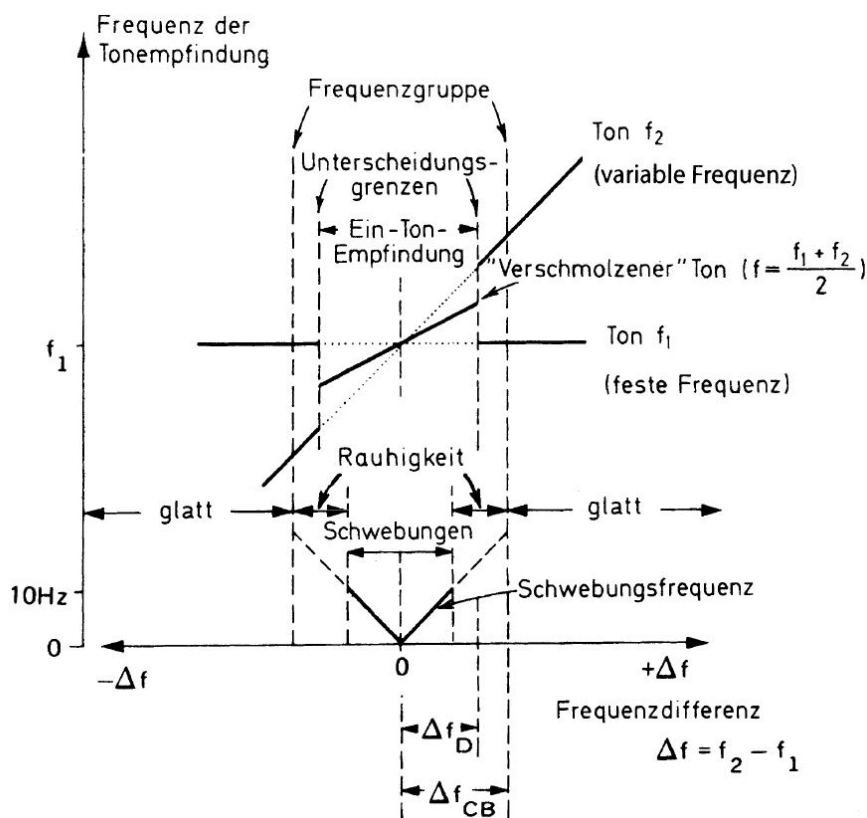


Abb. 22: Grafische Darstellung der Schwebung und Rauigkeit (Roederer, 2000, S. 40)

Schwankungsstärke (fluctuation strength) Die Schwankungsstärke bezeichnet den Effekt wahrnehmbarer Fluktuationen, die bei amplituden- oder frequenzmodulierten Schallen mit Modulationsfrequenz kleiner 20 Hz entstehen. Diese Fluktuationen entsprechen Schwankungen der Lautheit und wurden bereits im Abschnitt zuvor (Rauigkeit) als Lautheitsschwankung eingeführt. Die Schwankungsstärke wird in der Einheit vacil dargestellt und erhält als Referenzschall mit 1 vacil einen 1 kHz Ton mit 60 dB, einem Modulationsgrad von 1 und einer Frequenzmodulierung von 4 Hz. (Maschke & Fastl, 2018; Maschke & Jakob, 2018) In der Musik werden Fluktuationen überwiegend als verstimmte Töne wahrgenommen, während die Rauigkeit als Ursache von musikalischer Dissonanz betrachtet wird (Terhardt, 1998, S. 400 f.).

Klanghaftigkeit (tonality) Die Klanghaftigkeit beschreibt die tonalen Anteile eines Schallereignisses. Ein Geräusch setzt sich, wie Maschke und Jakob zitieren, aus tonalen und nicht-tonalen Anteilen zusammen. Sofern es sich nicht um Musik handelt, charakterisieren die tonalen Bestandteile ein Schallereignis überwiegend als unangenehm. Die Klanghaftigkeit in der Einheit tu (tonality unit) ergibt sich nach Berücksichtigung von Verdeckung, Bandbreite, Frequenz und Lautheit aus dem Pegel der tonalen Anteile. Ein 1 kHz Ton mit einem Schalldruckpegel von 60 dB stellt den Referenzton für 1 tu. Ausschlaggebend in der Berechnung sind die aus dem Frequenzspektrum des Schallereignisses hervorstechenden schmalbandigen Rauschanteile und Frequenzen. (Maschke & Jakob, 2018)

Die Größen Klanghaftigkeit, Rauigkeit und Schwankungsstärke sind in keiner Norm standardisiert.

Subjektive Dauer (subjective duration) und Rhythmus (rhythm) Besonders bei kurzen Schallimpulsen weicht die subjektiv empfundene Dauer erheblich von der tatsächlichen (physikalischen) Dauer ab. Die Dauer eines Impulses muss für eine wahrgenommene Verdoppelung von 10 ms nicht auf 20 ms sondern 32 ms erhöht werden. Dieses Prinzip gilt bis etwa 300 ms. Darüber unterscheidet sich die physikalische Dauer nicht mehr von der wahrgenommener Dauer. Deutlich stärker bemerkbar ist die subjektive Dauer von Schallereignissen, wenn Impulse mit Pausen abgewechselt werden. So benötigt eine Schallpause eine Länge von 400 ms um gleich lang wahrgenommen zu werden wie ein 100 ms Impuls. Diesen Effekt verdeutlicht Abbildung 23 anhand eines musikalischen Rhythmusbeispiels. Dargestellt ist eine Folge von Tönen und Pausen (a) und deren musikalischen Dauern durch schwarze und weiße Balken (b). Die nötigen (physikalischen) Ton- und Pausenlängen, um den Rhythmus subjektiv korrekt darzustellen, sind in (d) angezeichnet. Das Mithörschwellen-Zeitmuster und die dazugehörigen Breiten (schraffiert) sind in (c) gezeigt. Die Doppelpfeile (10 dB über der Hörschwelle) deuten die in (b) dargestellten, subjektiven Dauern der Schalle und Pausen für den korrekten Rhythmus an. (Fastl, 1998, S. 141 ff.)

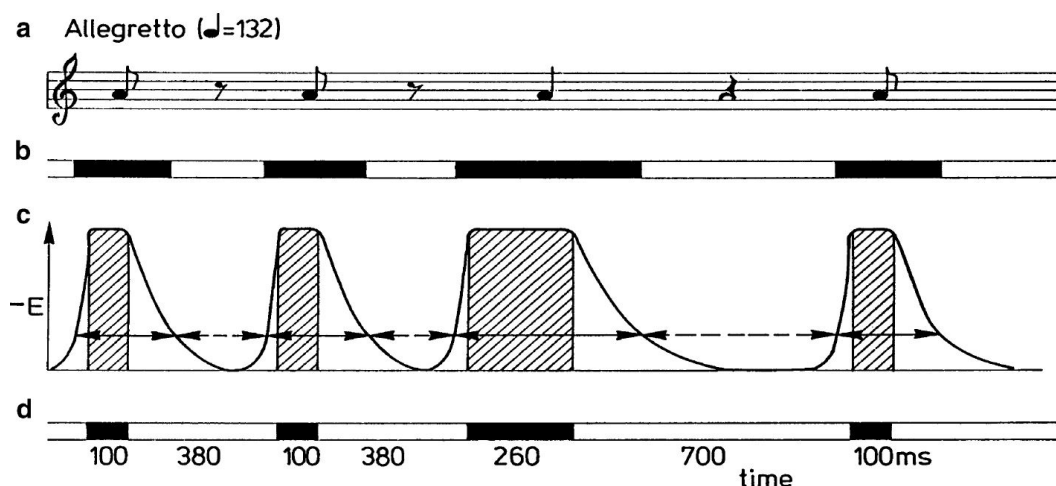


Abb. 23: Darstellung der subjektiven Dauer anhand eines musikalischen Beispiels (Maschke & Fastl, 2018)

Komplexe psychoakustische Parameter

Wohlklang (pleasantness) und Lästigkeit (annoyance) H. Fastl zitiert Terhardt und stellt die Lästigkeit dem Wohlklang gegenüber. Beide Empfindungsgrößen sind stark individuell und neben dem akustischen Erlebnis von persönlichen Rahmenbedingungen (Einstellung zur Schallquelle, etc.) geprägt. (Fastl, 1998, S. 146)

So hängt der Wohlklang von den psychoakustischen Parametern der Schärfe, Rauigkeit, Lautheit und Klanghaftigkeit ab. Negativ auf den Wohlklang wirkt sich eine Zunahme der Schärfe, der Rauigkeit und der Lautheit aus, während der Zuwachs an Klanghaftigkeit als positiv gilt. (Maschke & Jakob, 2018) Letzteres steht im Widerspruch mit eben erwähntem (s. Klanghaftigkeit, Tonhöhenwahrnehmung). Dies merkt H. Fastl ebenfalls an und folgert, dass Wohlklang und Lästigkeit nur bedingt Gegensätze darstellen (Fastl, 1998, S. 146).

Lästigkeit wird meist mit Schwankungstärke, Schärfe, Rauigkeit, Tonalität und Lautheit verbunden

und wird in akustischen Versuchen quantifiziert. Die Lästigkeit wird in unbeeinflusste und psychoakustische Lästigkeit unterschieden. Die unbeeinflusste Lästigkeit gibt die Reaktion einer Person auf ein Schallereignis wieder. Unter Laborbedingungen wird erreicht, dass die Versuchsperson keinen Bezug zur Schallquelle hat. Aufgrund des wesentlichen Zusammenhangs zwischen Tätigkeit und Lästigkeit (z. B. Einschlafen und Lesen) wurde in Versuchen die Lautheit als relevantester Parameter zur unbeeinflussten Lästigkeit ermittelt. Die psychoakustische Lästigkeit evaluiert die Lästigkeit technischer Geräusche (Säge, Maschine, etc.). Bedeutend sind hier die Parameter Schärfe, Lautheit, Schwan- kungsstärke und Rauigkeit (Maschke & Jakob, 2018).

Binaurales Hören (binaural hearing) Binaurales Hören und einhergehende binaurale Messtechnik wird mittels Kunstkopfmesstechnik häufig in der Psychoakustik eingesetzt. Im Folgenden wird kurz auf die wesentlichen Aspekte des binauralen Hörens eingegangen.

Beidseitiges Hören stellt die Grundlage für Schallquellenlokalisierung und geschieht durch die Auf- schlüsselung von Intensitäts- und Zeitdifferenzen beider Ohren. Folgen zwei Schallsignale knapp auf- einander wird der Schallquellenort durch die zuerst eingetroffenen Schallwelle bestimmt. (Maschke & Jakob, 2018) Derart knapp aufeinander folgende Schallsignale kommen beispielsweise als Reflexio- nen vor und spielen besonders in der Raumakustik eine Rolle (Fuchs, 2017, S. 206 f.).

Als Lateralisation (lateralization) wird ein Effekt bezeichnet, der meist im Labor durch Kopfhörer er- zeugt und untersucht wird. Das Schallbild scheint „im Kopf“ auf einer Geraden zwischen beiden Ohren abgebildet zu sein. Dieser Eindruck wird zwischen den Signalen der Kopfhörerhälften mittels Unter- schiede der Intensität (Intensitätsdifferenzen) und der Zeit (Zeitdifferenzen) erzeugt. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 308 f.)

B. Moore bezeichnet die Lateralisation als die „Laborversion“ der Lokalisation (localization), die al- le drei Raumdimensionen statt nur einer umfasst. Der Ort einer Schallquelle lässt sich durch Richtung und Distanz definieren. Zur Beschreibung der Richtung wird üblicherweise ein Koordinatensystem mit Mittelpunkt in Kopfmittte verwendet. Abbildung A.5 im Anhang illustriert diese mit Horizontalebene, Me- dianebene und Frontalebene (nicht beschriftet). Die eindeutige Richtungszuweisung im Raum erfolgt mittels der beiden Winkel Azimut φ und Elevation δ sowie der Distanz r . (Moore, 2013, S. 245)

Physiologisch bestimmt das Ohr die Richtung durch die bereits erwähnten Effekte Zeitdifferenz und Intensitätsdifferenz bzw. Pegeldifferenz. Diese Differenzen ergeben sich durch den Kopf als räum- licher Abstand der Ohren. Niedrige Frequenzen mit Wellenlängen größer als der Kopfdurchmesser beugen sich um diesen und die Phasenlage wird erkannt (Zeitdifferenz). Sobald die Schallwellenlän- gen klein genug werden, sodass der Kopf einen Schallschatten wirft, nehmen die Ohren die Intensitäts- bzw. Pegelunterschiede wahr. (Maschke & Jakob, 2018)

Darüber hinaus entstehen bei binauraler Betrachtung eigene Verdeckungseffekte, die detailliert unter anderem in Fastl und Zwicker (2007) sowie Ziemer (2020) erörtert werden. Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird jedoch nicht darauf eingegangen.

Wie erwähnt, verwendet die psychoakustische Messtechnik häufig einen Kunstkopfmesssystem. Klaus Genuit äußert, dass derartige zweikanalige Messsysteme unter anderem eine Beurteilung von Schallsituation durch Kombination von wahrgenommenen Parametern und örtlichen Effekten zulassen (Genuit, 1998, S. 149 ff.). Weiter „können mit der binauralen Meßtechnologie alle Anwendungen

erfaßt werden, jedoch ist ein solcher Aufwand nicht zwingend in jeder Beschallungssituation erforderlich“ (Genuit, 1998, S. 156). Davon ausgehend, dass kein erheblicher Mehrwert beim Vergleich der pegelbasierten Messgrößen und der Lautheit erreicht werden würde, wurde auf solch Technologie im Rahmen vorliegender Arbeit verzichtet.

2.3 Diskussion der Grundlagen

Wie zu Beginn erläutert, wird mithilfe der Grundlagen untersucht, ob die psychoakustische Lautheit und das Modell nach E. Zwicker bzw. DIN 45631/A1 grundsätzlich zur Messung von Musik geeignet sind. Die Norm (DIN 45631/A1) postuliert, dass „das Verfahren [...] prinzipiell zur Berechnung der Lautheit sämtlicher zeitvarianter Geräusche geeignet [ist]“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010). Weiter aber liegt „die Beurteilung der schädigenden Wirkung von Schallereignissen [...] nicht im Anwendungsbereich dieser Norm“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010). Dennoch ist es wichtig zu erörtern, ob beispielsweise Geräuschcharakteristika Einfluss auf die Lautheitsberechnung nehmen. So gelten unter anderem die Tonhaltigkeit und die Schärfe als Parameter der Lästigkeit, die jedoch in der Musik erwünscht oder beabsichtigt sein können. Um eine Messung der Musik mithilfe der Lautheit zu ermöglichen, sollten deshalb in die Kalkulation der Lautheit keine derartigen Parameter einbezogen werden. Wie die Theoriebetrachtung zeigen, berücksichtigt das Lautheitsmodell nach Zwicker neben dem Schalldruckpegel nur die spektrale Zusammensetzung, Verdeckungseffekte sowie die zeitliche Struktur und die Transfercharakteristik der audiologischen Anatomie. Da diese Aspekte physiologische Eigenschaften beschreiben, ist prinzipiell das Lautheitsmodell für die Messung im Sinfonieorchester geeignet. Ferner wurden keine Gründe in zitierter Literatur gefunden, die eine Anwendung in lauten Umgebungen oder im Orchester ausschließen. Ein Fehlen an epidemiologischen Grenzwerten der Messgrößen Lautheit, erklärt warum die Norm eine Beurteilung der schädigenden Wirkung ausschließt.

Im Kapitel der gesundheitlichen Folgen von Lärm wurde aufgeführt, dass gerade durch Schallbelastung ausgelöste extra-aurale Beeinträchtigungen sehr von individuellen und psychologischen Aspekten abhängen. Daher ist eine möglichst korrekte Beurteilung der Schallquelle und der einhergehenden Lautheit wichtig.

3 Methodik

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Methoden aufgezeigt, die beitragen die Forschungsfrage zu beantworten und die These zu bearbeiten. Vorliegende Arbeit verwendet sowohl eine explorative Literaturrecherche, als auch Messungen. Im ersten Gliederungspunkt wird die Methodik der Literaturrecherche erläutert, gefolgt von der Methodik der Messungen.

3.1 Methodik der Recherche

Die These, dass überwiegend schalldruckbasierte Messgrößen zur Beschreibung der Schallbelastung in sinfonischen Orchestern verwendet werden, soll eine systematische Literaturrecherche beantworten. Primär wurde die Datenbank Scopus zur Findung relevanter Literatur verwendet. Besonders in Journalen und Fachgesellschaften wie der Acoustical Society of America, Scandinavian Audiology, der Canadian Acoustical Association, Noise & Health, Medical Problems of Performing Artists, International Journal of Audiology, aber auch der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), fanden sich themenrelevante Artikel. Über die Kooperationen der Universitätsbibliothek, teils durch frei zugängliche Artikel und über Reseach Gate wurden die Volltexte eingesehen. Weitere Quellen wurden über Scopus hinaus nach dem Schneeballprinzip sowohl „rückwärts“ als auch „vorwärts“ gesucht. So wurde Literatur aus den Literaturverzeichnissen verwendet und Artikel gesichtet, die bereits gefundene Publikationen zitieren. Dies führte unter anderem zu deutschsprachigen Fachartikeln.

In der Datenbank Scopus wurde eine umfangreiche systematische Literaturrecherche zur Bearbeitung der These durchgeführt. Da Keyword-basiert gesucht wurde, half ein iterativer Prozess aus mehreren Teilsuchen zur Sammlung der relevanten Schlüsselwörter. Diese Schlüsselwörter wurden in Scopus eingegeben und in „Article title, Abstract, Keywords“ gesucht. Insgesamt stellten sich 6 Themenaspekte heraus, die in Tabelle 1 (S. 40) aufgelistet sind. So stellen die Betroffenen bzw. die Orte (Aspekt 1) und die Begrenzung auf Musik (Aspekt 2) die Grundlage dar. Die Lärmbelastung (Aspekt 3), der Schalldruckpegel (Aspekte 4), die Lautheit (Aspekt 5) und der verursachte Schaden (Aspekt 6) komplettieren die Suchstrategie. Für jeden Aspekt wurde im weiteren Vorgehen englischsprachige Begriffe und deren Synonyme gesucht. Schlüsselwörter vorhergegangener Suchanfragen und Bezeichnungen aus deren Ergebnissen, Fachvokabular aus bereits gesichteter Literatur, Englischwörterbücher (Pons, Linguee) sowie Thesauren wurden zur Findung der Keywords herangezogen.

Die Aspekte 1 und 2 schränken die Ergebnisse möglichst auf klassische Musik bzw. sinfonische Orchester ein. In Aspekt 2 musste das Schlüsselwort “music” hinzugenommen werden, da sich die übrigen als zu spezifisch herausstellten. Der Aspekt 3 umfasst das Themengebiet der Lärmbelastung bzw. Schallbelastung. Einige Schlüsselwörter wurden eingebunden, da sie in gefundener Literatur als Keywords verwendet wurden. Durch Schlüsselwörtern wie “dose”, das teilweise bei verwendeter Literatur als Keyword angegeben wurde, expandierte die Suchweite, auch auf fachfremde Gebiete, deutlich. Aspekt 4 schließt Begriffe des Schalldruckpegels ein. Dies wurde vorgenommen, da zu erwarten war, dass Studien den Schalldruckpegel im Orchester beschreiben könnten ohne einen Zusammenhang zur Schallbelastung herzustellen. Aspekt 5, in dem die englischsprachige Terminologie der psy-

choakustischen Lautheit enthalten sind, soll Studien finden, die die Lautheit ohne Zusammenhang mit der Schallbelastung verwenden. Aspekt 6 beinhaltet Gehörschäden und akustische Traumata. Dieser Aspekt wurde hinzugezogen, da einige Studien Messungen im Orchester zur Untersuchung der Kausalität zwischen Musikexposition und Gehörschaden vornehmen.

Alle Schlüsselwörter eines Aspekts wurden in Scopus eingegeben und jeweils mit einem OR-Operator verbunden. Die Ergebniszahlen dieser sechs Suchen sind in der Tabelle 1 in der Spalte eines jeden Aspekts aufgeführt. Anschließend wurden je drei Aspekte mit dem booleschen Operator AND zu vier spezifischen Suchen verknüpft. Aspekte 1 und 2 waren in jeder Suche enthalten. Tabelle 2 (S. 41) zeigt diese Kombinationen und die jeweiligen Trefferzahlen. Diese Kombinationen wurden gewählt um Übersichtlichkeit und thematische Abgrenzung herzustellen. Wichtig war beispielsweise Aspekte 4 und 5 nicht mit AND zu verbinden, da dies nur Studien zeigen würde, die sowohl Schalldruckpegelbegriffe als auch Lautheitsbegriffe enthalten.

In einem ersten, groben Selektionsschritt wurden die Ergebnisse der einzelnen Recherchen limitiert und einige Themengebiete exkludiert. Tabelle 3 (S. 41) stellt die einzelnen Einstellungen dar, mithilfe derer die Ergebnisse eingeschränkt wurden. Tabelle 2 wiederum zeigt in der dritten Spalte (Auswahl 1) die verbliebenen Trefferzahlen. Jegliche Einschränkungen bzw. Ausschlüsse wurden nur getätigt, wenn keine der vom Ausschluss betroffenen Studien themenbezogen war. Dazu waren in eindeutigen Fällen die Titel ausreichend, obschon wurde meist der Abstract und häufig auch der Artikel selbst eingesehen. Die große Senkung der Trefferzahlen lässt sich zum Teil auf Mehrdeutigkeiten der Schlüsselwörter zurückführen. So ist zum Beispiel loudness der englische Fachbegriff für die Lautheit. Dieser wird im Englischen jedoch auch für Lautstärke verwendet und ist nicht spezifisch der Psychoakustik zuzuordnen. Unter anderem neurowissenschaftliche Themen, Artikel der Otologie, Lautstärke-bezogene Studien der Musikwissenschaften, Themen der Musikproduktion und musikpsychologische Artikel wiesen ebenfalls gewählte Schlüsselwörter auf. Letztendlich ließen sich nicht alle themenfremde Ergebnisse systematisch durch Ausschlüsse oder AND NOT Operatoren entfernen.

Dieser Umstand forderte ein nächste Einschränkung (Tabelle 2 Auswahl 2), die manuell durchgeführt wurde. Alle verbliebenen Ergebnisse der vier Suchen wurden nach themenrelevanten Artikel systematisch gesichtet. Dazu wurden die Ergebnisse nach Titel, Abstract und Inhalt untersucht und bei Themenzugehörigkeit in einer einzigen Scopusliste gespeichert. Da die Recherchen gemeinsame Schnittmengen besitzen, schließt diese Zusammenfassung die Mehrfachnennung eines Artikels aus. Ausgewählt wurden Artikel, welche die Schallbelastung im Orchester oder von klassischen Musiker/-innen messen, ferner auch Quellen mit Bezug zu Gehörschäden. Schließlich stellten sich 152 Studien heraus, deren Inhalt überprüft wurden. Zuerst wurden die vorhandenen Reviews eingesehen und ausgewertet. Einzig die Online-Verfügbarkeit galt als Einschränkung. Die verbliebenen Publikationen wurden strenger aussortiert und der Fokus lag auf der Messung der Schallbelastung im professionellen und sinfonischen Orchester. Die online Verfügbarkeit der Artikel stellte wiederum die letzte Einschränkung dar.

Im Kapitel 4 ab der Seite 43 werden insgesamt 10 Reviews und 31 Publikationen beleuchtet und ausgewertet.

Tab. 1: Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Aspekte

Aspekt 1	Aspekt 2	Aspekt 3
orchestra*	“symphonic music”	“noise pollution*”
“Orchestra pit”	“symphonically music”	“noise exposure*”
“orchestra* musician*”	“symphony music”	“noise impact*”
musician*	“symphonious music”	“acoustic emission*”
“classical musician*”	“classical music”	“noise dosimetry”
instrumentalist	music	“control of noise*”
“orchestra stage”		“acoustic noise*”
“classical artist*”		“noise\$dosage*”
		“exposure level*”
		“sound impact*”
		“noise emission”
		“noise level*”
		“noise dose”
		“sound pollution*”
		dose
		“music exposure”
		“noise measurement”
		“sound exposure”
Treffer: 57 045	Treffer: 128 615	Treffer: 2 468 584
Aspekt 4	Aspekt 5	Aspekt 6
“sound pressure level*”	“loudness level”	“hearing loss*”
“acoustic pressure level*”	“loudness function”	“hearing impairment*”
“sound-level”	loudness	“hearing damage*”
“sound pressure”	“model of loudness”	audiometry
“pressure level*”	“loudness meter*”	“noise injury”
“acoustic pressure”	“loudness measurement”	“hearing disorder”
“a\$weighting”	psychoacoustic*	“noise injuries”
“sound\$intensity”		“hearing defect*”
volume		“impaired hearing”
weighting		“loss of hearing”
		“ear injury”
		“haring loss risk”
Treffer: 2 151 462	Treffer: 20 273	Treffer: 151 611

Tab. 2: Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Ergebnisse

Suchkombination	Treffer	Auswahl 1	Auswahl 2
Suche 1 AND 2 AND 3	226	178	84
Suche 1 AND 2 AND 4	489	171	51
Suche 1 AND 2 AND 5	272	164	23
Suche 1 AND 2 AND 6	410	289	106

Tab. 3: Recherchestrategie für die Datenbank Scopus - Auswahl 1

Suche 1 2 3	
Formatbeschränkung	Article, Conference Paper, Review, Conference Review
Sprachbeschränkung	English, German
Keyword Ausschluss	Room Acoustics; Reverberation Time; Computer Simulation; Distortion Product Otoacoustic Emission; Acoustic Emissions; Anxiety; Auditory Cortex; Electroencephalography; Musical Performance
Suche 1 2 4	
Formatbeschränkung	Article, Conferencepaper, Review, Conferencereview
Sprachbeschränkung	English, German
Subject Area Ausschluss	Computer Science; Neuroscience; Nursing; Mathematics; Biochemistry, Genetics and Molecular Biology; Materials Science; Social Sciences; Health Professions
Suche 1 2 5	
Formatbeschränkung	Article, Conferencepaper, Review, Conferencereview
Sprachbeschränkung	English, German
Subject Area Ausschluss	Neuroscience; Nursing; Chemical Engineering
Suche 1 2 6	
Formatbeschränkung	Article, Conferencepaper, Review, Conferencereview, Short Survey
Sprachbeschränkung	English, German
Subject Area Ausschluss	Biochemistry, Genetics and Molecular Biology; Computer Science; Neuroscience; Nursing

3.2 Methodik der Messung

Die Forschungsfrage, inwiefern eine Lautheitsbetrachtung Schallereignisse im Sinfonieorchester wahrnehmungsgetreuer abbildet als eine pegelbasierte Messgröße, wurde mittels pegelbasierter und psychoakustischer Messungen untersucht. In exemplarischen Situationen (s. Kapitel 6) wurden die pegelbasierten Messgrößen sowie die Lautheit nach E. Zwicker bzw. DIN 45631/A1 bestimmt. Die Wahl fiel auf dieses Modell, da es mit am weitesten verbreitet ist und Eingang in die deutsche sowie internationale Normung fand. Da die üblichen bewerteten Schalldruckpegelgrößen kritisch zu hinterfragen sind und davon auszugehen ist, dass diese das menschliche Gehör nicht adäquat abbilden können, wurde die psychoakustische Lautheit hinzugezogen. Das Lautheitsmodell versucht die Komplexität des menschlichen Gehörs zu parametrisieren. Gelingt dies, wäre die Lautheit eine besser geeignete Messgröße zur Bestimmung der Schallbelastung im Orchester. Daher wird versucht pegelbasierte Messgrößen und die psychoakustische Lautheit in Zusammenhang zu bringen, um Rückschlüsse auf die Validität der Messwerte ziehen zu können. Eine qualitative Beurteilung der verwendeten Messgrößen wird durch Betrachtung der psychoakustischen Theorie, Diskussion der Literatur und Auswertung der Messergebnisse erzielt.

4 Ergebnisse der Literaturrecherche

Im folgendem Kapitel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche aufgeführt. Es gilt die These zu belegen, dass bereits durchgeführte Studien überwiegend pegelbasierte Messgrößen verwendet haben.

4.1 Literatur: Review-Paper

Literaturreviews fassen bis zum Erstellungszeitpunkt der jeweiligen Publikation den aktuellen Stand zusammen und dienen als Überblick bzw. Einstieg. Tabelle 4 (S. 47) stellt die betrachteten Review-Papers dar und gibt Autoren und Veröffentlichungsjahr, Sprache, Anzahl der betrachteten Studien, verwendete Datenbanken sowie die aufgeführten Messgrößen an. Die aufgelisteten Quellen sind dem Erscheinungsjahr nach sortiert. Um einen möglichst ganzheitlichen Überblick zu erlangen, werden auch tangierende Themen der Schallbelastung im Orchester angesprochen. Die häufig verwendeten Verfahren werden aufgezeigt, gleichwohl der Fokus auf den Messgrößen der Schallbelastung liegt.

1994 veröffentlichte S. L. Palin das erste hier beschriebene Review. In diesem werden Publikationen im Zeitraum von 1960 bis 1991 aufgezeigt. Die zitierten Studien verwendeten unbewertete und bewertete Schalldruckpegelgrößen in dB und dB(A), abgesehen von einer Studie, die ihre Ergebnisse in der Einheit DIN-Phon angibt. Eine Diskussion dieser Einheit folgt im anschließenden Gliederungspunkt. Der Autor schließt mit einer Empfehlung für mögliche anschließende Studien und bemängelt eine schwierige Beurteilung der Ergebnisse aufgrund eines von Palin häufig getadelten Studiendesigns. (Palin, 1994)

Die Autoren S. Eaton und H. Gillis erstellten ein Review über die Risiken des Hörverlusts von Orchestermusizierenden. Das Review behandelt die Themen Schallbelastung, Risiko, Hörverlust und Schutzmaßnahmen. Untersucht wurden drei Veröffentlichungen zum Thema der Schallbelastung. Alle zitierten Messergebnisse sind in der Einheit dB(A) erstellt worden und repräsentieren den energieäquivalenten Dauerschallpegel. Eine Tabelle fasst die Ergebnisse der drei Studien zusammen und teilt vier Instrumentengruppen jeweils einen Schalldruckpegel zu. Die Gruppe 1 setzt sich aus Violinen und Violen zusammen. Gruppe 2 besteht aus der Blechblassektion (Trompete, Posaune, Horn). Klarinette, Flöte, Fagott und Percussion bilden die Gruppe 3, während Kontrabass, Cello, Harfe und Klavier die Gruppe 4 ergeben. Jeder Gruppe wurde zusätzlich zum Dauerschalldruckpegel die Standardabweichung in dB und die Anzahl der Messungen in Abhängigkeit der zitierten Studie zugeordnet. Die Gruppe 2 stellt sich unter allen untersuchten Studien als die mit den höchsten Pegeln heraus. Peak-Level-Werte wurden im Rahmen dieser Literaturzusammenfassung ausdrücklich nicht angegeben. (Eaton & Gillis, 2002)

C. Peters et al. veröffentlichten 2005 eine breit angelegte Literaturrecherche zu den Themenschwerpunkten der Schallbelastung, Hörverlust und Schallschutz. Die Autoren beschränkten sich dabei nicht nur auf Musikerinnen und Musiker klassischer Musik, sondern behandelten auch das Genre Rock sowie Angestellte in Bars und Clubs. Die Literaturübersicht führt 17 epidemiologische Studien zur Exposition durch klassische Musik auf. Darunter waren neben Querschnittsstudien und Kohorten-

studien wiederum fünf Reviews enthalten. Des Weiteren befand sich unter diesen eine Studie zum Hörverlust von Chormitgliedern. 11 Studien zur Schallexposition durch klassische und sinfonische Musik wurden ausgewertet. Die Autoren fassten alle zitierten Studien in Tabellen im Appendix zusammen. Den Autoren zufolge wurde die Schallbelastung ausnahmslos als Pegelgröße in dB oder als A-bewerteter Schalldruckpegel angeführt. Eine Durchsicht der Tabellen über die zitierten Quellen im Anhang des Reviews bestätigen dies, soweit die Messgrößen angeführt wurden. Mit Schalldruckpegeln von über 100 dB(A) zitieren die Autoren Posaune, Flöte, Piccoloflöte, Horn, Klarinette, Fagott und Kontrabass als die „lautesten“ Instrumente. Am einflussreichsten auf die Schallbelastung fassen Peters et al. das Instrument und die Sitzposition zusammen. Erwähnt wird zusätzlich die Problematik der einseitigen Belastung, welche durch das Instrument verursacht werden (Violine, Viola, Flöte). Zusammenfassend sehen die Autoren Musiker/-innen einem erhöhten Risiko für Hörverlust ausgesetzt. (Peters et al., 2005)

E. Žuškin et al. schließen in ihrem Review nicht nur otologische Problematiken ein, sondern beschäftigen sich mit einer Vielzahl an Krankheitsbildern von Musizierenden. Die Autoren nennen zur Thematik der Schallbelastung 5 Studien, während lediglich von einer zitierten Studie dB(A)-Werte genannt werden. (Žuškin et al., 2005)

A. Behar, W. Wong und H. Kunov veröffentlichten 2006 ein Review über 13 Studien aus den Jahren 1992 bis 2005. Die Autoren werteten Publikationen aus, die die Schallbelastung von Orchestermitgliedern durch Schalldruckpegelmessung (10) und/oder Audiometrie (6) untersuchten. Die recherchierten Ergebnisse wurden nach Angaben der Methodik, wie der Durchführung der Messungen, der Berechnungen der Werte, der Platzierung der Mikrofone oder Angabe der Rohdaten, untersucht. Behar et al. bemängelten oft das Fehlen solcher Informationen. Darüber hinaus differenziert die Literaturzusammenfassung die Problematik der Messung von Dauerschallpegeln und die einhergehende Relevanz von Aufbau, Messtechnik und Messdauer. Die Ergebnisse sind in einer Tabelle dargestellt, die Autor, Jahr, Methode und Schlussfolgerung jeder Studie enthält. Alle gesichteten Artikel bewerten die Schallsituation entweder durch Messung der pegelbasierten Größen (Schalldruckpegel, L_{EX}) oder mittels Audiometrie. Zwei der Studien geben keine Schlussfolgerung an, während zwei Studien ein hohes Risiko deduzieren. Die restlichen Artikel folgern keine übermäßige Belastung oder geringes Risiko für einen Hörverlust. (Behar et al., 2006) Besonders eine Folgestudie (Kähäri et al. (2001)) einer Audiometrieuntersuchung sticht heraus. Die Autoren dieser Folgestudie untersuchten nach 16 Jahren das gleiche Orchester erneut mittels audiometrischer Messung und stellten fest, dass die Hörkurve der teilnehmenden Musikerinnen und Musiker über den Zeitraum hinweg nahezu unverändert blieb (Kähäri et al., 2001). Zuletzt geben die Verfasser des Reviews eine Empfehlung zur Durchführung optimaler Messungen auf der Grundlage der Mängel zitierter Studien. (Behar et al., 2006)

Die Dissertation von J. Holstein aus dem Jahr 2009 stellt mit 61 eingesehenen Studien zur Schallbelastung und otologischen Situation die umfangreichste hier berücksichtigte Literaturübersicht dar. Holstein nannte als Beispiele die betrachteten Datenbanken Pubmed und Medline. Der Autorin zufolge gibt „die Arbeit [...] einen umfassenden Überblick über alle derzeit veröffentlichten Studien, die sich mit der Problematik der Hörprobleme der Musiker auseinandersetzen“ (Holstein, 2009, S. 99). Die Daten erfassen einen Zeitraum von 1960 bis 2006 und schließen Musikerinnen und Musiker mehrerer Genres ein. 39 der insgesamt 61 Studien beziehen sich auf Orchester oder klassische Musik. Zwei dieser Studien berücksichtigen Chöre und drei berücksichtigen Militär-Orchester. Ebenfalls zählen zu

den 39 Studien Messungen an Musikstudierenden. Die Schallbelastung wurde mittels Pegelmessung und Audiometrie untersucht. J. Holstein fasste alle Studien in einheitlichen Tabellen im Anhang der Dissertation zusammen und benennt Jahr, Autor, Journal, Land, untersuchte Stichprobe, Expositionszeit, Ort und Ergebnis der Schalldruckmessung sowie Fazit. Ferner wurden die Quellen der wissenschaftlichen Evidenz (nach Antes) bewertet. Ein nächstes Qualitätsmerkmal, das die Autorin anführt, ist die Angabe des Dauerschalldruckpegels bzw. Mittelungspegel in beleuchteten Quellen. Weitere positive Merkmale sind unter anderem Sitzpläne der Orchester, detaillierte Methodenerklärung und medizinische Aspekte, wie Familien- und Medikamentenanamnese. Die Autorin hebt ebenfalls die 2001 veröffentlichte Studie von Kähäri et al. positiv hervor, die als eine von zwei Studien eine Nachbeobachtung durchführte. Zur Darstellung der Schallbelastungen verwendeten die betrachteten Studien neben der Dosis und des Dauerschallpegels, die Einheiten dB, dB(A) sowie die Maximalpegel (L_{max}). Lediglich vier Studien aus den Jahren 1966, 1968 und 1972, die ihre Ergebnisse unter anderem in dB(B), DIN-phon sowie sones angeben, differieren gegenüber den anderen Studien. Eine nähere Betrachtung folgt im nächsten Kapitel. Auch wenn vorliegende Arbeit die Schallbelastung von Orchestermitgliedern diskutiert, wurden alle 61 von Holstein genannten Studien nach ihrer Messmethode hin untersucht. Alle aufgeführten Studien, ausschließlich der genannten, verwenden pegelbasierte Messgrößen. Die Autorin fasst zusammen, dass 46 % der Studien ein Risiko eines Hörverlusts durch klassische Musik folgern. Außerdem werden Quellen zitiert, die einen Zusammenhang zwischen individueller Lärmempfindlichkeit und Hörverlust postulieren. Dem größten Risiko sind Blechbläser und Schlagzeuger sowie Musiker/-innen in deren Umgebung ausgesetzt. Schlussendlich merkt J. Holstein in ihrer Dissertation die konträren Ergebnisse der Studien an und gibt eine Empfehlung für optimale folgende Untersuchungen. (Holstein, 2009)

Zhao et al. (2010) veröffentlichten das nächste hier betrachtete Review. Es befasst sich mit der Schallbelastung durch klassische Musik, Rock/Pop Musik, der Exposition von Angestellten bei Musikveranstaltungen, der Belastung durch persönliche Musikwiedergabegeräte sowie der Exposition von Konzertbesuchern. Insgesamt werteten die Autoren 25 Studien aus, von denen 9 Artikel die Belastung von Orchestermitgliedern untersuchten. Zusammengefasst stellt das Review die Ergebnisse in Tabellen mit den Parametern Autoren, Veröffentlichungsjahr, Personenkreis, Methoden bzw. Kriterien und Untersuchungsergebnisse dar. Die Tabellen konzentrieren sich jedoch überwiegend auf die Auswertung der Studien hinsichtlich des Hörverlusts und zitieren die Ergebnisse der audiometrischen Untersuchungen. Dennoch benennen die Autoren einige Expositionswerte und zitieren ausschließlich pegelbasierte Kenngrößen (dB, dB(A), dB HL¹). Zusammenfassend betonen auch diese Autoren die kontroversen Ergebnisse der Studien bezüglich der Risikoeinschätzung. Sie schließen mit der Folgerung, dass Hörprobleme in engem Zusammenhang mit Musikexposition stehen und das Risiko musikinduzierter Hörverluste als hoch einzustufen ist. (Zhao et al., 2010)

Die Bachelorarbeit von M. Owusu aus dem Jahr 2016 stellt eine weitere Zusammenfassung der Risikobeurteilung von Orchestermusikern/-innen zur Verfügung. Die Autorin fand insgesamt 41 Studien, die in einer Tabelle nach Autoren, Land, Instrumente, Anzahl der Befragten, Alter der Befragten, Orchesterform/typ, Exposition in h, Pegelmessung, aktive Spielzeit in Jahren, Messungszeitpunkt und Schlussfolgerung sortiert wurden. Die Studien bewerten das Risiko für Hörverlust mittels Schalldruck-

¹dB HL stellt die Einheit der Audiometrie dar und misst in Dezibel „hearing level“ (Di Stadio, 2017) oder zu deutsch in dBHV (Hörverlust) (Zenner, 2011)

pegelmessung und Audiometrie. Alle Studien, deren Messmethode von der Autorin angegeben wurde, verwendeten pegelbasierte Messgrößen. Lediglich eine Quelle wird zitiert, die in DIN-phon gemessen hat und diese ist bereits aus dem Review von S. L. Palin und J. Holstein bekannt. Owusu merkt ebenfalls die teils widersprüchlichen Schlussfolgerungen der untersuchten Studien an. (Owusu, 2016)

A. Di Stadio veröffentlichte 2017 eine Literaturrecherche zur Identifikation der Faktoren, die einen Hörverlust von professionellen Musikern/-innen verursachen. Ein Teil der Studie stellt die Ergebnisse einer umfangreichen vielsprachigen Literaturrecherche (Eng., Span., Port., Franz., Ital.) vor. Untersucht wurden Studien aus den Jahren 1978 bis 2016 mit Bezug zu Orchester, Pop und Rock Musik. Di Stadio zeigt in einer zusammenfassenden Tabelle eine Auswahl von 23 Studien, von denen 13 Quellen klassische Musik betrachten. Alle genannten Werte des Reviews sind pegelbasiert in dB, wobei anzumerken ist, dass hauptsächlich Studien mit audiometrischen Daten gewählt wurden. Der Literaturzusammenfassung zufolge leiden 80 % der Orchestermusiker/-innen und 90 % der Musiker/-innen in Rock/Pop an Hörverlusten. Durch die Literaturrecherche und experimentelle Studien an menschlicher Cochleae belegt Di Stadio einen Zusammenhang zwischen dem gewählten Instrument und der Frequenzverteilung des Hörverlusts im Audiogramm. Die Autorin erläutert ferner, dass die Frequenzweite eines Instruments und die Intensität die hauptsächlichsten Faktoren für hochfrequente Hörverluste sind. Die Expositionsdauer verursacht dagegen Verluste der tieffrequenten Sensitivität. Weitere Informationen finden sich in genannter Originalquelle. (Di Stadio, 2017)

Ein letztes hier aufgeführtes Review wurde 2018 von A. Di Stadio et al. veröffentlicht und konzentriert sich hauptsächlich auf medizinische Folgen von Musikexposition. Die Literaturübersicht schließt insgesamt 41 Veröffentlichungen ein. 30 dieser zitierten Studien beziehen sich auf Themen des Hörverlusts durch klassische Musik, während 15 Studien die Folgen von Rock/Pop Musik behandeln (4 Studien beinhalten alle drei Genres). Trotz des Fokus auf die Gehörschäden wurden einige wenige pegelbasierte Werte der Exposition angegeben. Das Review resümiert, dass Hörverluste unter professionellen Musiker/-innen häufiger sind, wobei Orchestermitglieder einem etwas geringeren Risiko ausgesetzt sind als Musiker/-innen des Rock/Pop Genres. Ebenfalls belegt die Literaturzusammenfassung, dass asymmetrische Hörverluste bei Orchestermitgliedern weitaus häufiger sind, als im Rock und Pop Genre. (Di Stadio et al., 2018)

Als Fazit der betrachteten Reviews lässt sich zusammenfassen, dass alle angegebenen Werte von Messungen im Orchester pegelbasiert sind und in dB veröffentlicht wurden. Lediglich drei frühe Studien (1966, 1968, 1972) gaben ihre Ergebnisse in abweichenden Einheiten aus. Jedoch sind die verwendeten Einheiten nicht mehr aktuell oder entsprechen nicht den gültigen Berechnungen. Näheres wird in anschließendem Gliederungspunkt erörtert. Weiter sprechen einige Reviews die kontroversen Ergebnisse der Studien an. So herrscht keine belegbare Einigkeit, ob Musikexposition alleine zu Hörverlusten führen kann.

Zusätzlich zur ausnahmslos pegelbasierten Messung, zeigt sich resümiierend, dass kein Review die Verwendung der A-Bewertung kritisch beleuchtete. Behar et al. (2006) erläutern als einzige die Erstellung eines energieäquivalenten Dauerschallpegels und nennen Schwierigkeiten sowie die Bedeutung der Beobachtungsdauer.

Tab. 4: Auswertung der Review-Papers

Autoren	Sprache	Umfang	Datenbanken	Verwendete Größen bzw. Einheiten
Palin (1994)	Eng.	10	k.A.	DIN-Phon, L_P in dB und dB(A), L_{Eq} in dB(A), Audiom.
Eaton und Gillis (2002)	Eng.	3	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
Peters et al. (2005)	Eng.	11 (17)	PubMed, CCINFOWeb, Compendex, Web of Science	L_P in dB, dB(A), dB HL (Audiom.), OAE
Žuškin et al. (2005)	Eng.	5	k.A.	L_P in dB(A)
Behar et al. (2006)	Eng.	13	Google Scholar, Scopus, Medline	L_{Eq} und L_P in dB, dB(A), Audiom., Dosis
Holstein (2009)	Deut.	39 (61)	Pubmed, Medline	L_{Eq} und L_P in dB, dB(A), dB(C), dB(B), dB HL (Audiom.), Dosis, DIN-Phon, phons, sones, noys, OAE
Zhao et al. (2010)	Eng.	9 (25)	The National Library of Medicine's search service, PubMed, CINAHL	L_P in dB, dB(A), dB HL (Audiom.), OAE
Owusu (2016)	Deut.	41	Livivo, Springer Link, Science Direct, PubMed	L_P in dB, dB(A), DIN-Phon, dB HL (Audiom.), OAE
Di Stadio (2017)	Eng.	13 (23)	Pubmed, Medscape, Google Scholar	L_P in dB, dB HL (Audiom.), OAE
Di Stadio et al. (2018)	Eng.	30 (41)	PubMed, Scopus, Google Scholar	L_P in dB, dB HL (Audiom.)

k.A.-keine Angaben, Audiom.-Audiometrie, OAE-otoakustische Emissionen

4.2 Literatur: Fachartikel

Nach der Vorstellung der Reviews folgen die einzelnen Publikationen über die Schallbelastung im Orchester. Besonders beleuchtet wird, wie die Schallbelastung von früheren Studien gemessen wurde. In der Tabelle 5 (S. 49-51) ist die Fachliteratur dargestellt und ausgewertet. Die gefundenen Publikationen wurden hinsichtlich 11 Parametern untersucht und bewertet. Diese zielen auf Qualitätskriterien der Messungen ab und setzen sich aus Ergebnissen der Recherche und Fachliteratur zusammen (u. a. Feldmann (2018), DIN EN 61672-1).

Die Publikationen sind nach dem Veröffentlichungsdatum sortiert und nummeriert. Die Sprache der Artikel wurde zur Information in der dritten Spalte eingetragen. Die einzelnen Parameter sind in den Tabellen zur Übersichtlichkeit abgekürzt und deren Legende findet sich in der Tabellenunterschrift. Der erste Parameter (**Mess.**) gibt an, ob die zitierte Studie eigene Messungen im Orchester vornahm. Dies ist meist der Fall, jedoch zitieren manche Veröffentlichungen lediglich die Werte anderer. Die Darstellung eines Sitzplans (**SP**) stellt das nächste Kriterium dar. Ein Sitzplan mit eingezeichnetem Grundriss, Instrumenten und Messposition erleichtert die Verständlichkeit und erlaubt Rückschlüsse auf die Messdaten und deren Einwirkungen (Nachbarinstrumente etc.). Der Messaufbau und die Messposition (**MA/MP**) stellen einen weiteren grundlegenden Güteparameter dar. Die Angabe wo und wie gemessen wurde, sollte aus Gründen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit angegeben werden. Die Beschreibung des verwendeten Messsystems (**MS**) ist ebenso wie die Position eine weitere wichtige Angabe zur Sicherung der Reproduzierbarkeit. Ob der Hersteller oder zumindest die Güteklasse der verwendeten Messtechnik angegeben wurde, zeigt diese Tabellenspalte. Da die Lautstärke im Orchester stark mit dem gespielten Repertoire (**Rep.**) und der damit verbundenen Besetzung (Orchestergröße **OG**) korreliert, ist die Angabe dieser zur Beurteilung der Messgrößen sinnvoll. Da instrumentenbedingt bei einigen Musikerinnen und Musikern asymmetrische Belastung der Ohren auftreten kann, maßen wenige Studien getrennt für beide Ohren die Belastung (Monaural **Mon.**, Binaural **Bin.**). Das vorletzte Gütekriterium (**Krit.**) steht besonders in Zusammenhang mit vorliegender Arbeit. Es wurde untersucht, ob die gefundene Literatur die verwendeten Messgrößen kritisch bewertet. Zuletzt zeigt die Tabelle alle verwendeten Messgrößen und deren Einheiten zur Beurteilung der Schallexposition im Orchester. Einige der Publikationen verwendeten neben der Expositionsmessung auch audiometrische Untersuchungen zur Feststellung der Belastung, die aber aufgrund der Fragestellung der vorliegenden Arbeit nicht erwähnt werden.

Tab. 5: Auswertung der Publikationen

Nr.	Autoren, Jahr	Spr.	Mess. SP	MA/ MP	MZ	MS	Rep.	OG	Bin./ Mon.	Krit.	MG/ Einh.
1	Lebo und Oliphant (1968)	Eng.	✓	k.A.	✓	k.A.	✓	k.A.	Mon.	k.A.	sones, phons, noys, PN dB, Sil, L_P in dB(A), dB(C)
2	Axelsson und Lindgren (1981)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_P , L_{Eq} , $L_{Eq,5h}$
3	Westmore und Eversden (1981)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_P in dB(A)
4	Jansson und Karlsson (1983)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	k.A.	Mon.	k.A.	L_P , L_{Eq} in dB(A)
5	Royster et al. (1991)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{P,peak}$, $L_{EX,sh}$ in dB(A)
6	McBride et al. (1992)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{P,peak}$, $L_{EX,sh}$ in dB(A)
7	Sabesky und Korczynski (1995)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,sh}$ in dB(A)
8	H. M. Laitinen et al. (2003)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
9	Lee et al. (2003)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , L_{EX} in dB(A)
10	Brockt (2004)	Deut.	X	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Mon.	k.A.	L_P , $L_{P,max}$, $L_{EX,40h}$ in dB(A)

Abkürzungen: **Spr.**-Sprache, **Mess.**-Messung, **SP**-Sitzplan, **MA**-Messaufbau, **MP**-Messposition, **MZ**-Messzeitraum, **MS**-Messsystem, **Rep.**-Repertoire, **OG**-Orchestergröße, **Bin.**-Binaural, **Mon.**-Monaural, **Krit.**-Kritik, **MG**-Messgrößen, **Einh.**-Einheiten, k.A.-keine Angaben, Eng.-Englisch, Deut.-Deutsch

Fortsetzung der Tabelle 5: Auswertung der Publikationen

Nr.	Autoren, Jahr	Spr.	Mess.	SP	MA/ MP	MZ	MS	Rep.	OG	Bin./ Mon.	Krit.	MG/ Einh.
11	Lee et al. (2005)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , L_{EX} in dB(A)
12	Emmerich et al. (2008)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_P , L_{Eq} , L_{EX} in dB(A), Dosis
13	O'Brien et al. (2008)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
14	MacDonald et al. (2008)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
15	Brockt (2010)	Eng.	×	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,8h}$, $L_{EX,40h}$ in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
16	Pawlaczyk-Luszczynska et al. (2011)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_P , L_{max} in dB(A), L_{Eq} , $L_{EX,T/w,10/50/90}$, L_{max} in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
17	J. H. Schmidt et al. (2011)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bin.	k.A.	$L_{C,peak}$ in dB(C), L_{Eq} in dB(A)
18	Toppila et al. (2011)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	k.A.	k.A.	Mon.	k.A.	L_{Eq} , L_{EX} in dB(A)
19	Qian et al. (2011)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
20	Poissant et al. (2012)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	✓	k.A.	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB und dB(A)

Abkürzungen: **Spr.**-Sprache, **Mess.**-Messung, **SP**-Sitzplan, **MA**-Messaufbau, **MP**-Messposition, **MZ**-Messzeitraum, **MS**-Messsystem, **Rep.**-Repertoire, **OG**-Orchestergröße, **Bin.**-Binaural, **Mon.**-Monaural, **Krit.**-Kritik, **MG**-Messgrößen, **Einh.**-Einheiten, k.A.-keine Angaben, Eng.-Englisch, Deut.-Deutsch

Fortsetzung der Tabelle 5: Auswertung der Publikationen

Nr.	Autoren, Jahr	Spr.	Mess. SP	MA/ MP	MZ	MS	Rep.	OG	Bin./ Mon.	Krit.	MG/ Einh.
21	Behar et al. (2012)	Eng.	✓	✓	k.A.	k.A.	k.A.	✓	Mon.	k.A.	$L_{EX,sh}$ in dB(A)
22	Russo et al. (2013)	Eng.	X	✓	k.A.	k.A.	k.A.	✓	Mon.	k.A.	L_{EX} in dB(A)
23	Pawlaczyk-Luszczynska et al. (2013)	Eng.	✓	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
24	O'Brien et al. (2013)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bin.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,sh}$ in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
25	Rodrigues et al. (2014)	Eng.	✓	k.A.	✓	k.A.	✓	k.A.	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,sh}$ in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
26	Dudarewicz et al. (2015)	Eng.	✓	k.A.	k.A.	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,sh}$, $L_{EX,40h}$, L_{max} in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
27	Smith et al. (2016)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	k.A.	k.A.	Mon.	k.A.	L_{Eq} , $L_{EX,sh}$ in dB(A)
28	Bo et al. (2016)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , L_{EX} in dB(A), $L_{C,peak}$ in dB(C)
29	Wenmaekers et al. (2017)	Eng.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bin.	k.A.	L_{Eq} in dB(A)
30	Zhang (2018)	Eng.	✓	k.A.	✓	✓	k.A.	✓	Mon.	k.A.	L_P in dB
31	Behar et al. (2018)	Eng.	✓	✓	k.A.	✓	✓	✓	Mon.	k.A.	L_{Eq} , L_{EX} in dB(A)

Abkürzungen: **Spr.**-Sprache, **Mess.**-Messung, **SP**-Sitzplan, **MA**-Messaufbau, **MP**-Messposition, **MZ**-Messzeitraum, **MS**-Messsystem, **Rep.**-Repertoire, **OG**-Orchestergröße, **Bin.**-Binaural, **Mon.**-Monaural, **Krit.**-Kritik, **MG**-Messgrößen, **Einh.**-Einheiten, k.A.-keine Angaben, Eng.-Englisch, Deut.-Deutsch

Nachfolgend werden einige Studien im Detail vorgestellt, die durch ihr Design hervorstechen.

Wie bereits bei der Erörterung der Reviews bemerkt und durch die Tabellen bestätigt, maßen nur einige wenige Publikationen nicht in der logarithmischen Skala und der Einheit dB. Lebo und Oliphant veröffentlichten 1968 ihre Studie „Music as a source of acoustic trauma“ und verwendeten zur Darstellung ihrer Ergebnisse neben den Einheiten dB(A) und dB(C), die Einheiten und Größen sones, phons, noys, PN dB und SIL. Lebo und Oliphant erwähnen jedoch keine detaillierte Berechnung dieser Einheiten. (Lebo & Oliphant, 1968) Bei sones könnte es sich formell zwar tatsächlich um die bekannte Einheit handeln, da sone circa 1930 von S. S. Stevens entworfen wurde (Ruschkowski, 2013), jedoch ist davon auszugehen, dass es sich nicht um eine Lautheitsberechnung nach aktuellem Stand handelt. Bei der Aufzählung der Messgeräte nennen die Autoren ein Oktavfilter zur Aufschlüsselung des Schallsignals. Eine Berechnung der Lautheit benötigt nach aktuellem Stand mindestens einen Terzfilter (s. 2.2.3 Psychoakustik). Die Einheit noys wird zwar als die Einheit der „Perceived Noisiness“ in noy verwendet, jedoch ist diese auf Kryter (1985) zurückzuführen und steht inhaltlich in keinem Zusammenhang zu vorliegender Arbeit. PN dB ist ebenfalls im Zusammenhang mit der „Perceived Noisiness“ als die Einheit der Umrechnungsgröße „Perceived Noise Level“ zu finden, doch ist auch hier der inhaltliche Zusammenhang nicht gegeben. (Feldmann, 2010, S. 86 f.) Die letzte angegebene Größe SIL entspricht dem „sound intensity level“ (SIL) oder dem „speech interference level“ (SIL) und steht ebenfalls in keinem Zusammenhang mit der Fragestellung vorliegender Arbeit (Breazeale & McPherson, 2014, S. 216 f.) (Cowan, 2014, S. 437). Daher werden die Ergebnisse der Publikation von Lebo und Oliphant nicht detaillierter untersucht.

Die einzige weitere auffallende Messeinheit ist die DIN-phon (s. Ergebnisse Review). DIN-phon ähnelt der Einheit dB(A) und galt in Deutschland als Messeinheit, bevor dB(A) normiert wurde (1968). (Schick, 1990, S. 29 f.) DIN-phon wird folglich nicht genauer betrachtet.

O'Brien et al. (2008) veröffentlichte eine umfangreiche Studie zur Schallbelastung im Orchester und deren Quantifizierung durch Messungen. Über einen Zeitraum von drei Jahren (Mai 2004 bis Mai 2007) führten die Autoren akustische Messungen bei jeder Orchesterprobe und jedem Auftritt des professionellen sinfonischen Orchesters The Queensland Orchestra durch. O'Brien et al. erarbeiteten im Gegensatz zu anderen Studien ausführlich die Besonderheiten von orchestraler Schallbelastung, welche die Autoren als „orchestral noise“ bezeichnen. Während die Fachliteratur meist zu verallgemeinernd von der Schallexposition spricht und teilweise auf die Gleichgültigkeit der Schallereignisse für das Ohr verweist (Presbury & Williams, 2000), führen O'Brien et al. die Besonderheiten des „orchestral noise“ auf. Neben Sitzposition, Instrument, Repertoire, Räumlichkeit und Besetzung, spielen auch die Probenart (Einzel-, Register-, Gesamtprobe) und individuelle Faktoren eine Rolle. Die Schallbelastung wurde mittels des L_{Eq} und $L_{C,peak}$ in dB(A) und dB(C) gemessen und in „sound maps“ für Probenraum sowie alle anderen Spielorte visualisiert. Eine „sound map“ zeigt einen Grundrissplan mit eingezeichneter Sitzordnung sowie die Messergebnisse in Abhängigkeit der Raumposition. Die Autoren fassen zusammen, dass die drei Variablen Repertoire, Sitzposition und Örtlichkeit die größten Einflüsse auf die Schallexposition haben. Mit einem Messzeitraum von drei Jahren und 1608 Einzelmessungen veröffentlichten O'Brien et al. eine Studie zur Beurteilung der Schallereignisse im Sinfonieorchester und Berücksichtigung der genannten Variablen. (O'Brien et al., 2008)

Eine nächste sehr ausführliche Publikation wurde von J. H. Schmidt et al. (2011) veröffentlicht. Die Autoren behandeln das Thema der Schallbelastung im Orchester mit einer bilateralen Messme-

thode. Einige Musikerinnen und Musiker aus zwei verschiedenen sinfonischen Orchestern trugen in Orchesterproben, Aufführungen und individuellen Proben je zwei Miniaturmikrofone 1-2 cm vor den Gehörgängen. Die Studie zeigt für beide Ohren getrennt die Werte des L_{Eq} in dB(A) und des $L_{C,peak}$ in dB(C) sowie die maximalen und minimalen Ergebnisse. Ferner ist der Mittelwert und die Standardabweichung der Pegelwerte für 15 Instrumentengruppen mit Anzahl der Messungen und der Instrumentalisten angegeben. Die Autoren stellten die Ergebnisse unter anderem in „sound maps“ dar, die für linke und rechte Ohren getrennt die Schallbelastung über einem Grundriss der Orchesterbesetzung farblich visualisieren. Abbildung 24 zeigt eine dieser Visualisierungen. Sehr deutlich sichtbar ist die asymmetrische Schallbelastung der Violinen und Violen, die aufgrund der Halteposition des Instruments (auf der linken Schulter) entstehen. Neben dem L_{Eq} berechneten die Autoren auch die Tagesexpositionspiegel $L_{EX,8h}$ und fassten diese in Tabellen zusammen. Die Studie belegt neben der Schallbelastung auch den Einfluss des Repertoires auf die Exposition. (J. H. Schmidt et al., 2011)

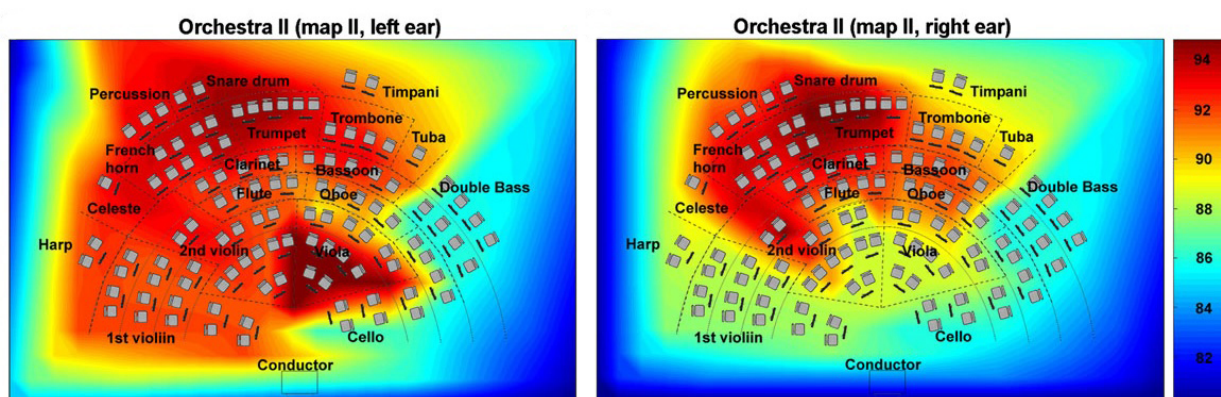


Abb. 24: „Sound Map“ für eines der beiden Orchester aus J. H. Schmidt et al. (2011) (6. Sinfonie von G. Mahler)

Ebenfalls 2011 veröffentlichten Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2011) einen Artikel zur Bewertung der Schallexposition unter Orchestermusikern/-innen. Die Autoren erstellten 338 Messungen während Gesamtproben und Aufführungen von drei Orchestern. Die Daten wurden, wie der Tabelle 5 zu entnehmen, als L_{Eq} in dB(A) und als $L_{C,peak}$ in dB(C) angegeben. Anders als die übrigen Autoren verwendeten Pawlaczyk-Łuszczynska et al. jedoch Perzentilwerte der Dauerschallpegel zur Beurteilung der Schallbelastung. So stellt der Fachartikel die Belastung in Wochenexpositionspiegeln (40 h Woche) dar und gibt die 10., 50. und 90. Perzentile des A-bewerteten Dauerschallpegels an. Durch die Darstellung der 10., 50. und 90. Perzentilwerte über alle vertretenen Instrumente in Diagrammen, bildeten die Autoren einen Pegelbereich und verglichen fremde Messdaten mit den studieneigenen Werten. Ein beispielhaftes Diagramm zeigt Abbildung 25 (S. 54). (Pawlaczyk-Łuszczynska et al., 2011)

Die meisten Autoren führten die Messungen ihrer Studien in Gesamtproben und Aufführungen des Orchesters durch, da diese Schallereignisse leichter erfassbar scheinen. Messungen bei individuellen Proben wurden seltener berücksichtigt, dennoch stellen sie einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Schallexposition dar (O'Brien et al., 2013). Die eben vorgestellte Publikation von Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2011) berücksichtigt diesen Umstand durch recherchierte und angenommene Werte sowie durch Befragungen der Musiker/-innen zur persönlichen Probendauer. O'Brien et al. (2013) hingegen veröffentlichten eine detaillierte Messreihe zur Belastung durch individuelle Proben. Die Au-

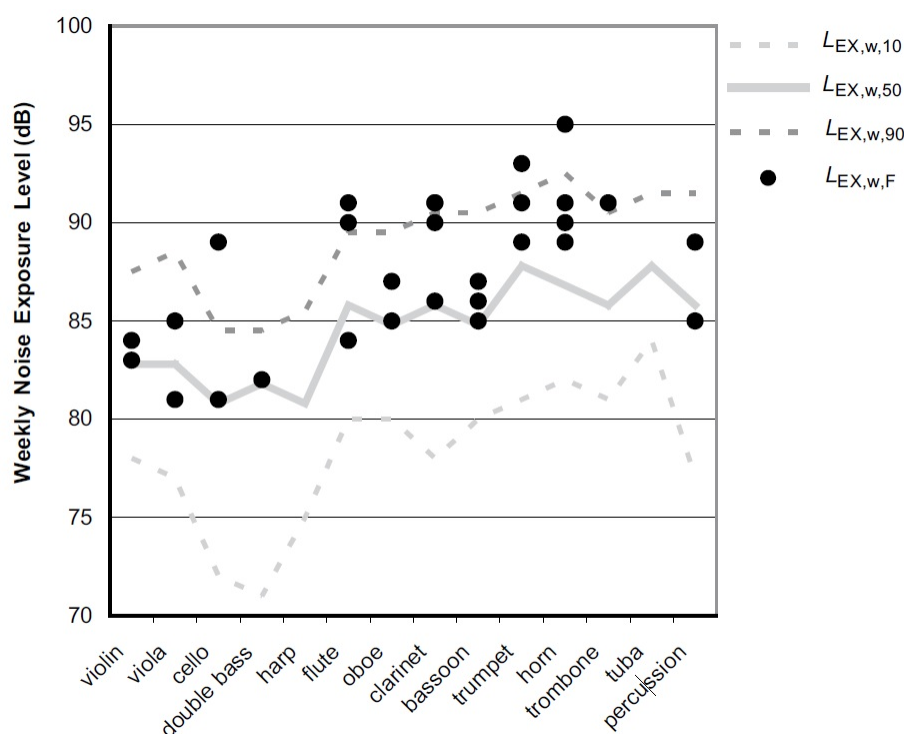


Abb. 25: Vergleiche der Wochenexpositionspegel ($L_{EX,w,10/50/90}$) von Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2011) und den Daten der Studie von Toppila et al. (2011) ($L_{EX,w,F}$)

toren maßen die Größen L_{AEq} und $L_{C,peak}$ in einem einzigen Probenraum, während insgesamt 35 Musiker/-innen (19 verschiedene Instrumente) nacheinander probten. Durch detaillierte Angabe der Raumbeschaffenheiten, einen Stellplan und Vereinheitlichung der Probensituation, versuchten die Autoren eine hohe Reproduzierbarkeit ihrer Daten zu erreichen. So dauerte eine Messsituation inklusive Pausen rund 23 min mit vier 15 Sekunden andauernden Stimmtönen (piano, mezzo forte, forte, fortissimo), einer fünf minütigen Technikübung und einer 15 Minuten andauernden Probe der jeweiligen ersten Stimme von Don Quixote (R. Strauss). Der Messaufbau beinhaltete drei Mikrofone, eins mittig vor den Musizierenden und je eins neben den Ohren (binaurale Messung). Die Daten stellt die Studie auch als Dosisbetrachtungen ($L_{EX,8h}$, $L_{EX,23min}$) dar und zeigt unter anderem wie viele Minuten ein Musizierender seinem Instrument fortissimo-spielend ausgesetzt sein dürfte, um die australische Lärmverordnung von $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$ einzuhalten (LärmVibrationsArbSchV gibt ebenfalls 85 dB(A) an (oberer Auslösewert)). (O'Brien et al., 2013)

Schließlich wird der von Wenmaekers et al. (2017) verfasste Artikel vorgestellt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ebenfalls binaurale Messungen im Orchester getätigt. Der L_{AEq} wurde in mehreren Messungen in verschiedenen Räumlichkeiten eines Orchesters bei 10 Musiker/-innen erstellt. Jedoch wurden die Daten nicht primär zur Darstellung der Schallbelastung verwendet, sondern zur Validierung eines virtuellen Modells zur Vorhersage der binauralen Schallbelastungen eines beliebigen Instrumentalisten. Begrenzt ist dieses Modell auf die ersten zwei Minuten der Sinfonie Nr. 1 von G. Mahler (4. Satz), das den Autoren zufolge „laute“ orchestrale Musik repräsentiert. Laut Wenmaekers et al. (2017), prädiziert das virtuelle Orchestermodell für die gleichen Musizierenden den L_{AEq} mit einer Abweichung von 2 dB. Die Autoren verwendeten das Modell zur Bewertung der klas-

sischen Schallschutzmaßnahmen im Orchester (Abstandsvergrößerung der Musizierenden, gestufte Bühnenabschnitte, absorbierende Schilde). Wenmaekers et al. fassen zusammen, dass keine der üblichen Maßnahmen eine Besserung der Situation bringt. Selbst raumakustische Veränderungen ergaben keine signifikanten, positiven Effekte. Dies steht klar im Gegensatz zu anderen Veröffentlichungen, wie unter anderem Brockt (2004) und Brockt (2010), die Abstandsvergrößerungen, spezielle Schilde und stufenförmige Bühnen empfehlen. Auch raumakustische Maßnahmen stellen nach Fuchs (2017, S. 21 f.) sinnvolle Maßnahmen dar. Ohne im Rahmen vorliegender Arbeit näher darauf einzugehen, sei für detaillierte Information auf die Originalquelle verwiesen. (Wenmaekers et al., 2017)

4.3 Zusammenfassung und Diskussion der Literaturrecherche

Gesamtheitlich zeigen die Ergebnisse der Literaturrecherche, dass die Schallbelastung bzw. die Folgen dieser entweder durch die Messung der Schallexposition, durch Audiometrie oder seltener durch Messung der otoakustischen Emissionen beurteilt werden. Einige Autoren verwiesen auf Intransparenz der Studiendesigns, unvollständige Methodenangaben und uneinheitliche Berechnung der Expositionspegel (u. a. Zhao et al. (2010) und Behar et al. (2006)). Keine Studie diskutierte die Nachteile des Dauerschallpegels und lediglich eine betrachtete Publikation (Behar et al., 2006) betont die wichtigen Einflussgrößen bei der Verwendung des L_{Eq} . Außerdem hinterfragte keine Studie die Verwendung der A oder C-Bewertung. Zur Beurteilung der Schallbelastung wurden fast ausschließlich pegelbasierte Messgrößen verwendet. Die wenigen anderweitigen Einheiten und Größen, stellten sich als veraltet oder nicht relevant heraus. Weiter zeigte die Auswertung, dass selbst grundlegende Angaben wie der Messaufbau, die Messzeit und die verwendete Messtechnik nicht selbstverständlich sind. Binaurale Messungen wurden eher selten angewendet und fanden auch erst in jüngeren Studien Gebrauch. Die These, dass die Schallbelastung im Rahmen der betrachteten Publikationen überwiegend in pegelbasierten Messgrößen beurteilt wurde, ist somit eindeutig belegt. Psychoakustische Lautheitsbetrachtungen konnten in keinem Zusammenhang mit der Schallbelastung im Sinfonieorchester gefunden werden.

Zwar stehen die Ergebnisse der einzelnen Studien nicht im Fokus der vorliegenden Bachelorthesis, jedoch zeigten die Autoren der Reviews und der restlichen Publikationen deutliche Uneinigkeit über die Einschätzung des Risikos für einen Hörverlust durch klassische Musik. Bei den Recherchearbeiten schien ein Trend identifizierbar zu sein. Studien, welche die Audiometrie zur Bestimmung des Hörverlusts nutzten, zeigten zur Vergleichsgruppe teilweise keine signifikanten Verschlechterungen. Allen voran die Folgestudie von Kähäri et al. (2001), die nach 16 Jahren dieselben Musiker/-innen untersuchte und keine negativen Folgen der Musikexposition feststellen konnte. Im Gegensatz dazu scheinen Studien, welche die Schallexposition im Orchester gemessen haben, teils mit positivem teils mit negativen Resümee zu schließen. Das Verfahren zur Bestimmung der jeweiligen Daten (Audiometrie, Exposition) beeinflusst möglicherweise. Ohne Untersuchungen anstellen zu können, wirkt eine audiometrische Untersuchung deutlich transparenter und normierter durchführbar. So kalibrierten einige Publikationen studienübergreifend nach ISO 389 (z. B. Kähäri et al. (2001), Jansson und Karlsson (1983), Ostri et al. (1989), Jansen et al. (2009)). Die Messung der Exposition im Orchester ist dagegen nicht festgelegt und die Erfassung aller Musikexpositionen stellt sich komplex dar. Die Berücksichtigung

und Erfassung der Gesamtproben, der individuellen Proben und der möglichen anderen Beschäftigungen (Kammermusik etc.) eines Instrumentalisten scheinen schwieriger abzubilden zu sein. So ergaben die Datenerhebung von Lee et al. (2005) keine Hörverlust-induzierenden Pegel. Gemessen wurde in dieser Studie nur die Exposition im Orchester und die Verfasser schränkten abschließend ein, dass individuelle Proben etc. durchaus die Pegel in schädigende Bereiche heben könnten. Dagegen folgern O'Brien et al. (2008), dass unter Berücksichtigung der Gesamtproben und individueller Situation die Grenzwerte der Exposition überschritten werden. Mit Hinblick auf vorliegende Arbeit könnte jedoch neben den Studiendesigns, auch die Messgröße als solche zu diesen kontroversen Ergebnissen beitragen. Wie kommende Kapitel zeigen, besteht begründete Kritik an verwendeten Methoden.

Einschränkend zur Literaturrecherche muss angefügt werden, dass der eben diskutierte Trend im Rahmen vorliegender Bachelorthesis nicht weiter untersucht und belegt werden kann. Dennoch könnte eine später folgende Untersuchung hier anschließen.

5 Anwendungsgrenzen, Kritik und Diskussion der verwendeten Verfahren

Wie die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, verwendeten fast alle betrachteten Studien pegelbasierte Werte zur Darstellung der empfundenen Lautstärke im Orchester. Allen voran, wie auch in anderen Gebieten des Lärmschutzes, wird der A und C-bewertete Schalldruckpegel zur Beurteilung der Schallbelastung herangezogen. Die in vorliegender Arbeit verwendete Alternative sind Lautheitsmodelle, welche die Empfindung der subjektiven Lautheit, zumindest für den Durchschnitt der Hörenden, korrekt darstellen wollen. Den bewerteten Schalldruckpegeln stehen seit langem eine Vielzahl an Kritiken gegenüber. Aber auch das verwendete Lautheitsmodell sollte nicht kritiklos bleiben. Im Folgenden werden die Problematiken erläutert.

5.1 Schalldruckpegelbasierte Messgrößen

In den 1960-er Jahren drängten sowohl eine Vielzahl an Messmethoden zur Schallbelastung, als auch industrielle Interessen die International Standardization Organization (ISO) zu einer Normierung. Daher wurde als eine einfache Methode der gehörgerechten Messung die A-Bewertung eingeführt (Fastl & Zwicker, 2007, S. 315). Sehr wohl mit dem Wissen, dass zum damaligen Zeitpunkt weder die Technologie, noch die wissenschaftliche Basis für eine gehörgerechte Messtechnik vorhanden waren (Maschke & Jakob, 2018). Wie Klaus Genuit den Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (inzwischen: Sachverständigenrat für Umweltfragen) zitiert, beschrieb dieser 1987 den A-bewerteten Schalldruckpegel als eine nur bedingt „gehörgerechte Schallfeldanalyse“ (Genuit, 1998, S. 149). Besonders deutlich wurden die Problematiken der A-Bewertung vor über 30 Jahren in der Automobilbranche und der Vermessung von Fahrzeuggeräuschen. Erkannt wurde, dass ein niedriger Schalldruckpegel nur begrenzt mit akustischem Wohlbefinden korreliert (Maschke & Jakob, 2018). Während einige Autoren, wie Klaus Genuit, differenziert bemerken, dass „eine A-bewertete Schalldruckpegelmessung eine notwendige, aber nicht eine hinreichende Größe zur sicheren Prädiktion von Lärmbelastungen [ist]“ (Genuit & Fiebig, 2014), formulieren H. Fastl und E. Zwicker deutlichere Kritik. „Consequently, it is too simple to approximate loudness level by a single weighting such as the A-weighted sound pressure level“ (Fastl & Zwicker, 2007, S. 205).

Brian Moore argumentiert, dass die A-Bewertung lediglich länger andauernde Töne adäquat abbilden kann, während kurze Töne zu verschiedenen empfundenen Lautheiten führen können (s. 2.2.3 Psychoakustik subjektive Dauer und Rhythmus) (Moore, 2013, S. 136 f.). Außerdem spielen, wie bereits erläutert, neben der Pegelstärke und der zeitlichen Struktur, der spektrale Aufbau eine große Rolle. Dieser kann jedoch nicht durch eine Frequenzbewertung angenähert werden. (Fastl & Zwicker, 2007, S. 205) Die nichtlineare Natur des menschlichen Gehörs, also die Tatsache, dass breitbandige Schalleignisse lauter wahrgenommen werden als schmalbandige (auch bei gleichem dB(A)-Pegel), wird nicht berücksichtigt (Zollner, 1998, S. 175). Eine Vielzahl an Beispielen alltäglicher Situationen (keine künstlichen Stimuli) belegen diese Tatsache (z. B. Fast und Zwicker (2007, S. 233 ff., S. 315 ff.),

Kalivoda und Zollner in Kalivoda (1998, S. 165-204), Schick (1990)). Mit Blick auf die Bildung des Schalldruckpegels (Gleichung 1, S. 14) wird erkennbar, dass der Schalldruckpegel als gleichwertige Summation über alle Frequenzen gebildet wird. Dabei wird der Einfluss der Frequenzgruppenbänder nicht berücksichtigt (Moore, 2013, S. 136) (Schick, 1990, S. 41).

Wie im Abschnitt der technischen Akustik (2.2.1 Technische Akustik) erläutert, bildet sich die A-Bewertungskurve in etwa aus der 40 phon Kurve. Diese wurde an steten schmalbandigen Geräuschen bzw. reinen Tönen erstellt. Demnach stellt ein A-bewerteter Schalldruckpegel ein Schallereignis nur dann korrekt dar, solange dieses höchstens schmalbandig ist und einen Pegel von etwa 40 phon besitzt (Kalivoda, 1998, S. 113). Ein weiteres Problem der A-Bewertung ist die starke Dämpfung der tiefen Frequenzen, was nach Schick (1990) in der Bauakustik auffällt, wenn von einer Lärmquelle tiefe Frequenzen in Räume gelangen (z. B. durch Körperschall). Der A-bewertete Schalldruckpegel kann mit niedrigen Werten ausreichende Ruhe suggerieren, obgleich ein hörbarer und störender Schall wahrnehmbar ist (Schick, 1990, S. 31 ff.). In solchen Schallsituationen mit ausgeprägten tieffrequenten Anteilen sei es zu erwägen statt der A-Bewertung die C-Bewertung zu verwenden (Genuit & Fiebig, 2014).

Der dennoch seltener verwendete C-bewertete Schalldruckpegel wird meist bei lauten Schallereignissen verwendet und soll die 100 phon Kurve annähern. Wie der Bewertungskurve anzusehen ist, verläuft sie über weite Teile des Spektrums linear (s. 2.2.1 technische Akustik Frequenzbewertung). Fastl und Zwicker (2007, S. 204) weisen bei der Betrachtung der Kurven gleicher Lautstärke (Abbildung A.6 im Anhang) auf die verhältnismäßig noch tiefere Einbuchtung zwischen 2 - 5 kHz bei hohen Lautstärkepegeln hin. Diese führt in ihrem Maximum zu einer Differenz von bis zu 10 phon gegenüber den 100 dB des 1 kHz Tons. Dies entspräche einer Verdoppelung der Lautheit. Die in diesem Bereich geradlinige C-Bewertung würde somit einen 100 phon lauten Ton dieses Frequenzbereichs um die Hälfte der Lautheit unterbewerten. Hier sei darauf verwiesen, dass dies eine Beobachtung des Autors der vorliegenden Bachelorthesis ist und mit Literatur nicht bestätigt werden konnte.

Der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{Eq} stellt in der Praxis eine weit verbreitete Messgröße dar. Die Erstellung eines Einzahlwertes über Schallereignisse mit ausgeprägter Zeitstruktur führt jedoch zum Verlust der Vergleichbarkeit und der Information des Schallcharakters. Als eines von zahlreichen Beispielen stellt Abbildung 26 (S. 59) dies deutlich dar. Die Reduzierung auf einen Mittelungspegel von 67 dB(A) suggeriert eine vermeintliche Vergleichbarkeit (Lercher, 1998, S. 47 ff.). Eine weitere Problematik des Mittelungspegel liegt in seiner Berechnung. Durch die Aufintegration der Schallenergie über den Betrachtungszeitraum haben Schallanteile, die mehr als 10 dB unter dem Mittelungspegel liegen, keinen Einfluss mehr. Lercher zitiert zu diesem Effekt G. Fleischer, der den Begriff der „Barriere des Mittelungspegels“ einführt. Alle Schallanteile, deren Pegel unterhalb dieser Barriere liegen, haben unabhängig ihrer Beschaffenheit keinen Einfluss auf den Dauerschallpegel. Unterhalb dieser Grenze lässt sich somit Ruhe durch Lärm ersetzen. Sehr deutlich zeigt Abbildung A.7 im Anhang diesen Effekt. (Lercher, 1998, S. 68) Ein weiteres Argument gegen die integrale Betrachtung von Schall führt M. T. Kalivoda an. Schall stellt keinen klassischen Schadstoff dar, der in der Umwelt verbleibt. Somit ist eine Integration, also eine Summation über die Zeit, im Sinne einer Dosisbetrachtung kritisch zu hinterfragen. Zusammenfassend haben die Auswertungszeit und die hohen Schallpegelanteile eines Ereignisses sowie die fragliche Auswirkung von Ruhe großen Einfluss

auf den energieäquivalenten Dauerschallpegel. Pegelzu- und abschlüge dienen in der Praxis zur Berücksichtigung dieser Einflüsse (s. 2.2.1 Technische Akustik Beurteilungsgrößen) (Kalivoda, 1998, S. 113 ff.). In Bezug auf die akustische Situation in sinfonischen Orchestern spielt dies durchaus eine Rolle, da über den Arbeitstag verteilt Ruhepausen und Spielzeiten wechselnd auftreten.

Die ebenfalls weit verbreiteten zeitlichen Bewertungen bergen Problematiken auf die jedoch im Rahmen vorliegender Arbeit nicht eingegangen werden kann. An dieser Stelle wird unter anderem auf M. T. Kalivoda (1998, S. 48, S. 121 ff., S. 203 f.) verwiesen.

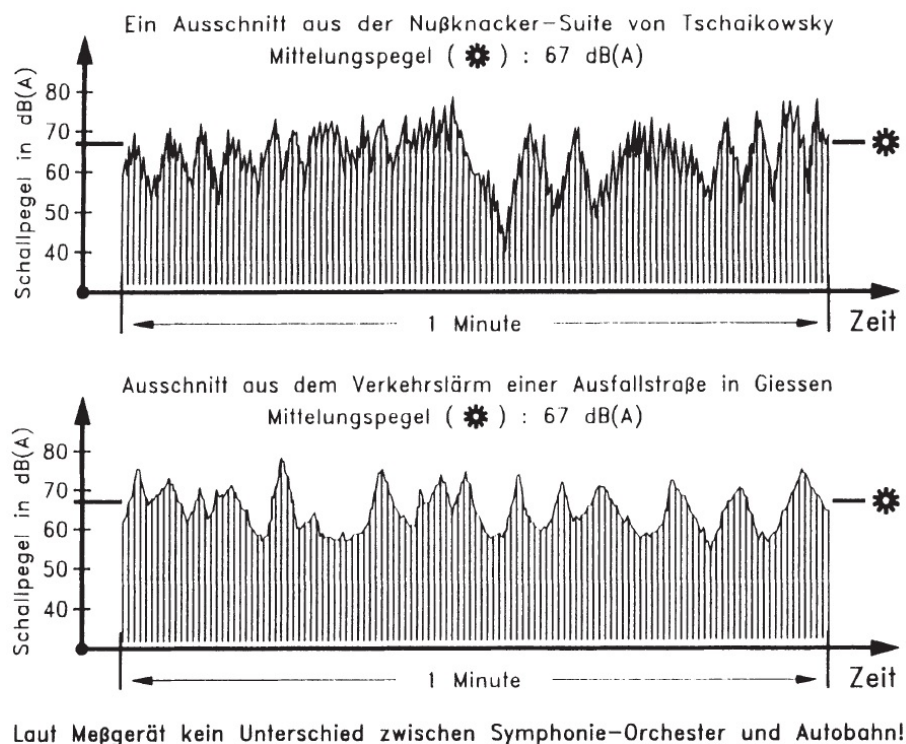


Abb. 26: Zwei gänzlich verschiedene Schallereignisse zeigen den Verlust des Schallcharakters durch die Reduzierung auf den äquivalenten Dauerschallpegel (Lercher, 1998, S. 48)

5.2 Verhältnislautheit sone und verwendetes Lautheitsmodell nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1

Die Notwendigkeit differenzierter Schallbetrachtung scheint unbestritten und B. Moore äußert, dass „loudness models [...] have been rather successful“ (Moore, 2013, S. 140). Eine große Zahl an Anwendungssituationen stützen diese Behauptung (z. B. Fastl und Zwicker (2007, S. 317 ff.), jedoch können auch diese komplexen Lautheitsmodelle Schallerlebnisse nicht gänzlich beschreiben. Im Folgenden werden einige Studien zur Evaluation von Lautheitsmodellen angeführt und deren Ergebnisse erörtert. Besonders Studien, welche die Modelle mithilfe von Sprache und Musik beurteilen, werden ausführlicher vorgestellt.

G. A. Soulodre untersuchte die Qualität von Lautheitsmodellen in audilogischen Versuchen mit insgesamt 97 Versuchspersonen, durch einen Vergleich zwischen Referenzschall (englischsprachige,

weibliche Rede mit 60 dB) und 98 Sequenzen aus Film und Fernsehen (Sprache, Werbung, Musik, Film, etc.). Die Versuchspersonen stellten den Pegel der Testgeräusche so ein, dass sie gleich laut wie die Referenzrede wahrgenommen wurden. Durch statistische Kenngrößen wurde die Prognosequalität von insgesamt 12 Verfahren geprüft. Aus Identitätsgründen wurden jedoch nicht alle Namen der Lautheitsmodelle veröffentlicht (A-K benannt). Vier der 12 untersuchten Verfahren entsprechen den Dauerschallpegeln L_{Eq} , L_{AEq} , L_{BEq} und $L_{Eq(RLB)}$. Letztere Pegelgröße ist eine „revised Low-frequency B-weighting“ Bewertung. Die Messgrößen $L_{Eq(RLB)}$ und L_{Eq} schnitten unter allen Modellen am besten ab. Der L_{AEq} erreichte lediglich den 11. Platz. (Soulodre, 2004)

In „Comparison of loudness models for time-varying sounds“ vergleichen die Autoren Rannies, Verhey und Fastl zwei aktuellere zeitvariante Lautheitsmodelle. Verwendet wurden die Modelle nach Glasberg und Moore sowie nach Chalupper und Fastl (beide veröffentlicht 2002). Das Modell von Chalupper und Fastl schien letztendlich etwas besser die Lautheit von Schallen mit zeitlich stark schwankenden spektralen Eigenschaften abzubilden. Da jedoch nur künstliche Stimuli betrachtet wurden und nicht auf das Modell nach Zwicker eingegangen wurde, wird für Informationen auf den Originaltext verwiesen. (Rannies et al., 2010)

Die Autoren Zorilă, Stylianou, Flanagan und Moore (2016) beschreiben in „Effectiveness of a loudness model for time-varying sounds in equating the loudness of sentences subjected to different forms of signal processing“ einen Test für das Lautheitsmodell von Glasberg und Moore (2012). Dieses Modell soll die Lautheit von Sprache besonders gut wiedergeben und wurde durch signalverarbeitete Sprachbeispiele und unbearbeitete Beispiele auf die Probe gestellt. (Zorilă et al., 2016) Themengebiete vorliegender Arbeit wurden jedoch nicht berührt.

Die Wissenschaftler Skovenborg und Nielsen veröffentlichten 2004 eine ausführliche Studie über die Evaluation von insgesamt 12 Lautheitsmodellen. Die Daten wurden an zwei verschiedenen Instituten mit insgesamt 16 Probanden und 276 Sprach- und Musikbeispielen erhoben. Mittels statistischer Indikatoren wurde die Übereinstimmung von gemessener und wahrgenommener Lautheit geprüft. Verwendet wurden zahlreiche Varianten des Dauerschallpegels (L_{CEq} , L_{AEq} , L_{BEq} , L_{DEq} , L_{MEq} , $L_{Eq(Lin)}$, $L_{Eq(RLB)}$) sowie zwei verschiedenen Implementationen des Lautheitsmodells nach Zwicker (u. a. nach ISO 532), zwei weitere Lautheitsmodelle (TC LARM, TC HEIMDAL) und die 50-Perzentilwerte eines Peak Program Meter (PPM). Das Modell LARM stellt ein sogenanntes single-band model dar, das aus einer Kombination bekannter Methoden besteht (Pseudo-peak Detektor, Frequenzbewertung). Das Modell HEIMDAL ist wie auch das Modell nach Zwicker ein multi-band model. Es verwendet im Gegensatz zu den meisten Lautheitsmodellen zur Annäherung der Frequenzgruppenbänder ein Oktavbandfilter statt eines Terzbandfilters. Da wie Skovenborg und Nielsen ausführen, „[consists] a strong interdependency between the dynamical behavior at frequencies in neighboring critical bands [for speech and music signals]“ (Skovenborg & Nielsen, 2004, S. 11). Die Autoren kategorisierten entsprechend der Ergebnisse alle Modelle in vier Klassen. Die Klasse 1 mit den am besten agierenden Modellen bis hin zu den schlechtesten in Klasse 4. An erster Stelle in Klasse 1 steht der Studie zufolge das Modell HEIMDAL und LARM. Die Klasse 2 stellen L_{CEq} , $L_{Eq(Lin)}$ und $L_{Eq(RLB)}$ dar. Die beiden Zwicker Implementierungen liegen in Klasse 3 zusammen mit L_{BEq} und PPM (50%). Den Abschluss bilden die Dauerschallpegel L_{AEq} , L_{DEq} und L_{MEq} in Klasse 4. Im Kapitel der Abgrenzung zu vorhergegangenen Studien erwähnen die Autoren jedoch zwei Studien von R. M. Aarts (1991, 1992), die das Modell von Zwicker deutlich positiver positionieren. Außerdem erwähnen die Verfasser eine weitere

Studie zur Evaluierung des $L_{Eq(RLB)}$, in welcher der $L_{Eq(RLB)}$ als bestes Verfahren aller betrachteten abschnitt. (Skovenborg & Nielsen, 2004)

Eine nächste Studie zur Evaluation von Pegelmaßen und Lautheitsmodellen wurde 2016 von Schmidt, Kollmeier und Uppenkamp veröffentlicht. Diese Studie verwendete Musik als Testsignale und evaluierte die Verfahren und Einheiten dB, dB(A), EBU-R128 (Empfehlung europäischer Rundfunk), DIN 45631, DIN 45631/A1, MG02 (Moore und Glasberg), DLM (Fastl und Chalupper) sowie dessen Erweiterung (extension) DLM_ex (Rennies und Verhey) mittels einer statistischen Kenngröße. Die Daten wurden für leisere und lautere Musikausschnitte erhoben. Unterteilt wurden die Ergebnisse in drei Kategorien unterschiedlicher Qualitäten. Für leisere Musik lieferte der A-bewertete Schalldruckpegel die beste Prognose, während dieser bei lauten Ereignissen mittelklassig abschnitt. Bei lauten Schallen war das Verfahren EBU-R128 am besten geeignet. Das Modell nach DIN 45631 schnitt bei lauten Schallen schlecht ab, während das Verfahren nach DIN 45631/A1 als mittel eingestuft wurde. (F. Schmidt et al., 2016)

Eine von Rennies, Verhey, Appell und Kollmeier veröffentlichte Studie vergleicht durch audiologische Versuche Lautheitsmodelle (DLM, DLM_ex, Glasberg und Moor) mit sprachähnlichen und technischen Geräuschsituationen (Rennies et al., 2013). Auf von vorliegender Arbeit verwendete Modelle wurden nicht eingegangen.

2015 wurde die Studie „Lautheitsbeurteilung von Musik: Methoden und Modellvergleiche“ von Schmidt, Kollmeier und Uppenkamp veröffentlicht. Verglichen wurden der unbewertete Schalldruckpegel, der nach ITU-R BS.1770-2 (International Telecommunication Union) bewertete Schalldruckpegel und das bereits mehrfach erwähnte DLM von Fastl und Chalupper. Laut der Studie stimmen alle drei Verfahren gut mit der subjektiv wahrgenommenen Lautstärke überein. Jedoch bemängeln die Autoren die niedrige Anzahl an Versuchspersonen und sehen die Ergebnisse ihrer Studie kritisch an. (F. Schmidt et al., 2015)

Zuvor genannte Studien konzentrierten sich auf den Vergleich und die Auswertung mittels statistischer Kennzahlen. Ruschkowski widmete sich in seiner Dissertation (2013) allerdings der Lautheit von Musik weniger von der „technischen“ Seite, vielmehr waren psychologische und individuelle Themen im Vordergrund. So untersuchte er den Einfluss von Musikpräferenz, Geschlecht, Alter und momentaner Befindlichkeit. Außerdem kritisiert Ruschkowski die psychoakustische Lautheitsforschung. So zitiert Ruschkowski Kritiken an der Verhältnislautheit in sone und deren Erstellung. Zum einen sei die Aufgabe für ungeübte Probandinnen und Probanden die Lautheit zu halbieren bzw. verdoppeln schwierig. Zum anderen ist fraglich, ob durch die Tatsache, dass ein Ereignis leise oder laut sein kann, zwingend auch eine Verdopplung bzw. Halbierung der Lautheit nennbar sein muss. Die Ergebnisse, dass eine Verdoppelung der Lautheit einer Zunahme um 10 phon entspricht, wird ebenfalls hinterfragt. So weisen die Versuchsergebnisse zu diesem Zusammenhang sehr große Abweichung auf (10 phon entspricht dem Median). Ruschkowski führt weiter an, dass die überwiegend verwendeten künstlichen Stimuli keinen alltäglichen Geräuschen entsprechen. Außerdem wird den psychoakustischen Versuchen ein Mangel an externer Validität vorgeworfen, da zum einen wenige Versuchspersonen üblich sein, zum anderen deren Auswahl kritisch zu hinterfragen sei. Ferner bemängelt Ruschkowski die psychologische Herangehensweise der Psychoakustik. Er erläutert einen systemischen Wandel der weitgefassten Psychologie von sogenannten Bottom-up Modellen zu Top-Down Modellen. Der zitierte Autor Goldstein erklärt ein Bottom-Up Modell, als eine Betrachtung von unten nach oben. So wird

Wahrnehmung durch die Reizbeschreibung selbst charakterisiert (Bottom-Up). Im Gegensatz dazu beschreiben Informationen höherer Verarbeitungsebenen (Vorwissen, Bedeutung, Erwartung an Reize) eine Top-Down Betrachtung. Ruschkowski erläutert, dass kein derartiger Wandel in der psychoakustischen Forschung zu bemerken ist. (Ruschkowski, 2013) Dies gilt es allerdings kritisch zu beleuchten, denn trotz des von Ruschkowski beschriebenen Wandels, finden sich Studien, die die Bottom-Up Theorie der Lautheitswahrnehmung belegen. So zeigen die Autoren Ferguson et al. (2011) Versuchsergebnisse, die trotz differenzierter Betrachtung beider Theorien auf Bottom-Up statt Top-Down Prozesse schließen lassen. Der Studie nach ist die wahrgenommene Lautstärke in erster Linie abhängig von der Signalintensität. (Ferguson et al., 2011)

Um die Frage der Verfahrensqualität zu beantworten, stellte Ruschkowski audiologische Versuche an. Seine Ergebnisse legen nahe, dass „Lautheitsmodelle – bei all ihrer Komplexität – die Lautheit natürlicher Schallereignisse häufig nicht besser vorherzusagen vermögen als einfache Verfahren“ (Ruschkowski, 2013, S. 180–181). Auch wenn dieses Ergebnis im Einklang mit einigen Studien steht, ist aus Sicht des Autors vorliegender Arbeit diese Folgerung aus Ruschkowskis Daten nicht unkritisch anzunehmen. Ruschkowski verwendete zur Erstellung der Lautheitsdaten eine Implementierung der DIN 45631 für zeitinvariante Schalle, obwohl Musik deutlich zeitvariant ist. Auf diesen Umstand weist Ruschkowski hin und nimmt diesen Umstand argumentierend in Kauf. Wie jedoch in anschließendem Kapitel gezeigt wird, gibt die DIN 45631/A1 eine Entscheidungsgrenze über Zeitvarianz oder Invarianz. Die Berücksichtigung dieser normativen Vorgaben oder eine Erklärung bleibt Ruschkowski schuldig.

Zuletzt wird auf die 2011 von Kuwano et al. veröffentlichte Publikation eingegangen. Die Autoren führten Hörversuche mit 11 Probanden zur Evaluierung von Lautheitsmodellen durch. Getestet wurden L_{AEq} , L_{Eq} und die Verfahren nach Zwicker für invariante Schalle, für variante Schalle (DIN 45631/A1), das N5 und N10 Perzentil. Evaluiert wurde mithilfe 26 Teststimuli, die neben vier Breitbandrauschsignalen Musikinstrumente (Klavier, Orgel, Gitarre, Blockflöte, Violine, Trompete) und orchestrale Schallereignisse enthielten. Statistische Kenngrößen bilden die Argumentationsgrundlage. Besonderen Fokus legten die Autoren auf die Güte der Perzentillautheiten. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dem N5 und dem N10 Perzentil festgestellt wurde. Die gemittelten Lautheiten schnitten insgesamt besser ab als die Perzentilwerte und pegelbasierten Kenngrößen. (Kuwano et al., 2011)

Neben den Verfahren gilt es auch die Problematiken der Perzentilbewertungen anzumerken. Wie bereits erwähnt wird bei zeitlich schwankenden Geräuschen als Gesamtlautheit ein Perzentilwert gewählt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass laute Schallereignisse während einer Beobachtungszeit die wahrgenommene Gesamtlautheit stark beeinflussen. Die Nachteile dieser Betrachtung decken sich teilweise mit den Nachteilen des energieäquivalenten Dauerschallpegels. Durch die Angabe eines Einzahlwertes ist keine Berücksichtigung der Struktur des Ereignisses möglich. Zwei Geräusche mit dem gleichen Perzentilwert können somit gleich laut scheinen, sich aber in ihrem Auftreten gänzlich unterscheiden. (Kalivoda & Steiner, 1998, S. 116)

Zusammengefasst zeigt sich zwar keine systematische Überlegenheit des Verfahrens nach Zwicker bzw. DIN 45631, jedoch schnitten A-bewertete und pegelbasierte Messgrößen in der Regel schlechter ab. Darüber hinaus wurde deutlich, dass einige Verfahren dem Lautheitsmodell nach Zwicker bzw. DIN 45631 überlegen sind.

6 Messungen - Pegelbasierte Messgrößen und Lautheit nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1

Nachfolgend wird zuerst die verwendete Messtechnik sowie der Aufbau und Ablauf erläutert. Die Ergebnissen der Messungen beim Sinfonieorchester Münchener Universitäten, beim Symphonischen Ensemble München und die Ergebnisse der Unterrichtsstunde folgen. Abschließend werden diese diskutiert und in Zusammenhang gebracht. Die erstellten Messdaten werden zur Beantwortung der Forschungsfrage hin untersucht.

6.1 Messtechnik

Zur Erstellung aller Daten wurde ein Messsystem verwendet, das fast ausschließlich von der Firma Dr-Jordan-Design stammt. Das System enthält eine vorpolarisierte Kondensator Kapsel (1/2", Klasse 1, Kalibrierschein s. Anhang Abbildung C.1), einen Impedanzwandler, Vorverstärker, digital steuerbares Dämpfungsglied, AD-Wandler, USB-Interface und einen Spannungswandler. Bis auf die Kapsel sind alle genannten Teile in einem Gehäuse mit USB-Anschluss verbaut (Kapsel und Gehäuse nachfolgend nur noch als Mikrofon bezeichnet). Die Kapsel ist tauschbar und aufgeschraubt. USB-Kabel verschiedener Längen (2 m, 10 m, 15 m) verbinden mit einer maximalen Gesamtlänge von 27 m Mikrofon und Laptop. Die nötige Software (WinAudioMLS) zur Erstellung aller Daten ist auf einem Laptop (Dell XPS 15) installiert und wurde ebenfalls von der Firma Dr-Jordan-Design entwickelt.

Da die verwendete Software (WinAudioMLS) angibt DIN 45631, DIN 45631/A1 und DIN ISO 532-1 konform zu sein, muss diese laut DIN ISO 532-1 für alle gegebenen Testtöne Ergebnisse im Rahmen der Toleranzen liefern (s. Gliederungspunkt 2.2.3 Psychoakustik Lautheitsmodell nach E. Zwicker). Die Implementierung von Dr-Jordan-Design wurden nicht eigenständig mit der Norm verglichen, jedoch lagen zum Zeitpunkt der Erstellung vorliegender Arbeit die Testresultate für ein zeitvariantes Testsignal vor. Diesem Dokument nach erfüllt die Implementierung die Vorgaben (s. Anhang: Dokumente). Das Messsystem wird als reliabel angesehen.

Die erwünschten pegelbasierten Messgrößen stellen sich aus den Ergebnissen der Literaturrecherche und aus den gesetzlichen Vorgaben des Schallschutzes zusammen. Wie die Ergebnisse der Recherche zeigen, verwendeten betrachtete Studien zumeist die Größen unbewerteter Schalldruckpegel L_Z in dB(Z), A-bewerteter Pegel L_A in dB(A), C-bewerteter Pegel L_C in dB(C) und bewertete Formen des energieäquivalenten Dauerschalldruckpegels. Die LärmVibrationsArbSchV gibt Grenzwerte als Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ in dB(A) und als $L_{C,peak}$ in dB(C) an (Lärm-VibrationsArbSchV, Bundesregierung (2007)).

6.2 Aufbau und Ablauf

Das Mikrofon wurde während jeder Messung in einer Halterung und auf einem Stativ montiert. Die Ausrichtung des Mikrofons erfolgte entlang der Referenzrichtung bzw. der Symmetrieachse (Werner, 2018, S. 38). Die Lagerung wurde zur Vermeidung von Körperschall möglichst elastisch gewählt (s. Abbildung A.8 im Anhang). Aufgestellt wurde das Mikrofon jeweils vor Registern mit den erwarteten Höchstpegeln, um Werte der maximalen Schallbelastung zu erfassen. Vorangestellte Literaturrecherchen konstatieren die Trompeten und Posaunen als Register mit den höchsten Schalldruckpegeln. Dazu wurde das Mikrofon auf Kopfhöhe der davor sitzenden Musiker/-innen und in realistischer Entfernung zur Quelle (zwischen den Musikern/-innen) platziert. An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund des Vergleichs der Messgrößen räumliche sowie positionelle Einflüsse vernachlässigbar sind. Es bedarf daher auch keiner einheitlichen und reproduzierbaren Positionierung, da jeweils die Lautheit und der Schalldruckpegel der exakt selben Situation, Messdauer und Ereignis verglichen werden. Die Auswertungen innerhalb eines Orchester (bspw. Auswertung 1 und 2 des Sinfonieorchesters der Münchener Universitäten) lassen ebenfalls eine sinnvolle Betrachtung zu, da die Messposition und Räumlichkeit nicht geändert wurden. Einflüsse des Repertoires und der Besetzung können demnach beleuchtet werden. Um Konsequenzen verschiedener Schallsituationen auf die Messgrößen zu belegen, muss lediglich die Errechnung der verwendeten Werte wiederholbar sein. Durch die Verwendung stets des gleichen Messsystems und korrekter Kalibrierung wurde dies gewährleistet. Kalibriert wurde mittels eines Schallkalibrators der Firma Norsonic (Type 1251, 114,0 dB, 1000 Hz, 1/2"). Der Messablauf folgte nicht strikt Norm, da keine derart belastbaren Daten gefordert sind. Dennoch wurde die DIN EN 61672-1 informierend herangezogen, um möglichst hochwertige Daten zu erzielen.

Der Messablauf wurden soweit wie möglich stets gleich durchgeführt. Nach dem Aufbau des Systems folgte der Start der Software, Einstellung des Messbereichs (55 - 140 dB) und anschließender Kalibrierung. Die eigentliche Messung verlief über eine zuvor festgelegte Zeitdauer und erzeugte alle gesuchte Werte ausschließlich der Lautheit.

Da die Berechnung der Lautheitswerte äußerst rechenintensiv ist, kann die Lautheit lediglich im Nachhinein über ein bestimmtes Zeitintervall (bis zu 6 Minuten) erstellt werden. Die nachträgliche Berechnung der Lautheit benötigt neben den gespeicherten Pegelverläufen Zugang zu den spektralen und zeitlichen Informationen des Schallereignisses. Dazu wurde während der Messung eine wave Datei aufgenommen, die für die Lautheitsberechnung verwendet wird. Die Ergebnisse werden über automatisch erstellte Diagramme und einen Bericht zugänglich.

Um die vorgenommenen Messungen stets reliabel durchzuführen, wurde vorab ein Ablaufplan erarbeitet (s. Anhang: Dokumente). Die Position des Mikrofons wurde aus Gründen der Dokumentation im Raum vermessen und in Übersichtsplänen dargestellt. Die illustrierten Sitzpositionen der Instrumente stimmen qualitativ, wurden jedoch nicht eingemessen.

Auch wenn die gemessenen Situationen keine Verallgemeinerung aller akustischen Belastungen von Musikerinnen und Musiker zulassen, wurde versucht, möglichst alltägliche Schallexpositionen zu erreichen. Des Weiteren sind die erstellten Werte auch nicht auf alle Individuen eines Orchesters übertragbar, da die Belastungen stark von der Sitzposition, dem Repertoire und der Besetzung abhängen (s. u. a. J. H. Schmidt et al. (2011)). Für umfangreiche pegelbasierte Messungen in Abhängigkeit

der Sitzposition sowie des Repertoires, wird auf genannte Literatur in Kapitel 4 (Ergebnisse der Literaturrecherche) verwiesen.

6.3 Ergebnisse

Die verwendete Software (WinAudioMLS) kann die Lautheit nur über ein maximales Zeitintervall von circa 6 Minuten kalkulieren. Ausgewählt wurden jeweils Zeitintervalle, die Pegelspitzen enthalten und somit möglichst hohe Lautheitswerte erzeugen. Da ein fälschlicher Einsatz der Lautheitsberechnung zu Fehlern führen kann (s. Zollner (1991), Zollner (1998)), gibt DIN 45631/A1 eine Grenze zur Unterscheidung von zeitvariantem und zeitinvariantem Schallereignis an. Es liegt ein zeitvariantes Schallsignal vor, sobald „der Quotient aus der Perzentillautheit N5 und der Perzentillautheit N95 einen Wert von 1,10 überschreitet“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010, S. 6). Übertrifft der Quotient nicht den Wert von 1,10, handelt es sich nach DIN 45631/A1 um ein stationäres bzw. zeitinvariantes Geräusch. Die Perzentilwerte N5 und N95 werden für jede Messung angegeben und verrechnet.

Um die Lautheit über ein längeres Zeitintervall mit schwankender Lautheit darzustellen, zeigten Untersuchungen, dass die wahrgenommene Gesamtlautheit nur eingeschränkt durch das arithmetische Mittel wiedergegeben werden kann (Kalivoda, 1994). Als besser geeignet stellte sich die Perzentillautheit N5 heraus (Fastl & Zwicker, 2007, S. 320, 323), die auch in die Norm (DIN 45631/A1) eingegangen ist. Zur Beurteilung der Gesamtlautheit wird daher der N5 Perzentilwert verwendet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind einige Lautheitswerte nach Gleichung 6 (S. 26) in die Einheit phon transformiert worden.

Außerdem werden die pegelbasierten Größen L_{ZEq} , L_{AEq} und $L_{C,peak}$ angegeben. Zusätzlich wurden aus den Pegelverläufen zum jeweiligen Messintervall die höchste erreichte Lautheit N_{max} und die Pegelwerte an der selben Stelle ($L_{Z,Nmax}$, $L_{A,Nmax}$, $L_{C,Nmax}$) ausgelesen. N_{max} kennzeichnet den Pegel, der an der Stelle der maximalen Lautheit herrschte. Dieser ist nicht zwingend auch der höchste Pegel des Messintervalls. Ein „!“ bei den Auswertungsergebnissen kennzeichnet solche Pegelwerte. Vor der Auswertung wurde jedes Intervall durch Abhören der Aufnahme datei auf Artefakte (Fremdgeräusche) untersucht. Es wurde sichergestellt, dass die Pegelverläufe und Maximalwerte durch Instrumente erzeugt wurden. Exemplarisch sind einige Pegelverläufe und Lautheitsverläufe im Anhang gezeigt. Es sei nochmals angemerkt, dass sich alle dargestellten Werte nur auf das jeweilige Messintervall beziehen.

Alle pegelbasierten Messgrößen wurden fast-zeitbewertet. Nach Feldmann (2018) wird diese für impulsive und zeitlich schwankende Schallsignale eingesetzt. Außerdem gilt die fast-Bewertung, wie in den Grundlagen erwähnt, als Standardeinstellung für Schalldruckpegelmessungen (Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2017).

Sinfonietta - Probensaal der Technischen Universität München

Das Sinfonieorchester Münchener Universitäten absolvierte am 19.1.2020 einen Probentag, an dem eine Durchlaufprobe des Programms für das Konzert am 02.02.2020 stattfand. Während einer Durchlaufprobe werden die Musikstücke möglichst ohne Unterbrechung durchgespielt. Dabei sind meist alle Musizierenden anwesend und alle Stimmen besetzt. Das Sinfonietta begann mit Claude Debussy

„Prélude à l'après-midi d'un faune“, gefolgt von Sergei W. Rachmaninoff „Rhapsodie über ein Thema von Paganini für Klavier und Orchester“ und schloss mit Pjotr I. Tchaikovsky Sinfonie Nr. 5. Die Messung fand während der gesamten Probe statt. Das Mikrofon stand mit einigem Abstand vor dem anwesenden Blechblasregister der Trompeten und Posaunen (2 Trompeten, 1 Posaune). Die Besetzung wechselte zwischen den Stücken, insgesamt waren jedoch rund 58 Musikerinnen und Musiker anwesend. Die Probe fand im Probenraum des Orchesters im Gebäude der Technischen Universität München statt (Raum: Stammgelände 0120). Im Anhang ist ein detaillierter Stellplan (P01) der Messsituation angefügt. Informationen über das Orchester finden sich auf dessen Homepage (<https://www.sinfonietta-muenchen.de/>, Stand 24.03.2020).

Zwei Auswertungen der Lautheit während der Probe des Sinfonietta sind in Tabelle 6 dargestellt. Auswertung 1 wurde über einen Ausschnitt von Debussy und Auswertung 2 über Rachmaninoff erstellt. Klangprägend im ersten Berechnungsintervalls waren neben den Streichinstrumenten unter anderem die Hörner, Flöten, Oboe, Fagott und Klarinette. Der Musikausschnitt der Auswertung 2 (Rachmaninoff) enthielt impulsive Einwüfe der Blechblassektion. Ferner zeigen die Abbildungen 27 und 28 (S. 67) die Verläufe der durchschnittlichen spezifischen Lautheit.

Tab. 6: Ergebnisse Sinfonietta - Auswertung 1 und 2

Auswertung 1	Debussy	Auswertung 2	Rachmaninoff
Intervall	5,99 min	Intervall	5,86 min
Lautheit N5	52,1 sone	Lautheit N5	71,0 sone
Lautheit N5	97,0 phon	Lautheit N5	101,5 phon
N50 N95	23,7 11,1 sone	N50 N95	25,9 7,3 sone
Lautheit N50	85,7 phon	Lautheit N50	87 phon
$N5/N95 \geq 1,10$	✓	$N5/N95 \geq 1,10$	✓
L_{ZEq}	86,9 dB(Z)	L_{ZEq}	91,7 dB(Z)
L_{AEq}	83,3 dB(A)	L_{AEq}	88,8 dB(A)
$L_{Z,Nmax}$	99,0 dB(Z)	$L_{Z,Nmax}$	103,0 dB(Z)
$L_{A,Nmax}$	96,5 dB(A)	$L_{A,Nmax}$	101,0 dB(A) !
$L_{C,Nmax}$	99,0 dB(C)	$L_{C,Nmax}$	103,0 dB(C)
N_{max}	80 sone	N_{max}	110 sone
$L_{C,peak}$	109,8 dB(C)	$L_{C,peak}$	116,4 dB(C)

Auswertung 2 zeigt das erwähnte Phänomen, dass die Pegelverläufe ihren Maximalwert nicht gleichzeitig an der Stelle der maximalen Lautheit aufzeigen (Kennzeichnung mit Ausrufezeichen). Im Anhang sind die Z, A und C-bewerteten Verläufen sowie der Lautheitsverlauf der Auswertung 2 angefügt (Abbildungen B.2-B.5). In den Verläufen sind die in Tabelle 6 gelisteten Werte ($L_{Z,Nmax}$, $L_{A,Nmax}$, $L_{C,Nmax}$, L_{Nmax}) markiert.

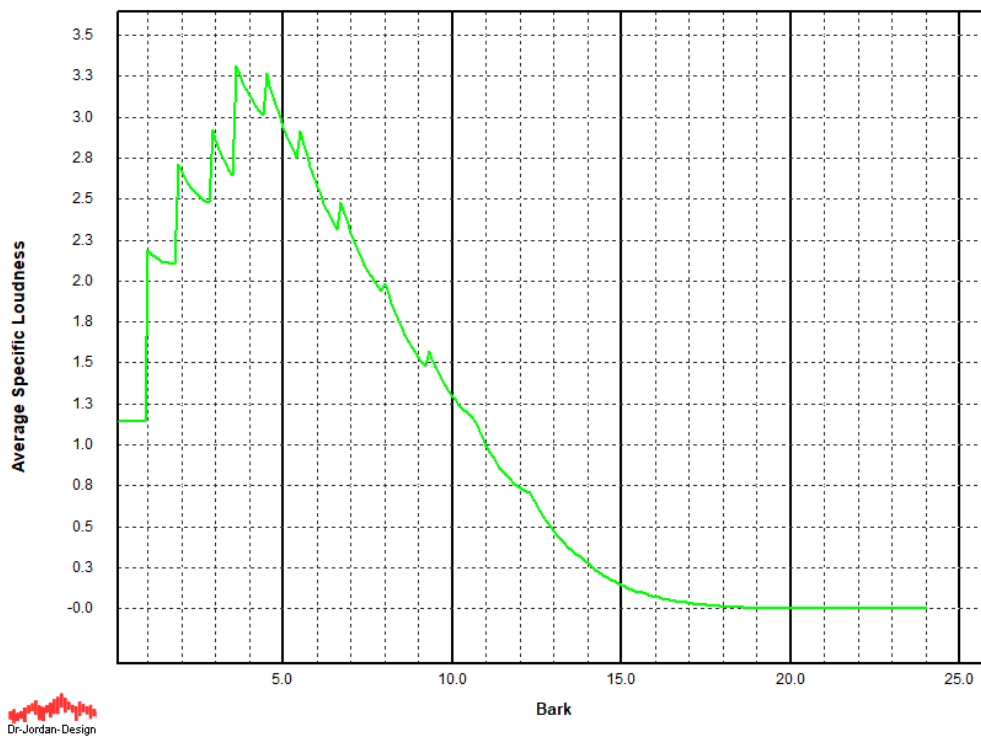


Abb. 27: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Debussy: Prélude à l'après...)

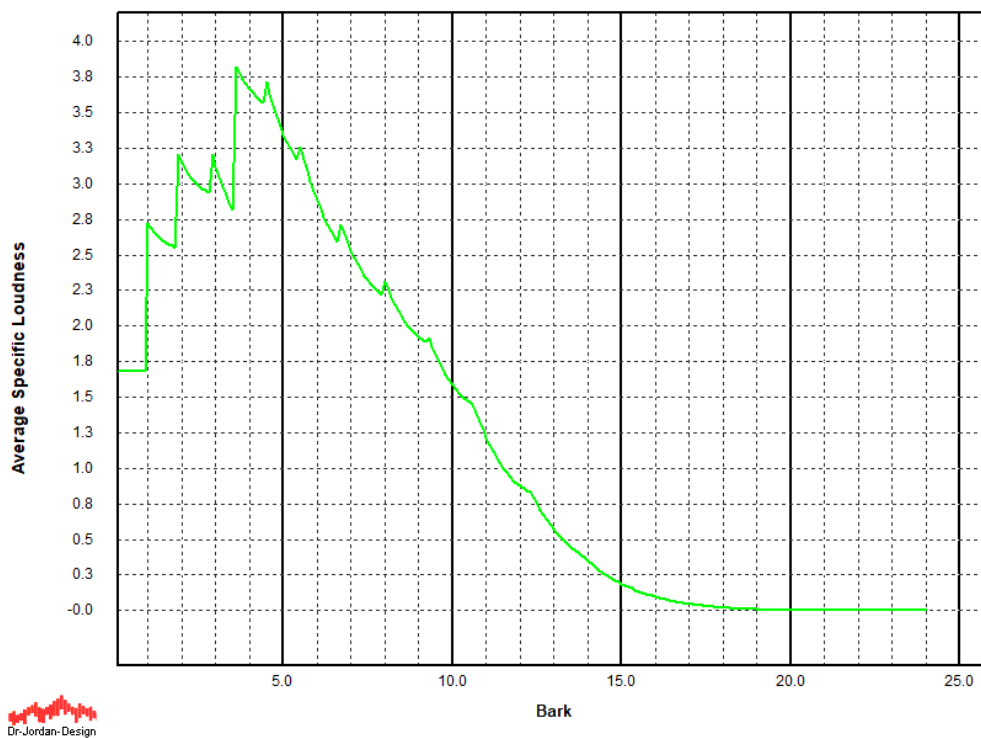


Abb. 28: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Rachmaninoff: Rhapsodie über ein Thema...)

Symphonisches Ensemble München - Münchner Gasteig

Am 23.11.2019 fand die Generalprobe des Symphonischen Ensemble Münchens (SEM) für das Adventsmatinee der Technischen Universität München in der Philharmonie im Gasteig (München) statt. Neben dem SEM probten der TUMChor und Solisten. Das SEM probte unter anderem Bearbeitungen der Komponisten Leopold Stokowski und Arnold Schönberg von Werken von Johann S. Bach. Geübt wurden die Kompositionen „Toccat und Fuge d-moll BWV 565“, „Komm, süßer Tod BWV 478“, „Schafe können sicher weiden BWV 208“ und „Präludium und Fuge Es-Dur BWV 552“. Die Messungen dauerten über das genannte Repertoire an. Die vier Trompeten und vier Posaunen saßen in einer Reihe, infolgedessen das Mikrofon nicht vor allen positioniert werden konnte. Der günstigeren Platzsituation geschuldet, stand das Mikrofon vor dem Posaunenregister. Insgesamt nahmen an der Probe rund 95 Musikerinnen und Musiker des SEM teil. Im Anhang findet sich ein detaillierter Plan des Messaufbaus. Gezeigter Ausschnitt (P03) begrenzt sich auf die Umgebung des Mikrofons und die primären Schallquellen. Ein weiterer Plan (P02) zeigt die gesamte Bühne der Philharmonie mit Planausschnitt des ersten Plans. Informationen über das Orchester sind dessen Internetauftritt zu entnehmen (<http://www.sem-muenchen.de/>, Stand 24.03.2020).

Auch hier wurden zwei Auswertungen der Probe erzeugt. Auswertung 1 beinhaltet einen Ausschnitt der Toccat und Fuge (J. S. Bach), bei der das Posaunenregister mitspielte. Die Auswertung 2 dagegen erstreckt sich über einen Ausschnitt der Komposition „Schafe können sicher weiden“ (J. S. Bach). In diesem Intervall sind keine Blechblasinstrumente gesetzt. Die Abbildungen 29 und 30 (S. 69) zeigen die durchschnittlichen spezifischen Lautheiten der beiden Auswertungen.

Tab. 7: Ergebnisse Symphonische Ensemble München - Auswertung 1 und 2

Auswertung 1	Bach, Toccat und Fuge	Auswertung 2	Bach, Schafe können sicher weiden
Intervall	4,43 min	Intervall	5,86 min
Lautheit N5	73,4 sone	Lautheit N5	24,0 sone
Lautheit N5	102,0 phon	Lautheit N5	85,9 phon
N50 N95	32,1 18,9 sone	N50 N95	16,5 7,5 sone
Lautheit N50	90,0 phon	Lautheit N50	80,5 phon
$N5/N95 \geq 1,10$	✓	$N5/N95 \geq 1,10$	✓
L_{ZEq}	92,2 dB(Z)	L_{ZEq}	78,0 dB(Z)
L_{AEq}	88,6 dB(A)	L_{AEq}	73,0 dB(A)
$L_{Z,Nmax}$	103,5 dB(Z)	$L_{Z,Nmax}$	85,0 dB(Z) !
$L_{A,Nmax}$	101,5 dB(A)	$L_{A,Nmax}$	77,5 dB(A) !
$L_{C,Nmax}$	103,0 dB(C)	$L_{C,Nmax}$	85,0 dB(C) !
N_{max}	107,5 sone	N_{max}	32,0 sone
$L_{C,peak}$	118,0 dB(C)	$L_{C,peak}$	96,1 dB(C)

Erneut unterscheiden sich in Auswertung 2 die Orte der maximalen Pegel gegenüber der maximalen Lautheit. Diesmal präzisieren alle bewerteten Pegelmaxima eine andere Maximalstelle als die Lautheit.

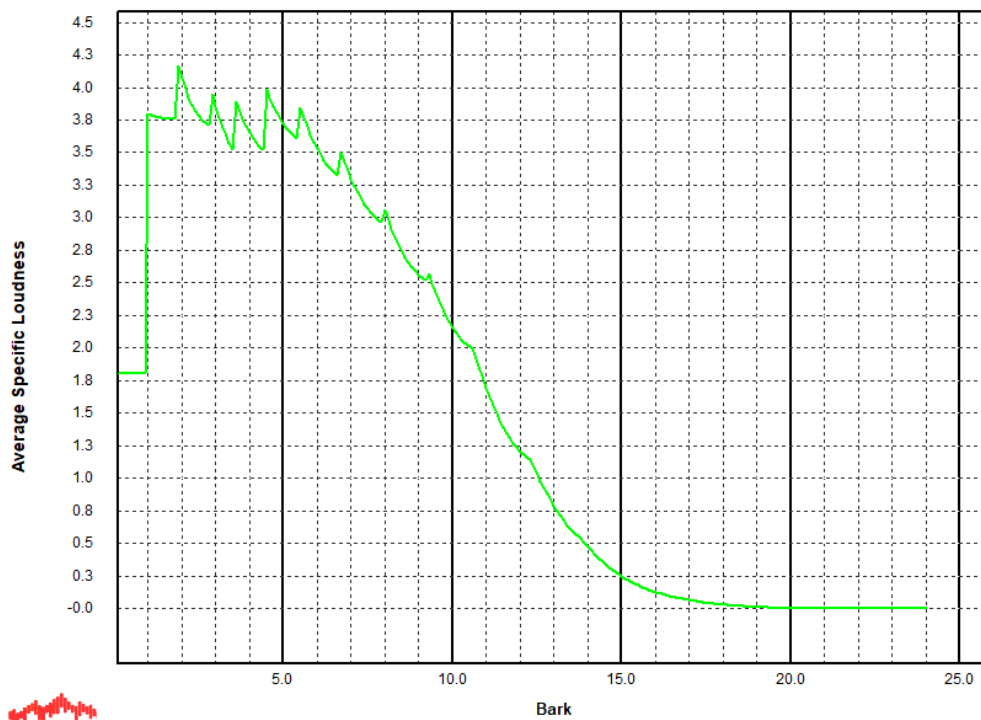


Abb. 29: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Bach: Toccata und Fuge d-moll)

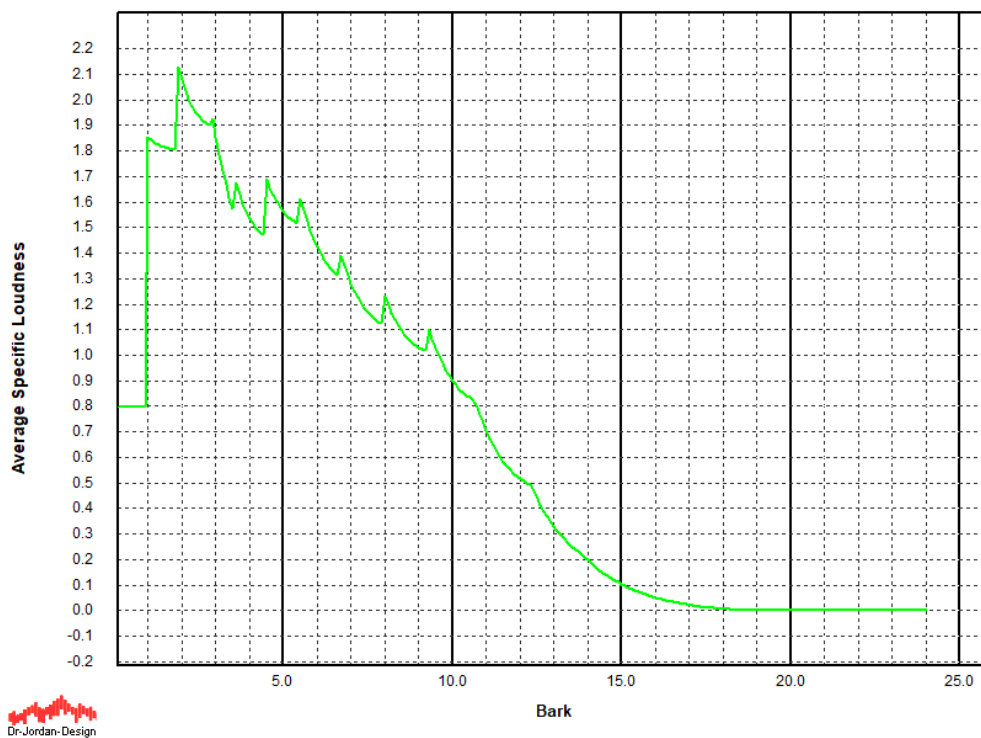


Abb. 30: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Bach: Schafe können sicher weiden)

Individueller Probenunterricht - bayerischen Staatsoper München

Die letzte Messung fand im Rahmen einer individuellen Unterrichtseinheit statt, da auch dies der Alltagsrealität der Musiker/-innen entspricht. Musikerinnen und Musiker, besonders professionelle, proben regelmäßig neben Orchesteraufführungen und üben intensiv selbstständig oder geben Unterricht. Gemessen wurde während einer einstündigen Unterrichtsstunde (Trompete) in einem der Stimmzimmer (Probenzimmer) des Bayerischen Staatsorchesters der Staatsoper in München. Das Mikrofon wurde auf Kopfhöhe neben den Musizierenden (Lehrer und Schüler) aufgestellt.

Auch zu dieser Situation wurden zwei Auswertungen vorgenommen. Während des Unterrichts wurden Technikübungen gespielt, bei denen sich Lehrer und Schüler abwechselten. Auswertung 1 umfasst Übungen im mittleren Tonbereich der Trompete, während Auswertung 2 tiefe Etüden enthält. Die Abbildungen 31 und 32 (S. 71) stellen die durchschnittlichen spezifischen Lautheiten dar.

Tab. 8: Ergebnisse Probenunterricht - Auswertung 1 und 2

Auswertung 1	mittlerer Tonbereich	Auswertung 2	tiefer Tonbereich
Intervall	2,97 min	Intervall	3 min
Lautheit N5	54,75 sone	Lautheit N5	54,37 sone
Lautheit N5	97,8 phon	Lautheit N5	97,7 phon
N50 N95	40,78 3,99 sone	N50 N95	42,33 1,99 sone
Lautheit N50	93,5 phon	Lautheit N50	94 phon
$N5/N95 \geq 1, 10$	✓	$N5/N95 \geq 1, 10$	✓
L_{ZEq}	93,2 dB(Z)	L_{ZEq}	91,3 dB(Z)
L_{AEq}	92,8 dB(A)	L_{AEq}	90,8 dB(A)
$L_{Z,Nmax}$	98,5 dB(Z)	$L_{Z,Nmax}$	96,0 dB(Z) !
$L_{A,Nmax}$	98,0 dB(A)	$L_{A,Nmax}$	96,0 dB(A) !
$L_{C,Nmax}$	98,5 dB(C)	$L_{C,Nmax}$	96,0 dB(C) !
N_{max}	65,5 sone	N_{max}	64 sone
$L_{C,peak}$	106,8 dB(C)	$L_{C,peak}$	108,2 dB(C)

In beiden Auswertung ist eine sehr ausgeprägte Zeitvarianz (Verhältnis N5 zu N95) erkennbar. Aufgrund des Wechsels nach wenigen Takten zwischen Lehrer und Schüler trugen häufige kurze Pausen zu dieser Varianz bei. Der Lautheitsverlauf der ersten Auswertung im Anhang (Abb. B.6) zeigt diesen Umstand. Auch in dieser Auswertung 2 stimmen die Pegelmaxima nicht mit dem gleichen Schallanteil des Lautheitsmaximums überein.

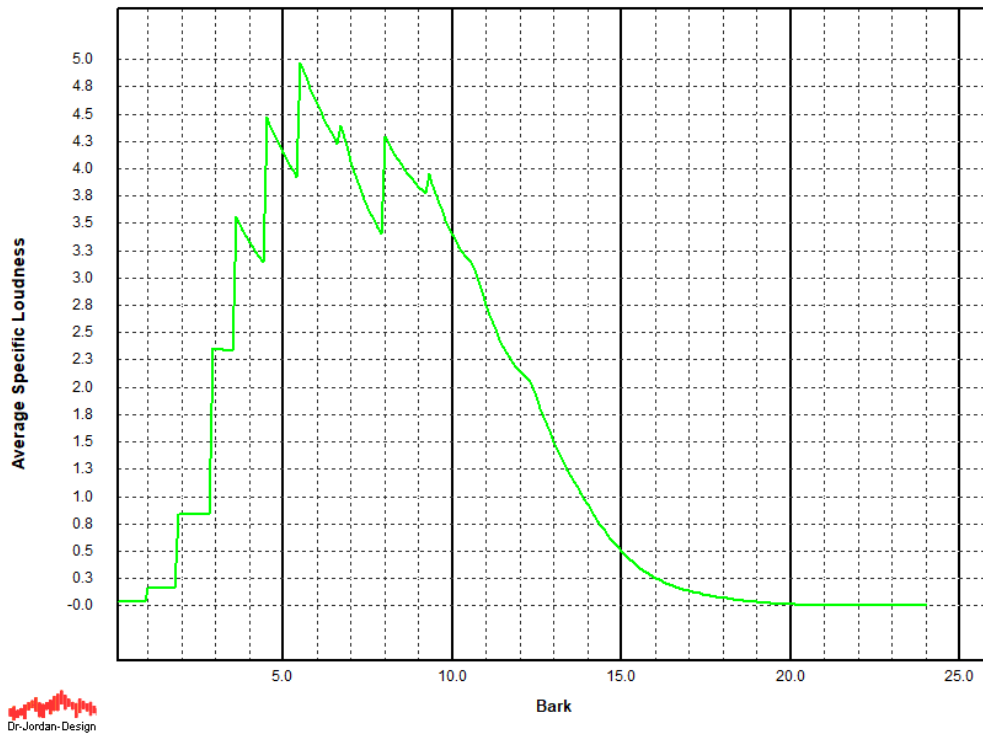


Abb. 31: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 1 (Etüden mittlerer Tonbereich)

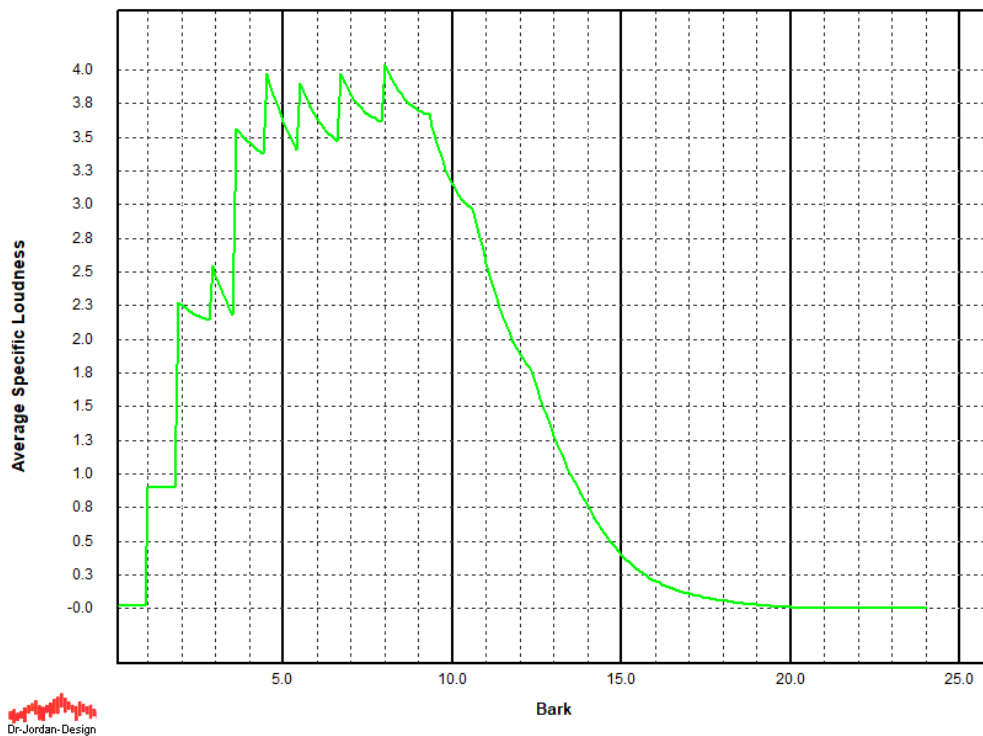


Abb. 32: Verlauf der durchschnittlichen spezifischen Lautheit des Auswertungsintervalls 2 (Etüden tiefer Tonbereich)

6.4 Diskussion der Ergebnisse

An erster Stelle ist anzuführen, dass alle eben erwähnten Auswertungen der Vorgabe eines zeitvarianten Schallereignisses nach DIN 45631/A1 entsprechen. Somit wurden alle Ereignisse mit dem Verfahren nach Zwicker für zeitvariante Schalle ausgewertet. Der Norm und der Literatur folgend entspricht somit das N5 Perzentil der wahrgenommenen Gesamtlautheit über das jeweilige Messintervall.

Die LärmVibrationsArbSchV gibt, wie in der Einleitung erwähnt, als unteren Auslösewert den Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ mit 80 dB(A) und als oberen Auslösewert den $L_{EX,8h}$ mit 85 dB(A) an. Der Peak-Pegel $L_{C,peak}$ ist an der unteren Grenze mit 135 dB(C) und an der oberen Grenze mit 137 dB(C) festgelegt (LärmVibrationsArbSchV, Bundesregierung (2007)). Wie die Daten der ausgewählten Messintervalle zeigen, wird der $L_{C,peak}$ zu keinem Zeitpunkt der Messungen erreicht. Jedoch ist anzumerken, dass das Auftreten von hohen Peaks stark von Instrument, Repertoire und Position der Messung abhängt (J. H. Schmidt et al., 2011) und somit nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Peak-Pegel während den Messintervallen an anderen Orten im Orchesters höher waren.

Auf eine Berechnung und Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels wurde aufgrund des Designs der durchgeführten Messungen sowie des Fokus auf dem Vergleich der Messgrößen verzichtet. Vor allem Messungen oder Umfragen zur täglichen Belastung durch individuelles Üben der Musizierenden, wären nötig, wurden aufgrund der Fragestellung jedoch nicht erstellt. Ferner sei auf in Kapitel 4.2 vorgestellte Studien zur Erstellung der Exposition verwiesen.

Durch die gewählten Methoden lassen sich keine Rückschlüsse ziehen, welche der ermittelten Werte der tatsächlich wahrgenommenen Lautstärke näher kommen. Eine quantitative Vergleichbarkeit wäre nur gegeben, wenn Hörversuche durchgeführt würden, die die Qualität der verwendeten Methoden einzuschätzen vermögen. Gliederungspunkt 5.2 Kritik der Lautheitsmodelle gibt einen Überblick zu derartigen Versuchen.

Dennoch lassen die ermittelten Daten einige Bemerkungen zu. Es besteht die Möglichkeit, die Lautheit in die Einheit phon umzurechnen und diese mit den gemessenen Werten in dB(A) zu vergleichen. Wie die Werte der Ergebnistabellen (s. Tabellen 6-8) belegen, bewerten die in phon dargestellten Ergebnisse die jeweiligen Schallereignisse deutlich höher als die Ergebnisse der gleichen Intervalle in dB(A). Mit Blick auf die Diagramme der spezifischen Lautheiten wird der Grund dafür in der Frequenzbreite der orchestralen Schallereignisse sichtbar. Dieser Zusammenhang ist bereits eingehend untersucht und derartige Vergleiche der Messergebnisse, zu meist an industriellen Geräuschen, zeigen unter anderem Fastl und Zwicker (2007, S. 235), Schick (1990, S. 41) sowie die Normen DIN 45631 und DIN ISO 532-1. Die Autoren Miśkiewicz und Rakowski (1994) untersuchten den Einfluss der spektralen Breite auf den Lautstärkenumfang einzelner Musikinstrumente mit Schalldruckpegelmessungen und Lautheitsmodellen (u. a. nach Zwicker). Auch diese Autoren verglichen ihre Ergebnisse in dB mit der Lautheit in phon (Miśkiewicz & Rakowski, 1994) und resultieren, dass die phon Werte aufgrund der spektralen Breite höher sind als die pegelbasierten Werte. Alle oben aufgeführten, eigenen Messungen decken sich demnach mit den Ergebnissen der Literatur. Bei Betrachtung der eigenen Messergebnisse ist allerdings auffällig, dass die N5 Lautheiten in phon sehr ähnlich zu den Maximalpegelwerten sind und Umrechnungen der N50 Perzentile kaum Unterschiede zu den Dauerschalldruckpegeln aufzeigen. Ob dies nun Zufall ist, auf eine gewisse Ähnlichkeit der Messmethoden verweist, Grundlage für Kritik

an der Gesamtlautheit als N5 Perzentil gibt oder auf einen zu hinterfragenden Vergleich hinweist, lässt sich ohne Hörversuche lediglich mutmaßen.

Die Möglichkeit die Messergebnisse in Relation zur Schmerzgrenze und zu den Grenzwerten der Verordnung zu setzen und somit Vergleiche durchzuführen, sind methodenbedingt nicht möglich. Die Schmerzschwelle, die teilweise in phon vorliegt, ist als eine Kurve gleicher Lautstärken anzusehen und variiert demnach stark in Abhängigkeit der Frequenz und spektralen Breite. Alle im Rahmen vorliegender Arbeit gefundenen Werte der Schmerzschwelle sind entweder Kurven, die anhand schmalbandiger Testtöne erstellt wurden, oder enthalten keine Berücksichtigung spektraler Effekte (s. z. B. Abbildung 6). Ebenfalls ist eine Umrechnung der gesetzlichen Vorlagen von dB(A) bzw. dB(C) in phon aufgrund der jeweiligen Bildungsgesetze nicht möglich (u. a. Zollner (1991)).

Darüber hinaus können weitere Ergebnisse aus den erhobenen Daten beleuchtet werden. Der Einfluss des Repertoires kann, wie andere Studien zuvor belegten (u. a. J. H. Schmidt et al. (2011)), bestätigt werden. Die Ratioskalierung der Einheit sone lässt, sofern die Daten einer Messung betrachtet werden, einen quantitativen Vergleich zu. Besonders die Lautheiten der Auswertung 1 und 2 während der Probe des SEM zeigen große Unterschiede. Mit einer Lautheit N5 von 73,4 sone bewertet das Lautheitsverfahren das Arrangement der Toccata und Fuge drei mal so laut wie „Schafe können sicher weiden“ (24,0 sone). Folgerichtig deutet die Differenz der jeweiligen phon Werte mit 16,1 dB ebenfalls auf eine Verdreifachung hin. Mit einer Differenz von 15,6 dB (88,6 dB-72,0 dB) zwischen den jeweiligen A-bewerteten Dauerschallpegeln deuten diese in etwa auch auf eine Verdreifachung hin. Bei Betrachtung der übrigen Auswertungen setzt sich dieser Zusammenhang fort. Offensichtlich bewerten die Verfahren die wahrgenommene Lautstärke unterschiedlich hoch, doch präzisieren sowohl die Lautheit als auch der Schalldruckpegel ein ähnliches Verhältnis zwischen den Auswertungen.

Werden die Maximalwerte betrachtet, stellt sich heraus, dass N_{max} der Auswertung 1 (107,5 sone) um einen Faktor 3,4 lauter ist als N_{max} der Auswertung 2 mit 32,0 sone. Werden dagegen die Pegelwerte untersucht, demonstrieren die Maximalwerte mit Z und C-Bewertung eine Verdreifachung, obwohl der A-bewertete Maximalpegel mit einer Differenz von 24 dB mehr als eine Vervielfachung andeutet.

Eine weitere Auffälligkeit betrifft ebenfalls die pegelbasierten Maximalwerte. Die drei Bewertungen geben die Maximalwerte aller Auswertungen innerhalb einer knapp 3 dB Abweichung (Sinfionietta Auswertung 1, Tabelle 6) an. Dieser Zusammenhang ist insofern auffällig, da die A-Bewertung eigentlich nicht für hohe Pegel konzipiert ist und somit nicht derart ähnliche Werte liefern sollte. Grund dafür könnte sein, dass die Schallanteile bzw. Instrumente, die die Spitzen ausgelöst haben, ihre Frequenzschwerpunkte im Bereich der niedrigen Pegelabschläge der A-Bewertung (600 Hz bis 10 kHz, Abbildung 7, S. 16) besitzen. Einzig in der deutlich leiseren Auswertung 2 (SEM) unterscheiden sich die Maximalwerte der Z und C-Bewertung nicht, während der A-bewertete Pegel eine Differenz von 7,5 dB aufweist.

Darüber hinaus fällt die geringe Differenz zwischen den Maximalwerten der Z und C-Bewertung auf. Zurückzuführen ist dies auf das Spektrum der Ereignisse und den Verlauf der Bewertungskurven. Wie Abbildung 7 (S. 16) deutlich macht, ist die C-Bewertung über weite Teile des Spektrums linear (zw. 100 Hz und 5000 Hz). Zur Erklärung wird der Terzpegelverlauf einer Auswertungssituation herangezogen. Abbildung B.1 im Anhang zeigt die Terzbänder der Auswertung 1 (SEM, Toccata). Erkennbar ist, dass der Hauptteil der Frequenzanteile im linearen Bereich der C-Bewertung liegt. Verstärken könn-

te diesen Effekt zusätzlich der Frequenzbereich des Schallanteils (Instrument), der den Maximalwert ausgelöst hat.

Wie bereits erläutert wurden die Maximalwerte der Auswertungsintervalle aus den Verläufen ausgelesen. Als Ablesestelle wurde jeweils der höchste Peak der Lautheit gewählt. Wie die erhobenen Daten aber zeigen, stimmen die Pegelspitzen nicht zwangsläufig mit den Lautheitsspitzen überein. Ohne Hörversuche lässt sich zwar kein Rückschluss ziehen, welche die tatsächlich wahrgenommen höchsten Peaks sind, doch werden Unstimmigkeiten der Verfahren deutlich.

Die maximalen Lautheiten und die $L_{C,peak}$ Werte signalisieren eine weitere Diskrepanz. Der maximalen Lautheit folgend, enthielt die Auswertung 2 (Sinfonietta) mit 110 sone die höchste Spitze aller Messungen. Auswertung 1 (SEM) schließt mit 107,5 sone an. Die Peak-Pegelwerte dagegen zeigen gegenteiliges. Demnach besitzt Auswertung 1 (SEM) mit 118 dB(C) einen höheren Peakwert als Auswertung 2 (Sinfonietta).

Die Unterschiede der Einheiten dB(A) und sone lassen sich zusätzlich durch eine Auflistung der Daten in einem, wie es Fastl und Zwicker (2007) bezeichnen, „Lautheitsthermometer“ und „Pegelthermometer“ zeigen (Abbildung 33, S. 76).

Das linke „Thermometer“ zeigt verschiedene Geräusche in sone, das rechte die gleichen Geräusche in dB(A). Die Reihenfolge in der beide „Thermometer“ die Geräusche sortieren, lässt eine Interpretation der Daten zu. Würden sowohl pegelbasierte Messwerte als auch Lautheitsmesswerte das menschliche Gehör korrekt abbilden, wäre die Reihenfolge der Geräusche bei beiden „Thermometern“ identisch. Wie aber die exemplarischen Situationen (Trompete und Rasenmäher, Violine und Bohrmaschine) zeigen, stellt der dB(A) Wert die Trompete lauter dar als den Rasenmäher. Die Lautheit bewertet sichtbar gegenteilig. Für Violine und Bohrmaschine gilt selbiges Prinzip. Um die Validität dieser Darstellung nachzuvollziehen, wurden einige dieser Geräusche nachgemessen. Die Messungen fanden mit erwähntem Messsystem in privaten Räumen oder Räumlichkeiten des Lehrstuhls für Bauphysik (TUM) statt. Als exemplarischer Ton wurden bei Trompete und Violine der Stimmtone (440 Hz) verwendet. Tabelle 9 (S. 75) zeigt die aus der Abbildung 33 abgelesenen Werte sowie die eigenen gemessenen Daten. Die Messergebnisse wurden ebenfalls mithilfe der Grenzen für stationäre oder instationäre Schalle (DIN 45631/A1; Verhältnis N5 zu N95) untersucht. Einige Schallereignisse wurden demnach als stationäre Ereignisse ausgewertet (Trompete, Bohrmaschine), andere als variante Ereignisse (Violine, N5 Lautheit). Bei den eigenen Messungen wurde jeweils versucht den dB(A) Wert des „Pegelthermometers“ (aus Fastl und Zwicker (2007)) zu treffen. Dafür wurde bei den Messungen der Abstand zum Mikrophon derart angepasst, dass die dB(A) Werte übereinstimmten.

Wie die Ergebnisse zeigen, konnten die Werte der „Thermometer“ gut reproduziert werden. Demonstrativ weist die zusätzliche Messung der Bohrmaschine den Unterschied zwischen Lautheit und pegelbasierter Messgröße nach. Die Messposition wurde derart angepasst, dass der Schalldruckpegel der Bohrmaschine deckungsgleich mit dem der Trompete war. Die Lautheitswerte sind mit 65,2 und 101,1 sone jedoch erheblich verschieden. Die eigene Messung der Violine ergibt, verglichen mit den Werten der „Thermometer“, einen größeren Unterschied zwischen dB(A) und sone Werten.

Ein Vergleich der Trompete aus Tabelle 9 und den Messungen des individuellen Unterrichts (Tabelle 8; Auswertung 1) machen ebenfalls eine gute Übereinstimmung deutlich. Mit 92,8 dB(A) (Unterricht) und 93,3 dB(A) (Nachmessung) ähneln sich die Schalldruckpegel sehr. Die Lautheiten mit 54,75 und 65,2 sone sind der Größenordnung nach ähnlich, unterscheiden sich aber dennoch. Die Gründe dafür

Tab. 9: Nachmessung der „Thermometer“-Werte aus Abbildung 33

Schallereignis	Schalldruckpegel „Thermometer“	Schalldruckpegel Messung	Lautheit „Thermometer“	Lautheit Messung
Trompete	93,0 dB(A)	93,3 dB(A)	66 sone	65,2 sone
Trompete	×	86,8 dB(A)	×	45,1 sone
Bohrmaschine	85,5 dB(A)	85,4 dB(A)	63,0 sone	63,5 sone
Bohrmaschine	×	93,2 dB(A)	×	101,1 sone
Violine	86,5 dB(A)	87,2 dB(A)	53 sone	37 sone

lassen sich nur spekulieren, aber der Messaufbau, das Repertoire, die Berechnungsmethode (variant, invariant) und die räumlichen Eigenschaften können Einflüsse haben. Bedeutend ist aber, dass die pegelbasierten Größen nahezu keinen Unterschied aufzeigen, die Lautheiten jedoch schon.

Eine ähnliche Parallele lassen auch die Messergebnisse aus den Orchestern zu. Exemplarisch werden die Ergebnisse der Auswertung 1 (SEM, Toccata) verwendet. Zeile 2 der Tabelle 9 zeigt die Messergebnisse einer einzelnen Trompete, deren pegelbasierter dB(A) Wert (86,8 dB(A)) knapp mit dem L_{AEq} (88,6 dB(A)) des Orchesters übereinstimmt. Werden die Lautheitswerte dagegen verglichen, ergibt sich ein Differenz von 28,3 sone. Wie bereits mehrfach in vorliegender Arbeit erörtert, können Schallereignisse mit verschiedenen spektralen Eigenschaften den selben Schalldruckpegel aufweisen, da das Spektrum nicht hörgerecht einbezogen wird. Eine Betrachtung der spezifischen Lautheit der Auswertung 1 (SEM) (Abb. 29, S. 69) und der spezifischen Lautheit der Trompete (Abb. B.7 im Anhang) lassen das breitere Spektrum des Orchesters erkennen. Diese Schlussfolgerung steht im Einklang mit zitierter Fachliteratur (s. Kapitel 5.2 Kritik der Lautheit und Kapitel 2.2.3 Psychoakustik Abb. 19).

Abschließend ist ein Kommentar zum Erscheinungsbild der durchschnittlichen spezifischen Lautheiten anzufügen. Im Unterschied zu den bekannten Formen des Lautheitsprofils, weisen die Profile der Messungen im Orchester nicht die horizontalen Kernerregungen auf. Dies sollte auf den Umstand der durchschnittlichen spezifischen Lautheit über ein stark variantes Schallereignis zurückzuführen sein. Das Programm kalkuliert für stationäre Ereignisse die spezifische Lautheit wie erwartet. Die korrekte Berechnung durch die verwendete Software wird als gegeben angenommen.

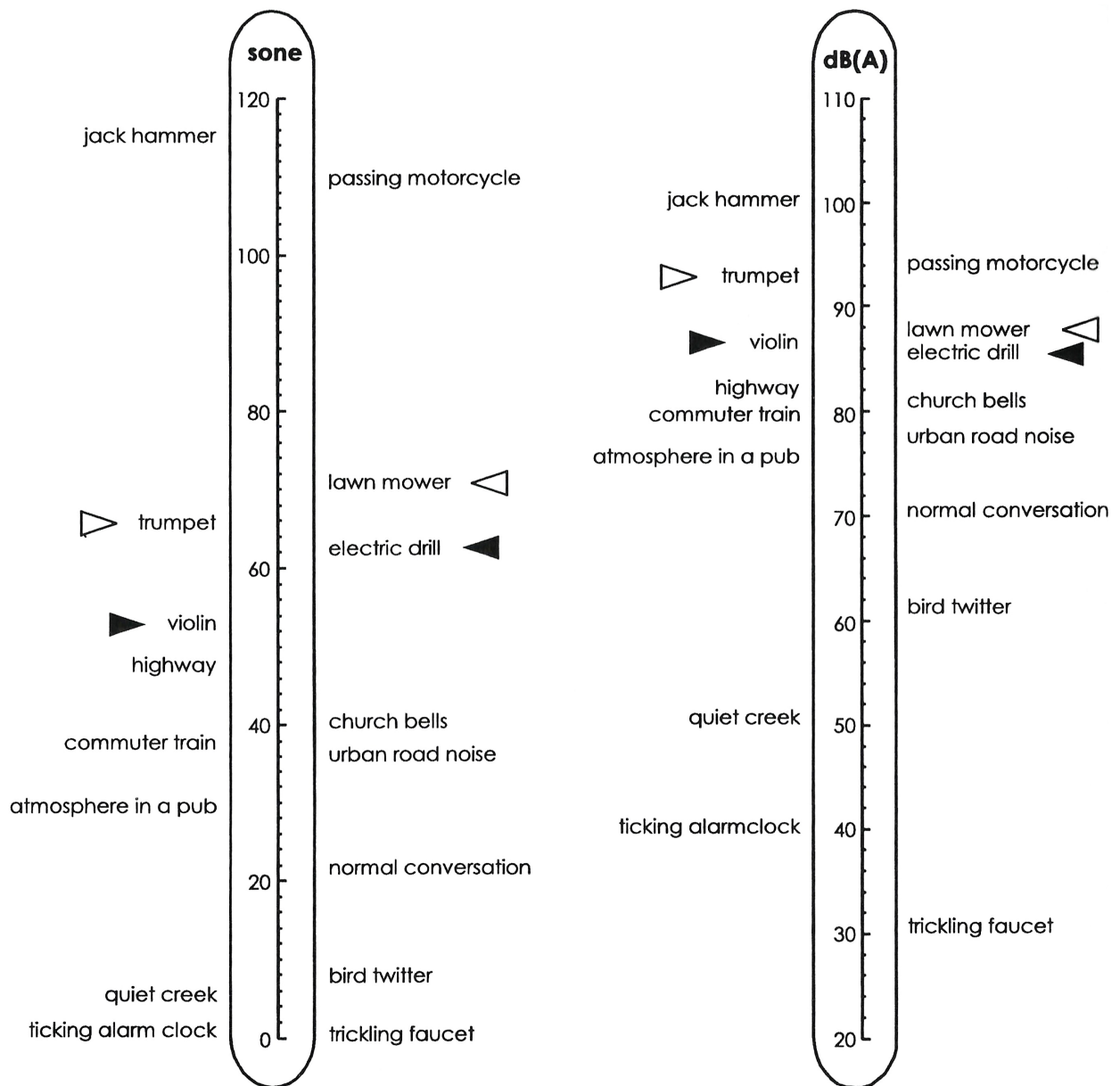


Abb. 33: Schalldruckpegel und Lautheits „Thermometer“ mit verschiedenen Schallereignissen (Fastl & Zwicker, 2007, S. 316)

7 Zusammenfassung, Limitationen und Ausblick

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, die Limitationen der vorliegenden Bachelorthesis aufgeführt und ein Ausblick für mögliche weiterführende Untersuchungen gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Die Grundlagen zeigen die Basis der Psychoakustik und die Hintergründe der verwendeten Methoden. Resümierend eignet sich das Lautheitsmodell nach E. Zwicker für die Beurteilung der Lautheit von Musik im Orchester. Die explorative Literaturrecherche macht deutlich wie vorhergegangene Studien die Schallbelastung von klassischen Musikerinnen und Musikern untersuchten. Ausgewertet anhand qualitativer Parameter wurden Review-Paper und weitere Publikationen vorgestellt. Die in Zusammenhang mit der Forschungsfrage aufgestellte These, dass bisherige Studien überwiegend in pegelbasierten Größen beurteilten, ist deutlich belegt. Alle betrachteten Veröffentlichungen, die aktuelle Mess-techniken verwendeten, maßen in pegelbasierten Größen, während keine Studie die Verwendung kritisch hinterfragte. Darüber hinaus fand keine Beurteilung der Schallbelastung im Orchester mithilfe von psychoakustischen Methoden statt. Durch Fachliteratur und Beispiele wurden die Problematiken der pegelbasierten und bewerteten Messgrößen aufgezeigt. Kritik an verwendetem Lautheitsmodell und Hinweise auf weitere Modelle zur Beurteilung von Musik, zeigen eine prinzipielle Überlegenheit der Lautheitsbetrachtung, wenngleich diese Schlussfolgerung nicht einstimmig ist.

Die Präsentation der erhobenen Daten, deren Auswertung und die Diskussion dieser, kann deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren aufzeigen. Aufgrund des Designs der vorliegenden Arbeit können zwar keine Rückschlüsse gezogen werden, ob pegelbasierte Messungen oder die Lautheit nach E. Zwicker der menschlichen Wahrnehmung besser entsprechen. Jedoch können Unterschiede belegt werden und damit wird postuliert, dass eines bzw. beide Verfahren nicht in der Lage sind die Wahrnehmung von Musik adäquat abzubilden. Dennoch scheint die Lautheitsbetrachtung nicht nur die Einflüsse der spektralen Breite, sondern auch die wohl intuitive Einschätzung, dass Instrumente leiser wahrgenommen werden als technische Geräusche gleichen Pegels, zu berücksichtigen.

Neben dem Vergleich pegelbasierter Messgrößen und der Lautheit, lassen die erhobenen Daten auch Vergleiche zwischen den Bewertungen zu. So wurde gezeigt, dass die Verwendung von Z oder C-Bewertung für Maximalpegel und hohe Pegel, zumindest für die betrachteten Beispielsituationen, redundant ist.

Eignet sich die psychoakustische Messgröße der Lautheit in sone mit dem Verfahren nach Zwicker bzw. DIN 45631/A1 besser als der Schalldruckpegel in dB für die Bewertung der Schallbelastung sowie der Lautstärke bzw. der Lautheit in Sinfonieorchestern? Nach Betrachtung der Grundlagen, systematischer Literaturrecherche, differenziertem Vergleich der Messmethoden und Diskussion der eigenen Messergebnisse, kann die Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Mit Verweis auf noch offene Fragen und eventuell besser geeigneter Methoden kann vorliegende Bachelorthesis belegen, dass eine psychoakustische Betrachtung mit dem Lautheitsmodell nach Zwicker die wahrgenommene Lautstärke von klassischer Musik adäquater darstellt.

Die vorgenommenen Messungen und erhobenen Daten wurden mit Hinblick auf größte Transparenz und Reproduzierbarkeit erstellt und dokumentiert. Durch Verwendung einer normbasierten Berechnungssoftware wurde Objektivität bei der Messung erhalten. Zwar wurde die Auswahl der Auswertungsintervalle durch den Autor getroffen, doch waren die Auswahlkriterien abhängig von dem maximalen Kalkulationsintervall der Software und den höchsten Pegelspitzen einer jeden Messung. Zusätzlich wurden alle Messungen, Auswertungsbereiche und Daten digital gesichert und sind jederzeit einsehbar. Durch sachgemäße Kalibrierung sind alle Messungen reliabel. Durch Verwendung professioneller Software und Einsicht der Prüfzeugnisse ist Validität unterstellt.

7.2 Limitationen

Die Betrachtung der Schallbelastung in Sinfonieorchestern durch Lautheitsmodelle umfasst einige Fachgebiete, weshalb Limitationen bei der Untersuchung der Forschungsfrage unumgänglich waren.

Mit Fokus auf den Messmethoden wurde die Forschungsfrage aus ingenieurtechnischer Sicht bearbeitet. Daher wurde die systematische Literaturrecherche auf die Datenbank Scopus beschränkt. Darüber hinaus konnte die Auswertung der gefundenen Review-Paper (Tabelle 4, S. 47) zeigen, dass Scopus seltener mit Hinblick auf die Messung der Schallbelastung im Orchester untersucht wurde. Auch aufgrund der ingenieurtechnischen Sicht wurde das Themengebiet nicht aus lärmpsychologischer oder musikwissenschaftlicher Sicht untersucht. Diese behandeln ebenfalls Schallbelastung oder musikalische Lautheit, berücksichtigen aber keine Messverfahren im Sinne der Expositionsbetrachtung.

Wie die Literaturrecherche zeigt, sind sehr ausführliche und breit angelegte Studien zur Exposition (L_{Eq} , L_{EX}) im Orchester veröffentlicht worden. Daher beschränkte sich vorliegende Arbeit auf die Auswertung und Betrachtung der für die Lautheitsberechnung nötigen kurzen Intervalle.

Die letzte zu nennende Limitation stellt die Beschränkung auf das N5 Perzentil als Gesamtlautheit dar. Dies ergibt sich durch Festlegung vorliegender Arbeit auf das Lautheitsmodell nach DIN 45631/A1, welche das N5 Perzentil vorschreibt und keine differenzierte Verwendung benennt.

7.3 Ausblick

Aus Sicht des Autors vorliegender Arbeit bietet ein Lautheitsmodell aus genannten Gründen Vorteile bei der Betrachtung von Musik als Schallquelle. Ein wesentlicher Nachteil jedoch, der sich bei der Verwendung des Lautheitsmodells aufzeigte, ist die begrenzte Auswertungsdauer. Unbestritten ist, dass es gemittelte Beurteilungsgrößen zur Erfassung der Schallbelastungen über einen größeren Zeitraum benötigt. Ein über wenige Minuten andauernder Berechnungszeitraum kann nicht reproduzierbar und aussagekräftig den abwechslungsreichen Alltag eines Musizierenden darstellen. Selbst ein Tagesexpositionspegel über den gesamten Arbeitstag hinweg kann, ungeachtet aller Nachteile der energetischen Mittelung, nur begrenzt Einblick in die von Tag zu Tag verschiedene Belastungssituationen geben. Eine Mittelung über eine Vielzahl von Tagesexpositionswerten oder gar die Betrachtung der Wochenexpositionspegel scheint aussagekräftiger.

Ferner ist klar, dass sich die gesetzlichen Vorlagen der Lärmverordnung nicht dahingehend verändern lassen und dies auch nicht Ziel der Untersuchungen sein sollte. Denn die festgelegten Grenzwerte sind zweifelsohne berechtigt. „Folglich kann es“, wie Klaus Genuit ausführt, „auch nicht darum gehen, die Fragestellung auf die Entscheidung Lautheitsmessung oder A-bewerteter Schalldruckpegel zuzuspitzen“ (Genuit, 1998, S. 156). Vielmehr eine unterstützende Einschätzung könnte durch Lautheitsbetrachtungen erzielt werden. An erster Stelle stände das Auffinden eines für Musik am besten geeigneten Modells. Fortführende Literaturrecherchen mit diesem Fokus würden weitere Evaluationen und gegebenenfalls andere Modelle liefern. Aufgrund der elektrotechnischen Fachbereiche bei der Erstellung derartiger Modelle, könnten passende Datenbanken wie IEEE, ZDE oder Web of Science einbezogen werden. Neben Lautheitsmodellen könnten auch „einfachere“ Verfahren zum Beispiel aus der Film-, Radio- und Fernsehbranche (u. a. EBU-R128, ITU-R BS.1770, $L_{Eq(RLB)}$) für Musik optimierte Bewertungsverfahren liefern. Schließlich bestünde die Möglichkeit mithilfe eines Lautheitsmodells Pegelab- oder zuschläge für sinfonische Musik zu entwerfen, um eine Bewertung in Kombination mit den gesetzlichen Vorgaben zu ermöglichen.

Wie in der Einleitung bereits erläutert, benötigt die Betrachtung von Musik als „Lärmquelle“ viele Faktoren. Neben der Komplexität der menschlichen Schallwahrnehmung und dem psychologischen sowie individuellen Schritt von Schall zu Lärm, spielt die Musik als Quelle der Belastung eine entscheidende Rolle. Vorliegende Bachelorthesis zeigt, dass es Gründe gibt, die Situation symphonischer Musikerinnen und Musiker adäquater zu beurteilen und Maßnahmen zum Erhalt deren Gesundheit voranzubringen. Eine geeignete Messmethode könnte einen Schritt in diese Richtung darstellen.

Literaturverzeichnis

- Arbeitsring Lärm der DEGA. (n. d.). Lärmlexikon (Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hrsg.). Verfügbar 17. April 2020 unter <https://www.ald-laerm.de/publikationen/laermlexikon/1/>
- Axelsson, A. & Lindgren, F. (1981). Hearing in classical musicians. *Acta Oto-Laryngologica*, 92(Suppl. 377), 3–74. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0019752691&partnerID=40&md5=d4ed7981416691ecdf2cc3f4bcf664db>
- Behar, A., Chasin, M., Mosher, S., Abdoli-Eramaki, M. & Russo, F. (2018). Noise exposure and hearing loss in classical orchestra musicians: A five-year follow-up. *Noise and Health*, 20(93), 42–46. https://doi.org/10.4103/nah.NAH_39_17
- Behar, A., Russo, F., Chasin, M. & Mosher, S. (2012). Hearing loss in classical orchestra musicians. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, 40(3), 108–109. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867136226&partnerID=40&md5=058f46b2385d2dac129de2273a91a015>
- Behar, A., Wong, W. & Kunov, H. (2006). Risk of hearing loss in orchestra musicians: Review of the literature. *Medical Problems of Performing Artists*, 21(4), 164–168. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33845461472&partnerID=40&md5=6a16994920d8b01a73ef4a9037f0dca0>
- Bernstein, H. (2019). *Elektroakustik: Mikrofone, Klangstufen, Verstärker, Filterschaltungen und Lautsprecher* (2., aktualisierte Auflage). Springer Fachmedien WiesbadenSpringer Vieweg.
- Berufsgenossenschaft Holz und Metall. (2017). Lärm am Arbeitsplatz: DGUV Information.
- Bo, M., Clerico, M. & Pognant, F. (2016). Parametric method for the noise risk assessment of professional orchestral musicians. *Noise and Health*, 18(85), 319–328. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.195797>
- Breazeale, M. A. & McPherson, M. (2014). Physical Acoustics. In T. D. Rossing (Hrsg.), *Springer Handbook of Acoustics* (S. 215–263). Springer.
- Brockt, G. (2004). Schallschutz bei Orchestermusikern - 87 dB(A) Expositionspegel als Grenzwert (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Hrsg.).
- Brockt, G. (2010). Control of noise exposure for employees in the music sector (Federal Institute for Occupational Safety and Health, Hrsg.).
- Brusis, T. (2011). Akuter Hörverlust beim Orchestermusiker : Akutes Lärmtrauma oder Hörsturz? *HNO*, 59(7), 664–673. <https://doi.org/10.1007/s00106-010-2173-z>

- Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2017). Arbeitsschutz: Lärm - Technische Regeln (TRLV Lärm).
- Bundesregierung. (2007). Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen: LärmVibrationsArbSchV.
- Cowan, J. (2014). Building Acoustics. In T. D. Rossing (Hrsg.), *Springer Handbook of Acoustics* (S. 403–442). Springer.
- Di Stadio, A. (2017). Which factors to induce hearing loss in professional musicians? Extensive literature review and histopathology findings can answer it. *Hearing, Balance and Communication*, 15(2), 63–71. <https://doi.org/10.1080/21695717.2017.1311505>
- Di Stadio, A., Dipietro, L., Ricci, G., Della Volpe, A., Minni, A., Greco, A., de Vincentiis, M. & Ralli, M. (2018). Hearing loss, tinnitus, hyperacusis, and diplacusis in professional musicians: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102120>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1991). Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum: Verfahren nach E. Zwicker (DIN 45631:1991-03).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006). Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2006-04).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009a). Akustik - Begriffe (DIN 1320:2009-12).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009b). Akustik - Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) (ISO 9612:2009-09).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche; mit CD-ROM (DIN 45631/A1:2010-03).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014). Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2014-07).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2017). Akustik - Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten - Teil 7: Bezugshörschwelle unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen (ISO 389-7:2017-01).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2020). Akustik - Verfahren zur Berechnung der Lautheit - Teil 1: Verfahren nach E. Zwicker (E DIN ISO 532-1:2020-01): Entwurf.
- Dudarewicz, A., Pawlaczyk-Łuszczczyńska, M., Zamojska-Daniszewska, M. & Zaborowski, K. (2015). Exposure to excessive sounds during orchestra rehearsals and temporary hearing changes in

- hearing among musicians. *Medycyna pracy*, 66(4), 479–486. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00163>
- Eaton, S. & Gillis, H. (2002). Review of Orchestra Musicians' hearing loss risks. *Canadian Acoustics*, 30(2), 5–12.
- Emmerich, E., Rudel, L. & Richter, F. (2008). Is the audiologic status of professional musicians a reflection of the noise exposure in classical orchestral music? *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 265(7), 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00405-007-0538-z>
- Fastl, H. (1998). Psychoakustische Methoden. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.), *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik* (S. 125–148). Springer.
- Fastl, H. & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (Bd. 22). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4>
- Feldmann, J. (2010). Schallpegelmesstechnik und ihre Anwendung. In M. Möser (Hrsg.), *Messtechnik der Akustik* (S. 55–113). Springer.
- Feldmann, J. (2018). Schallpegelmesstechnik und ihre Anwendung. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- Ferguson, S., Schubert, E. & Dean, R. T. (2011). Continuous subjective loudness responses to reversals and inversions of a sound recording of an orchestral excerpt. *Musicae Scientiae*, 15(3), 387–401. <https://doi.org/10.1177/1029864911410122>
- Fuchs, H. V. (2017). *Raum-Akustik und Lärm-Minderung: Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und -dämpfern* (4. Auflage). Springer Berlin Heidelberg.
- Genuit, K. (1998). Gehörgerechte Schallmeßtechnik. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.), *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik* (S. 149–165). Springer.
- Genuit, K. & Fiebig, A. (2014). Kritische Betrachtung zum Thema „Lärm“-Messung: Erweiterung von Lärmprognosen durch die Psychoakustik. *Lärmbekämpfung*, (9), 12–19.
- Gottlob, D. & Vogelsang, B. (2004). Beurteilung von Schallimmissionen - Vorschriften - Normen - Richtlinien. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 103–148). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hering, E. & Schönfelder, G. (Hrsg.). (2018). *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete* (2nd ed.). Springer Fachmedien Wiesbaden Springer Vieweg. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5231087>
- Holstein, J. (2009). *Hörprobleme bei Musikern* (Dissertation). Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg i. Br., Institut für Musikermedizin.

- Huttunen, K. H., Sivonen, V. P. & Pöykkö, V. T. (2011). Symphony orchestra musicians' use of hearing protection and attenuation of custom-made hearing protectors as measured with two different real-ear attenuation at threshold methods. *Noise and Health*, 13(51), 176–188. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.77210>
- Jansen, E., Helleman, H. W., Dreschler, W. A. & Laat, J. (2009). Noise induced hearing loss and other hearing complaints among musicians of symphony orchestras. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 82(2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s00420-008-0317-1>
- Jansson, E. & Karlsson, K. (1983). Sound levels recorded within the symphony orchestra and risk criteria for hearing loss. *Scandinavian audiology*, 12(3), 215–221. <https://doi.org/10.3109/01050398309076249>
- Kähäri, K. R., Axelsson, A., Hellström, P. A. & Zachau, G. (2001). Hearing development in classical orchestral musicians. A follow-up study. *Scandinavian audiology*, 30(3), 141–149. <https://doi.org/10.1080/010503901316914511>
- Kalivoda, M. T. (1994). Kennwerte für eine (wirkungsäquivalente) Dauerlautheit. *DAGA*, 1097–1099.
- Kalivoda, M. T. (1998). Akustische Grundlagen. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.), *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik* (S. 102–124). Springer.
- Kalivoda, M. T. & Steiner, J. W. (Hrsg.). (1998). *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6490-7>
- Kuwano, S., Hatoh, T., Kato, T. & Namba, S. (2011). Application of loudness level to temporally varying sounds: In the case of sounds of musical performance. *Acoustical Science and Technology*, 32(1), 43–46. <https://doi.org/10.1250/ast.32.43>
- Laitinen, H. (2005). Factors affecting the use of hearing protectors among classical music players. *Noise and Health*, 7(26), 21–29. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.31643>
- Laitinen, H. M., Toppila, E. M., Olkinuora, P. S. & Kuisma, K. (2003). Sound exposure among the Finnish National Opera personnel. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18(3), 177–182. <https://doi.org/10.1080/10473220301356>
- Langguth, B., Vielsmeier, V. & Kleinjung, T. (2015). Diagnostik und Therapie des chronischen Tinnitus. *Bayerisches Ärzteblatt*, (11), 560–566.
- Lebo, C. P. & Oliphant, K. P. (1968). Music as a source of acoustic trauma. *Laryngoscope*, 78(7), 1211–1218. <https://doi.org/10.1288/00005537-196807000-00009>
- Lee, J., Behar, A., Kunov, H. & Wong, W. (2003). Noise exposure of opera orchestra players. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, 31(3), 78–79. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0142167916&partnerID=40&md5=43f5f6b6de0bd5c01c7efa5c869197cc>

- Lee, J., Behar, A., Kunov, H. & Wong, W. (2005). Musicians' noise exposure in orchestra pit. *Applied Acoustics*, 66(8), 919–931. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.11.009>
- Lercher, P. (1998). Medizinisch-hygienische Grundlagen der Lärmbeurteilung. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.), *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik* (S. 42–101). Springer.
- Lindsay, P. H. & Norman, D. A. (1977). *Human information processing: An introduction to psychology* (2d ed.). Academic Press. <http://catalog.hathitrust.org/api/volumes/oclc/2888123.html>
- MacDonald, E. N., Behar, A., Wong, W. & Kunov, H. (2008). Noise exposure of opera musicians. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, 36(4), 11–16. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-60349120560&partnerID=40&md5=679933dcc745cb9ad4fefad6e28bc0c5>
- Maschke, C. & Fastl, H. (2018). Schallwirkungen beim Menschen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- Maschke, C. & Jakob, A. (2018). Psychoakustische Messtechnik. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- McBride, D., Gill, F., Proops, D., Harrington, M., Gardiner, K. & Attwell, C. (1992). Noise And The Classical Musician. *British Medical Journal*, 305(6868), 1561–1563. <https://www.jstor.org/stable/29718014>
- Miśkiewicz, A. & Rakowski, A. (1994). Loudness level versus sound–pressure level: A comparison of musical instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(6), 3375–3379. <https://doi.org/10.1121/1.411448>
- Moore, B. C. J. (2013). *An introduction to the psychology of hearing* (6. ed.). Brill.
- Möser, M. (2015). *Technische Akustik* (10. Auflage). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>
- Müller, G. & Möser, M. (2004). Grundlagen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 1–24). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Müller, G. & Möser, M. (Hrsg.). (2018). *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- O'Brien, I., Driscoll, T. & Ackermann, B. (2013). Sound exposure of professional orchestral musicians during solitary practice. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4), 2748–2754. <https://doi.org/10.1121/1.4820900>
- O'Brien, I., Wilson, W. & Bradley, A. (2008). Nature of orchestral noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2), 926–939. <https://doi.org/10.1121/1.2940589>

- Ostri, B., Eller, N., Dahlin, E. & Skylv, G. (1989). Hearing impairment in orchestral musicians. *Scandinavian audiology*, 18(4), 243–249. <https://doi.org/10.3109/01050398909042202>
- Owusu, M. (2016). *Wissenschaftlicher Erkenntnisstand zum Risiko einer Lärmschwerhörigkeit bei Orchestermusikern* (Bachelorarbeit). Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Hamburg.
- Palin, S. L. (1994). Does classical music damage the hearing of musicians? a review of the literature. *Occupational Medicine*, 44(3), 130–136. <https://doi.org/10.1093/occmed/44.3.130>
- Pawlaczyk-Łuszczczyńska, M., Dudarewicz, A., Zamojska, M. & Śliwiska-Kowalska, M. (2011). Evaluation of sound exposure and risk of hearing impairment in orchestral musicians. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 17(3), 255–269. <https://doi.org/10.1080/10803548.2011.11076892>
- Pawlaczyk-Łuszczczyńska, M., Zamojska, M., Dudarewicz, A. & Zaborowski, K. (2013). Noise-induced hearing loss in professional orchestral musicians. *Archives of Acoustics*, 38(2), 223–234. <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0027>
- Peters, C., Thom, J., McIntyre, E., Winters, M., Teschke, K. & Davies, H. (2005). Noise and Hearing Loss in Musicians. *Safety and Health in Arts Production and Entertainment (SHAPE)*.
- Poissant, S. F., Freyman, R. L., MacDonald, A. J. & Nunes, H. A. (2012). Characteristics of noise exposure during solitary trumpet playing: Immediate impact on distortion-product otoacoustic emissions and long-term implications for hearing. *Ear and Hearing*, 33(4), 543–553. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e31824c0935>
- Presbury, J. & Williams, W. (2000). Occupational noise exposure management in an orchestral setting. *Journal of Occupational Health and Safety - Australia and New Zealand*, 16(4), 337–342. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0033786206&partnerID=40&md5=99589e584be70417f42d993d3f82cb66>
- Qian, C. L., Behar, A. & Wong, W. (2011). Noise exposure of musicians of a ballet orchestra. *Noise and Health*, 13(50), 59–63. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.74002>
- Rennies, J., Verhey, J. L., Appell, J. E. & Kollmeier, B. (2013). Loudness of complex time-varying sounds ? A challenge for current loudness models. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19, 1–9. <https://doi.org/10.1121/1.4799514>
- Rennies, J., Verhey, J. L. & Fastl, H. (2010). Comparison of loudness models for time-varying sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 383–396. <https://doi.org/10.3813/AAA.918287>
- Reuter, K. & Hammershøi, D. (2007). Distortion product otoacoustic emission of symphony orchestra musicians before and after rehearsal. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1), 327–336. <https://doi.org/10.1121/1.2395915>

- Rodrigues, M. A., Freitas, M. A., Neves, M. P. & Silva, M. V. (2014). Evaluation of the noise exposure of symphonic orchestra musicians. *Noise and Health*, 16(68), 40–46. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.127854>
- Roederer, J. G. (2000). *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik* (3, überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57138-1>
- Röösl, M. (2013). Auswirkung von Lärm auf die Gesundheit. *Therapeutische Umschau. Revue therapeutique*, 70(12), 720–724. <https://doi.org/10.1024/0040-5930/a000470>
- Royster, J. D., Royster, L. H. & Killion, M. C. (1991). Sound exposures and hearing thresholds of symphony orchestra musicians. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89(6), 2793–2803. <https://doi.org/10.1121/1.400719>
- Ruschkowski, A. v. (2013). *Lautheit von Musik: Eine empirische Untersuchung zum Einfluss von Organismusvariablen auf die Lautstärkenwahrnehmung von Musik* (Diss.). Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg. Hamburg. <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2014/6576>
- Russo, F. A., Behar, A., Chasin, M. & Mosher, S. (2013). Noise exposure and hearing loss in classical orchestra musicians. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43(6), 474–478. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.11.001>
- Sabesky, I. J. & Korczynski, R. E. (1995). Noise exposure of symphony orchestra musicians. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 10(2), 131–135. <https://doi.org/10.1080/1047322X.1995.10389295>
- Schick, A. (1990). *Schallbewertung: Grundlagen der Lärmforschung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50267-5>
- Schmidt, F., Kollmeier, B. & Uppenkamp, S. (2015). Lautheitsbeurteilung von Musik: Methoden und Modellvergleiche. *DAGA*, 317–320.
- Schmidt, F., Kollmeier, B. & Uppenkamp, S. (2016). Stärken und Schwächen von Pegelmaßen und Lautheitsmodellen bei der Bewertung von Musik. *DAGA*, 285–286.
- Schmidt, J. H., Pedersen, E. R., Juhl, P. M., Christensen-Dalsgaard, J., Andersen, T. D., Poulsen, T. & Bælum, J. (2011). Sound exposure of symphony orchestra musicians. *The Annals of occupational hygiene*, 55(8), 893–905. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer055>
- Skovenborg, E. & Nielsen, S. H. (2004). Evaluation of Different Loudness Models with Music and Speech Material (Audio Engineering Society, Hrsg.). In Audio Engineering Society (Hrsg.), *Convention Paper*.
- Smith, K., Grimshaw, J. & Neilsen, T. (2016). Characterization of ensemble rehearsal rooms and musician experiences at Brigham Young University. <https://doi.org/10.1121/2.0000292>

- Soulodre, G. A. (2004). Evaluation of objective measures of loudness. *Canadian Acoustics*, 32(3), 152–153.
- Terhardt, E. (1998). *Akustische Kommunikation: Grundlagen mit Hörbeispielen*. Springer Berlin Heidelberg.
- Toppila, E., Koskinen, H. & Pyykkö, I. (2011). Hearing loss among classical-orchestra musicians. *Noise and Health*, 13(50), 45–50. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.74001>
- Vorländer, M. (2004). Akustische Messtechnik. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 25–57). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wenmaekers, R., Nicolai, B., Hornikx, M. & Kohlrausch, A. (2017). Why orchestral musicians are bound to wear earplugs: About the ineffectiveness of physical measures to reduce sound exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 142(5), 3154–3164. <https://doi.org/10.1121/1.5012689>
- Werner, E. (2018). Wandler für Luftschallmessungen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- Westmore, G. A. & Eversden, I. D. (1981). Noise-Induced Hearing Loss and Orchestral Musicians. *Archives of Otolaryngology*, 107(12), 761–764. <https://doi.org/10.1001/archotol.1981.00790480037010>
- WHO. (1999). Guidelines for community noise (B. Berglund, T. Lindvall & D. H. Schwela, Hrsg.).
- Zenner, H. P. (2011). Die Kommunikation des Menschen: Hören und Sprechen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Zenner, H. P., Struwe, V., Schuschke, G., Spreng, M., Stange, G., Plath, P., Babisch, W., Rebentisch, E., Plinkert, P., Bachmann, K. D., Ising, H. & Lehnert, G. (1999). Gehörschäden durch Freizeitlärm. *HNO*, 47(4), 236–248. <https://doi.org/10.1007/s001060050390>
- Zhang, Y. (2018). Analysis of Loudness Matching of National Orchestra: A Case Study of Four Representative Conventional Instruments (Chen X & Zhao Q, Hrsg.). In Chen X & Zhao Q (Hrsg.). <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483247>
- Zhao, F., Manchaiah, V. K. C., French, D. & Price, S. M. (2010). Music exposure and hearing disorders: An overview. *International Journal of Audiology*, 49(1), 54–64. <https://doi.org/10.3109/14992020903202520>
- Ziemer, T. (2020). *Psychoacoustic music sound field synthesis: Creating spaciousness for composition, performance, acoustics and perception*. Springer International Publishing.
- Zollner, M. (1991). Vergleichende Lautheits-Messungen an 114 Alltagsgeräuschen (J. Blauert & E. Paulus, Hrsg.). In J. Blauert & E. Paulus (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik*.

- Zollner, M. (1998). Echtzeit-Lautheitsanalyse. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.), *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik* (S. 166–195). Springer.
- Zorilă, T.-C., Stylianou, Y., Flanagan, S. & Moore, B. C. J. (2016). Effectiveness of a loudness model for time-varying sounds in equating the loudness of sentences subjected to different forms of signal processing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), 402–408. <https://doi.org/10.1121/1.4955005>
- Žuškin, E., Schachter, E. N., Kolčić, I., Polašek, O., Mustajbegović, J. & Arumugam, U. (2005). Health problems in musicians - A review. *Acta Dermatovenerologica Croatica*, 13(4), 247–251. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-29944432977&partnerID=40&md5=729d22ee870f9188ac4768d0ab19f40f>
- Zwicker, E. (1982). *Psychoakustik*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-68510-1>
- Zwicker, E. & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models* (2., updated ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Anhang

A Weitere Abbildungen

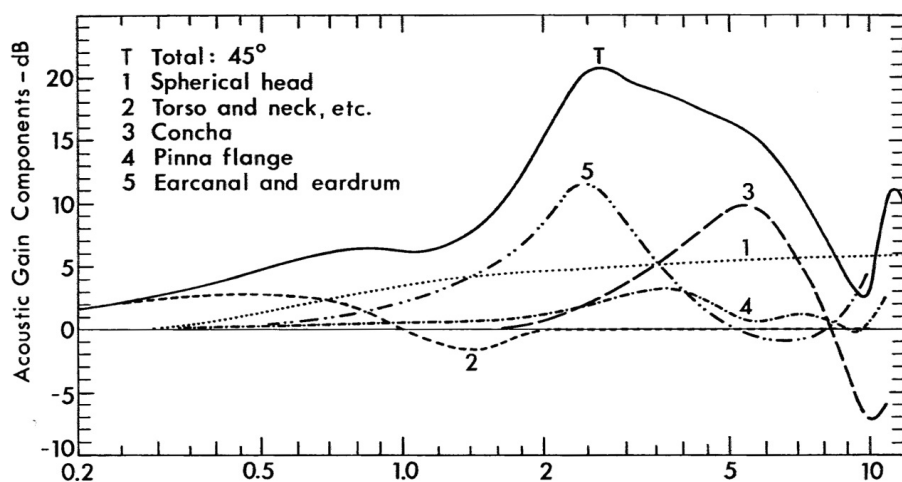


Abb. A.1: Beitrag von Kopf (1), Torsos und Hals (2), mittlerem Teil der Ohrmuschel (3), Ohrmuschelumrandung (4) und äußerem Gehörgang (5) zum Schalldruckgewinn durch das Außenohr (T). Schalleinfallrichtung 45° von vorne (Ruschkowski, 2013, S. 20)

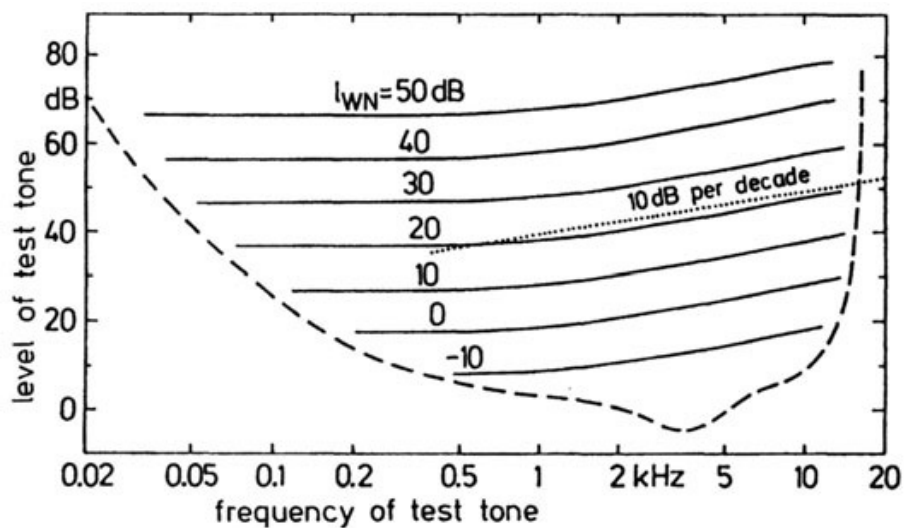


Abb. A.2: Mithörschwelle reiner Testtöne verdeckt durch weißes Rauschen (Zwicker & Fastl, 1999, S. 62)

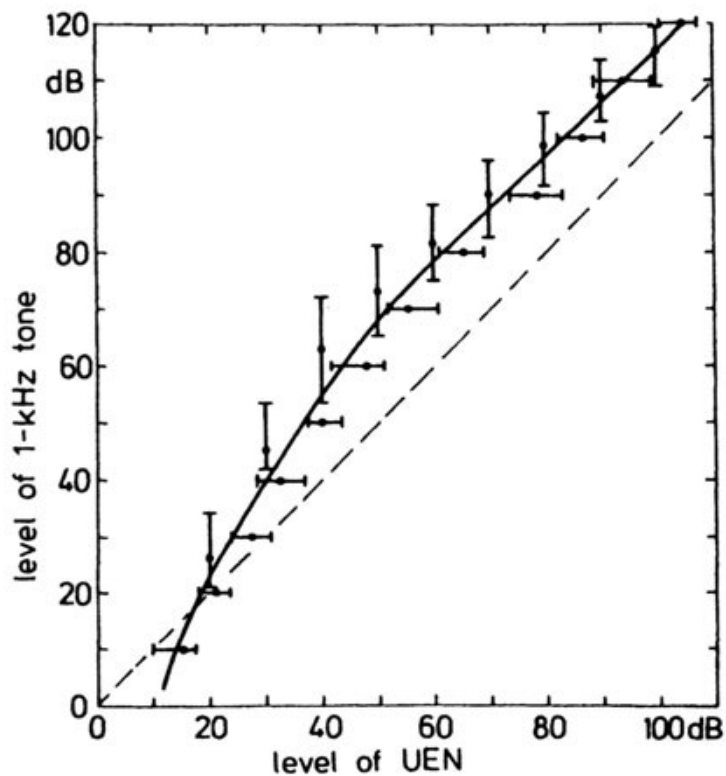


Abb. A.3: Pegel, die nötig sind einen 1 kHz Ton und Breitbandrauschen als gleich laut wahrzunehmen. Senkrechte und horizontale Boxplots stellen die Ergebnisse zweier verschiedener Versuche dar. Versuche mit Veränderung des Referenztons bei konstantem Breitbandrauschen (senkrecht) und mit Veränderung des Breitbandrauschens mit konstantem Referenzton (horizontal) (Zwicker & Fastl, 1999, S. 208)

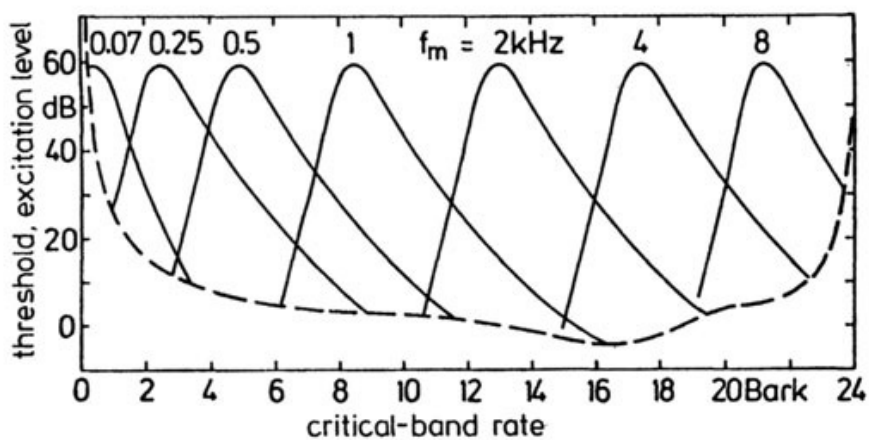


Abb. A.4: Erregungsmuster mehrerer Schmalbandrauschsignale mit einem Pegel von 60 dB (Zwicker & Fastl, 1999, S. 168)

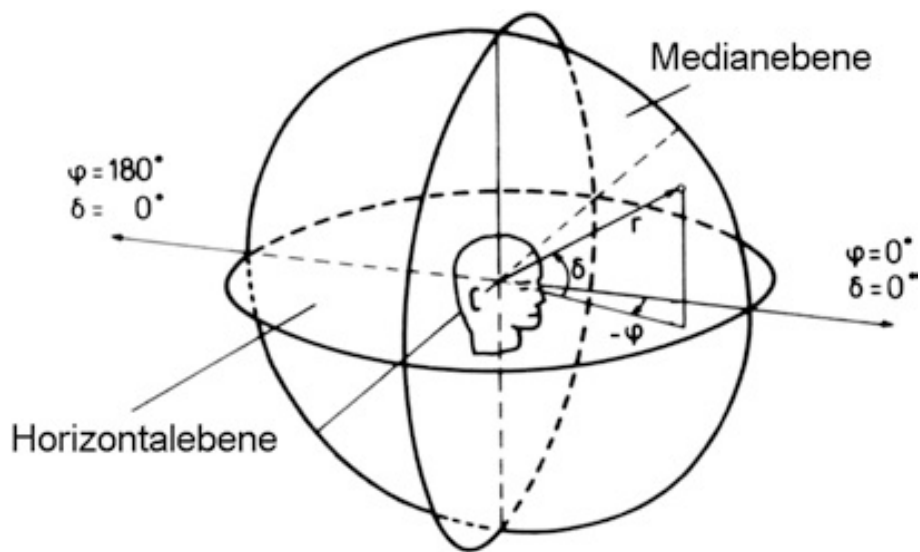


Abb. A.5: Darstellung des Koordinatensystems im Hörbereich mit den Winkeln Azimut φ und Elevation δ , sowie der Distanz r (Maschke & Jakob, 2018)

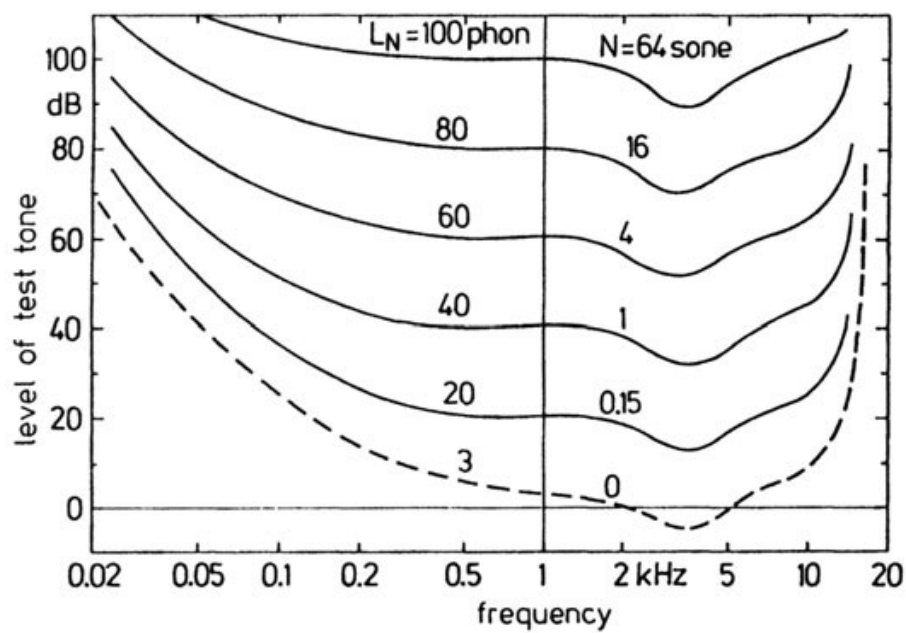
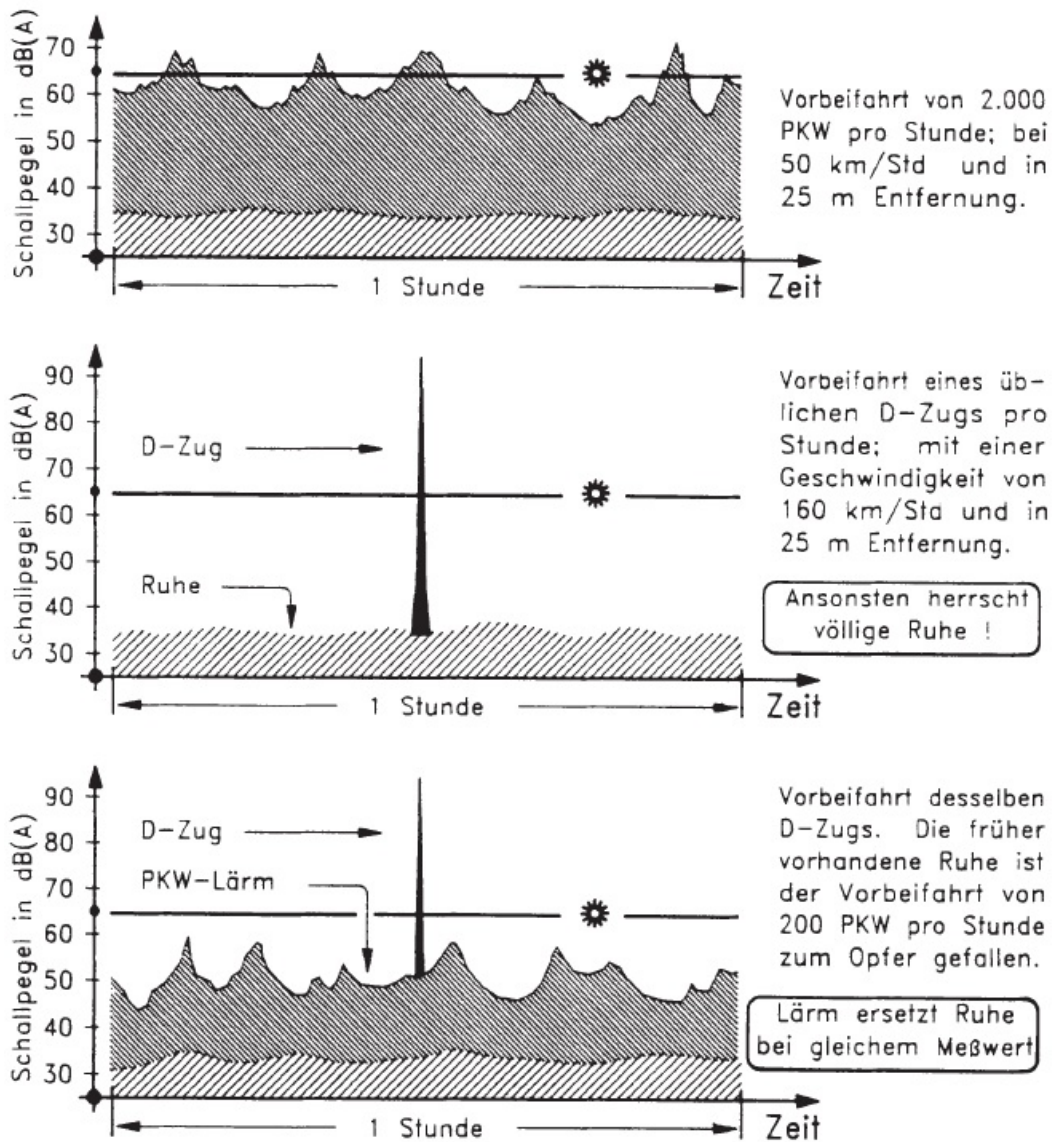


Abb. A.6: Kurven gleicher Lautstärke (Zwicker & Fastl, 1999, S. 204)

Was der Mittelungspegel als völlig identisch deklariert



Der Mittelungspegel (☼) ist in allen drei Beispielen identisch (= 65 dB(A)). Unten trägt der PKW-Lärm weniger als 0,5 dB(A) zum Meßwert des D-Zugs bei, wodurch er der Abrundung auf volle Dezibel zum Opfer fällt.

Abb. A.7: Problematik des energieäquivalenten Dauerschallpegels und der Effekt, dass Ruhe durch Lärm ersetzt werden kann (Lercher, 1998, S. 69)



Abb. A.8: Verwendetes Messmikrofon der Firma Dr-Jordan-Design

B Messergebnisse

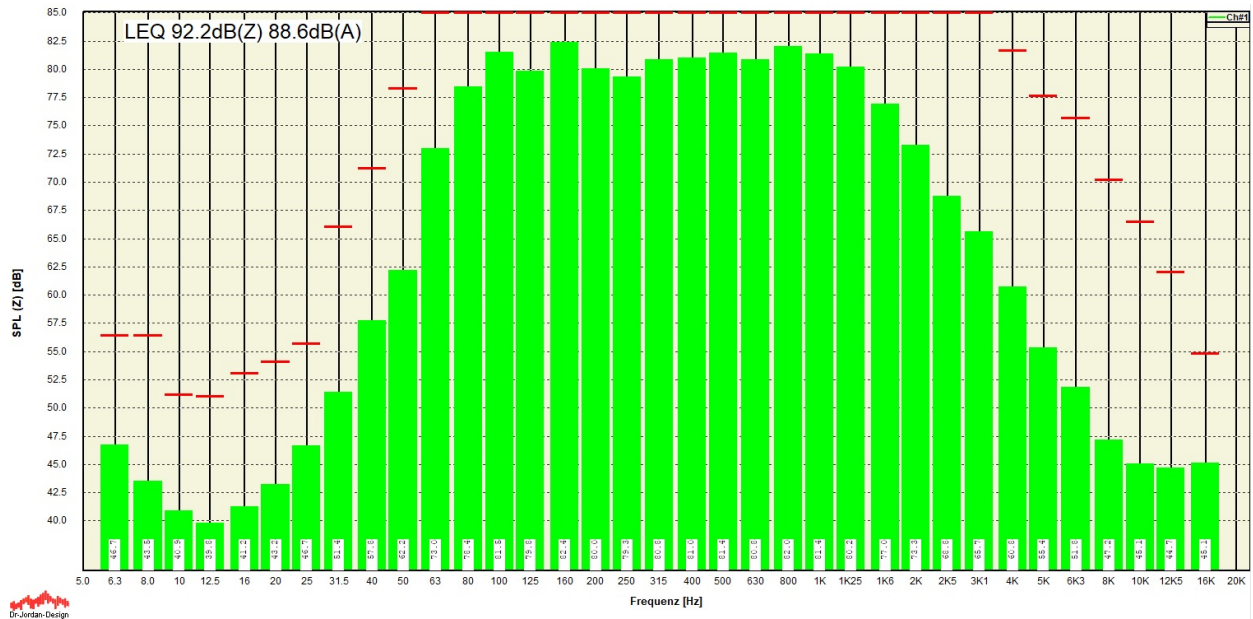


Abb. B.1: Schalldruckpegelwert Terzbänder der Auswertung 1 - Symphonisches Ensemble München (4,43 min)

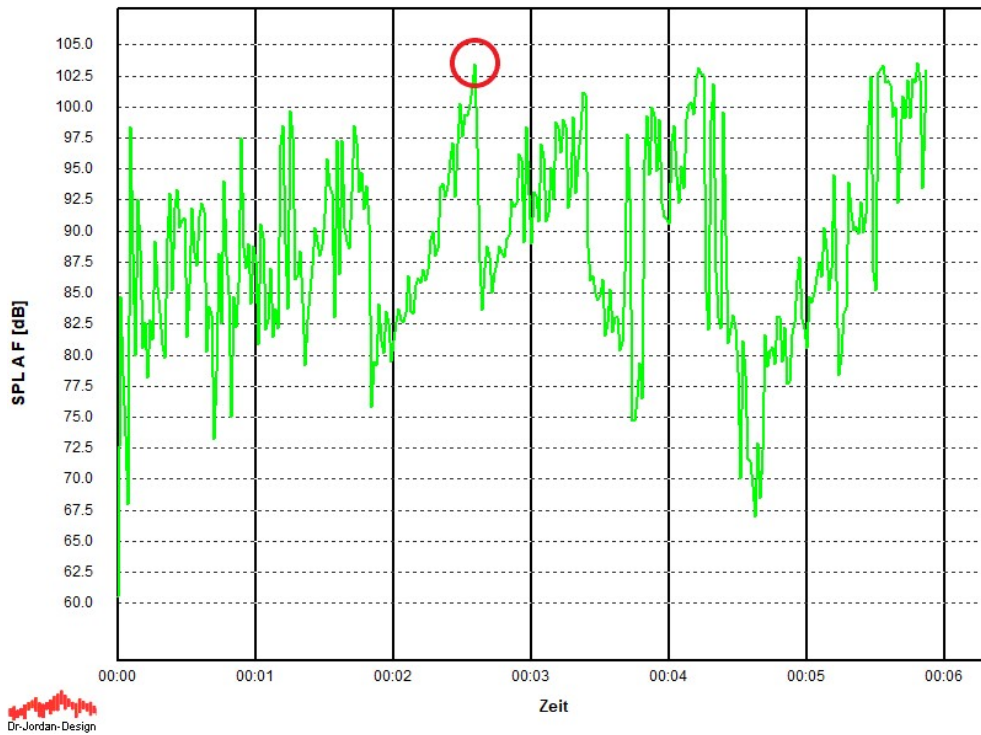


Abb. B.2: Z-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware

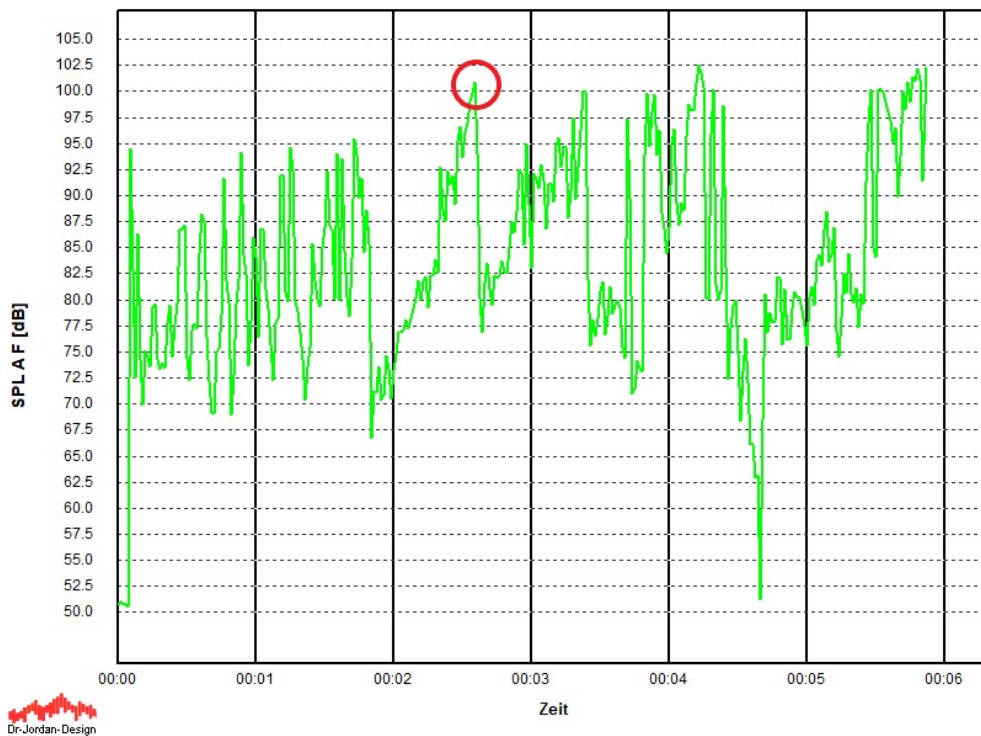


Abb. B.3: A-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware

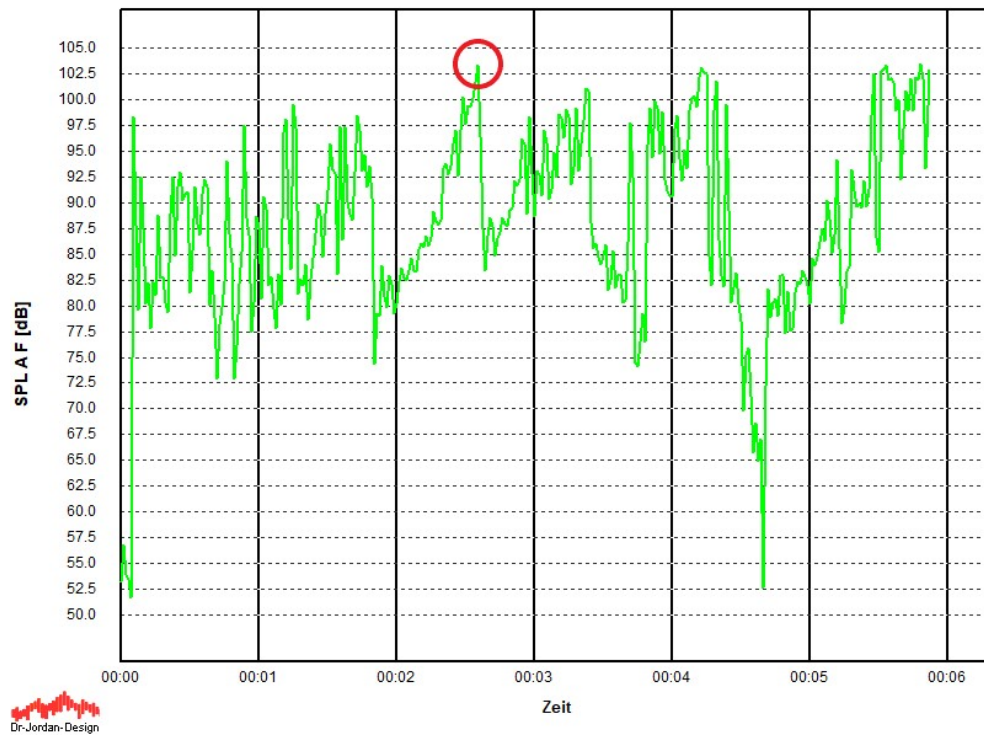


Abb. B.4: C-bewerteter Pegelverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min); Fehlerhafte Beschriftung der Ordinate durch die Messsoftware

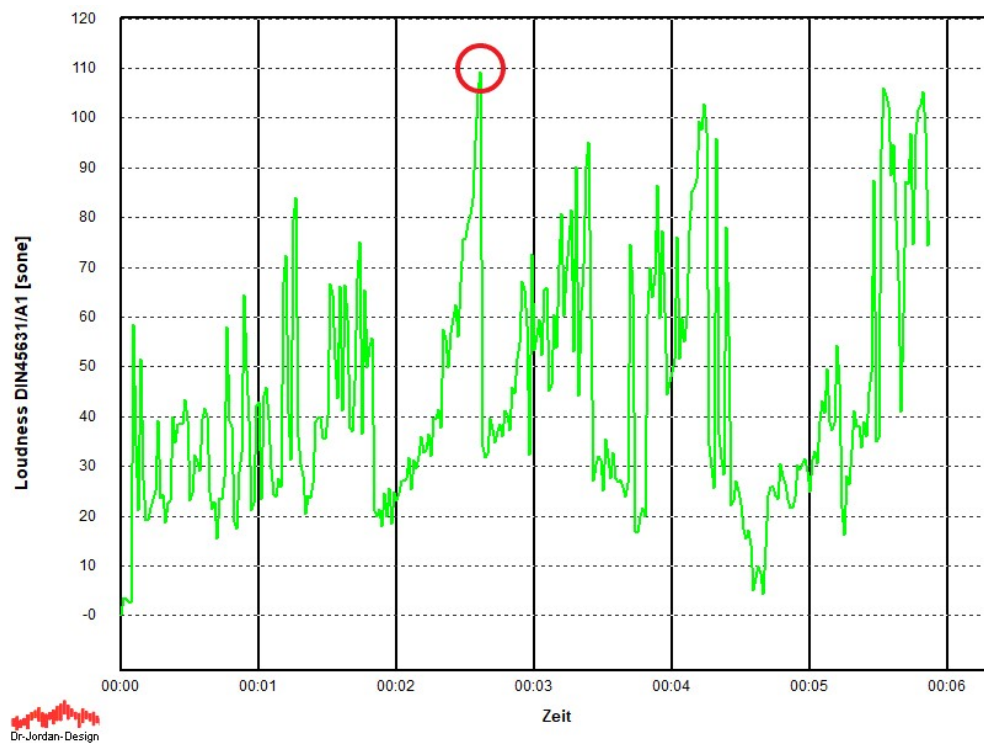


Abb. B.5: Lautheitsverlauf der Auswertung 2 - Sinfonietta (5,86 min)

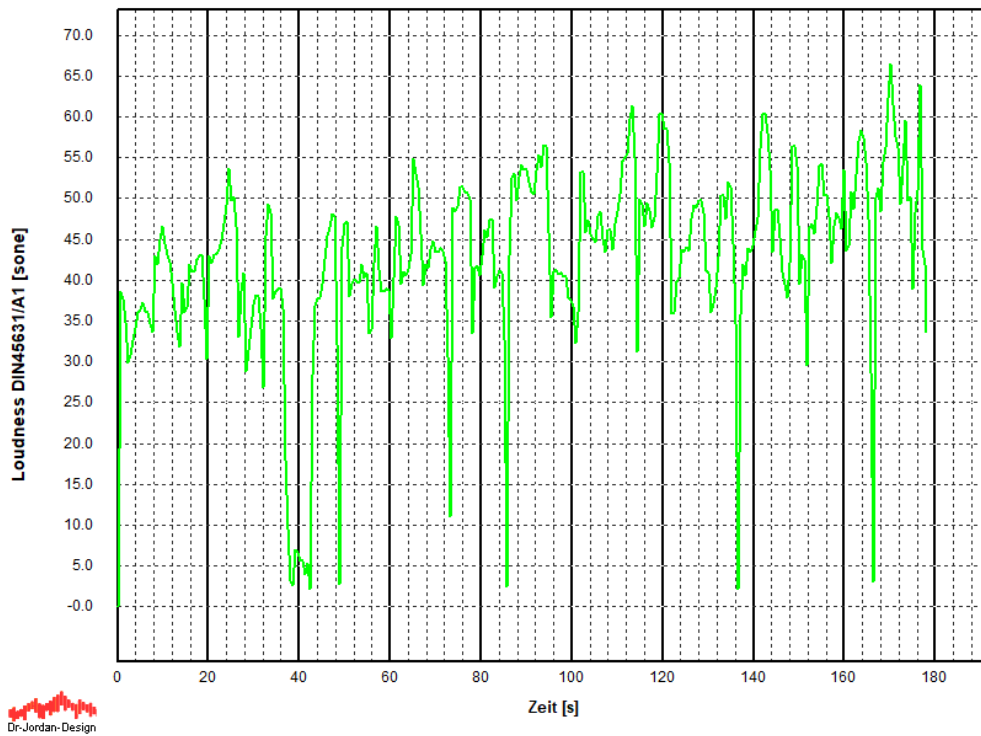


Abb. B.6: Lautheitsverlauf der Auswertung 1 - individueller Probenunterricht (3 min)

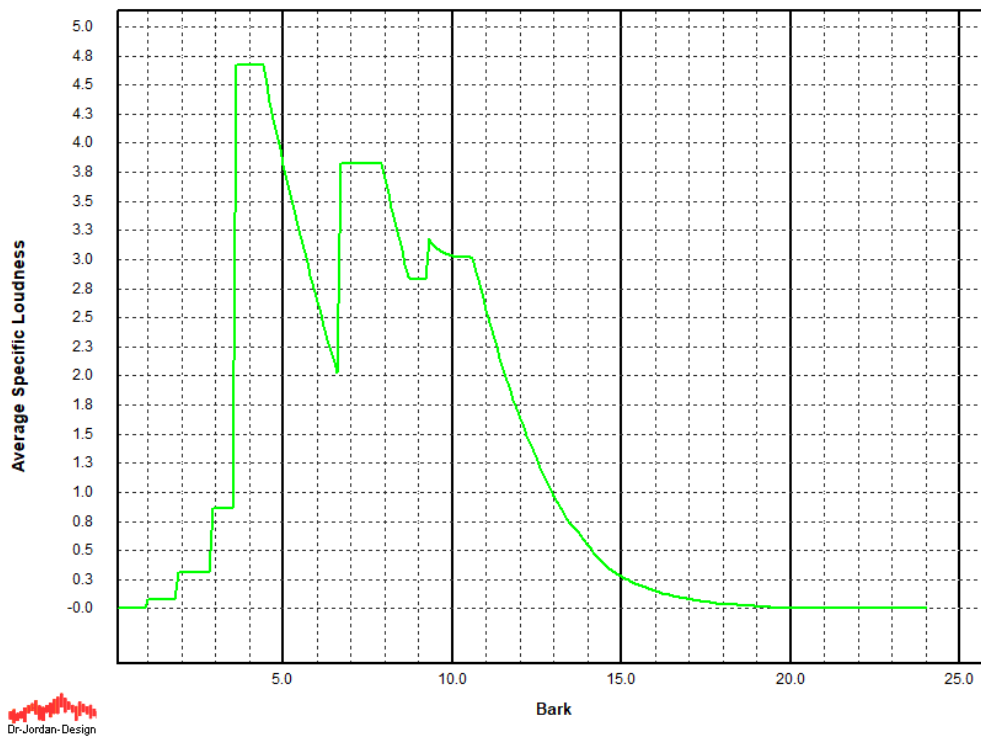


Abb. B.7: Spezifische Lautheit einer einzelnen Trompete

C Dokumente

Calibration Chart

Condenser Microphone
 Type: A15423
 Serial No.: C-2445
 Open Circuit Sensitivity:
 48.97 mV/Pa
 -26.2 dB re 1V/Pa
 Frequency Response:
 Free-field response for 0° incidence
 Calibration Conditions:
 Polarization Voltage, external: 0V
 Frequency: 251.2Hz
 Ambient Temperature: 23.0°C
 Relative Humidity: 50.0%
 Ambient Static Pressure: 101.3kPa
 Date:

Specifications:
 Diameter: 13.2mm with gird
 12.7mm without gird
 Thread for preamplifier mounting:
 11.7mm-60UNS
 Cartridge Capacitance:
 18pF(typical)
 Equivalent Air Volume:
 0.23cm³(with gird)
 Static Pressure Coefficient:
 $\leq \pm 0.015$ dB/kPa(at 250Hz)
 Temperature Coefficient:
 $\leq \pm 0.015$ dB/°C(at 250Hz,-10°C~50°C)
 Influence of Relative Humidity:
 $\leq \pm 0.001$ dB/RH%(at 23°C)
 Dynamic Range:
 140dB(at 250Hz,Distortion<3%)

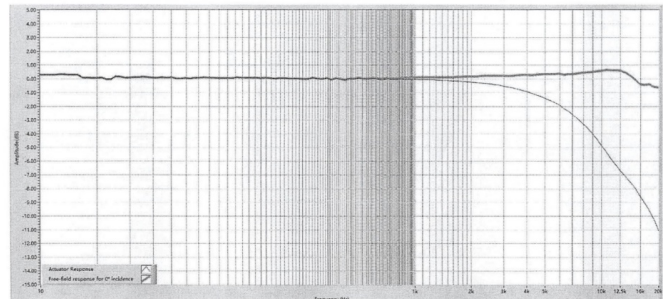


Abb. C.1: Kalibrierschein der verwendeten Mikrofonkapsel

Ablaufplan Sone Messung

Anmerkung: Standby/Stromsparmmodus des Laptop auf OFF!

1. Programm öffnen/"Start here" Button (Terz)
 2. dB Bereich (55-140 dB) wählen
 3. Kalibrieren (114,0 dB)
 4. dB Bereich anpassen
 5. Einstellungsbutton → Zeit wählen/Rekorder ✓
 6. Zeit auslaufen lassen/STOP Button
 7. Speicherbutton: Raum → Bereich
 8. Bericht ausgeben und Abspeichern
 9. Öffnen-Button → Messung öffnen: Kontrolle Rekorder!?
 10. Temp-Ordner sichern: Dokumente → Messungen → Temp
 11. erneut kalibrieren
- Ⓢ Lieber mehrere Messungen (durch Bereiche kategorisieren)
→ checken ob Messungen vollständig sind und funktionieren

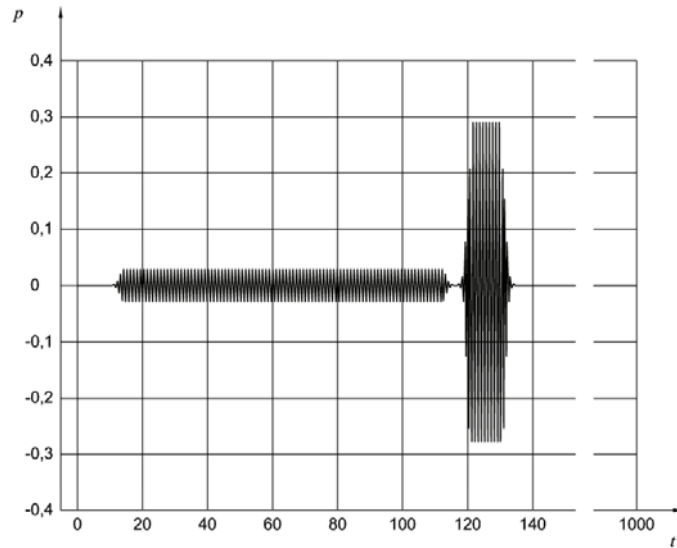
Checkliste

- Mikrophon
- Mikrophon USB Kabel
- Stativ(e)
- Microphonstativhalter
- Laptop/Ladegerät
- Kalibrator
- Tape

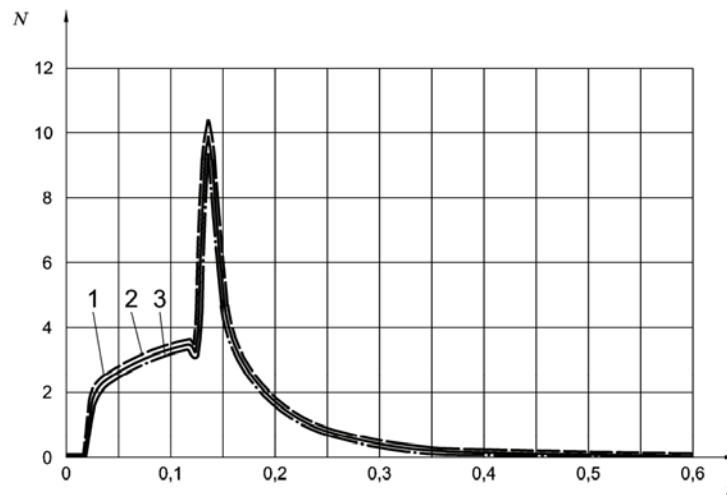
DIN45631 A1 specifies test patterns to verify the loudness calculation

The testsignal contains two 1kHz tone bursts.

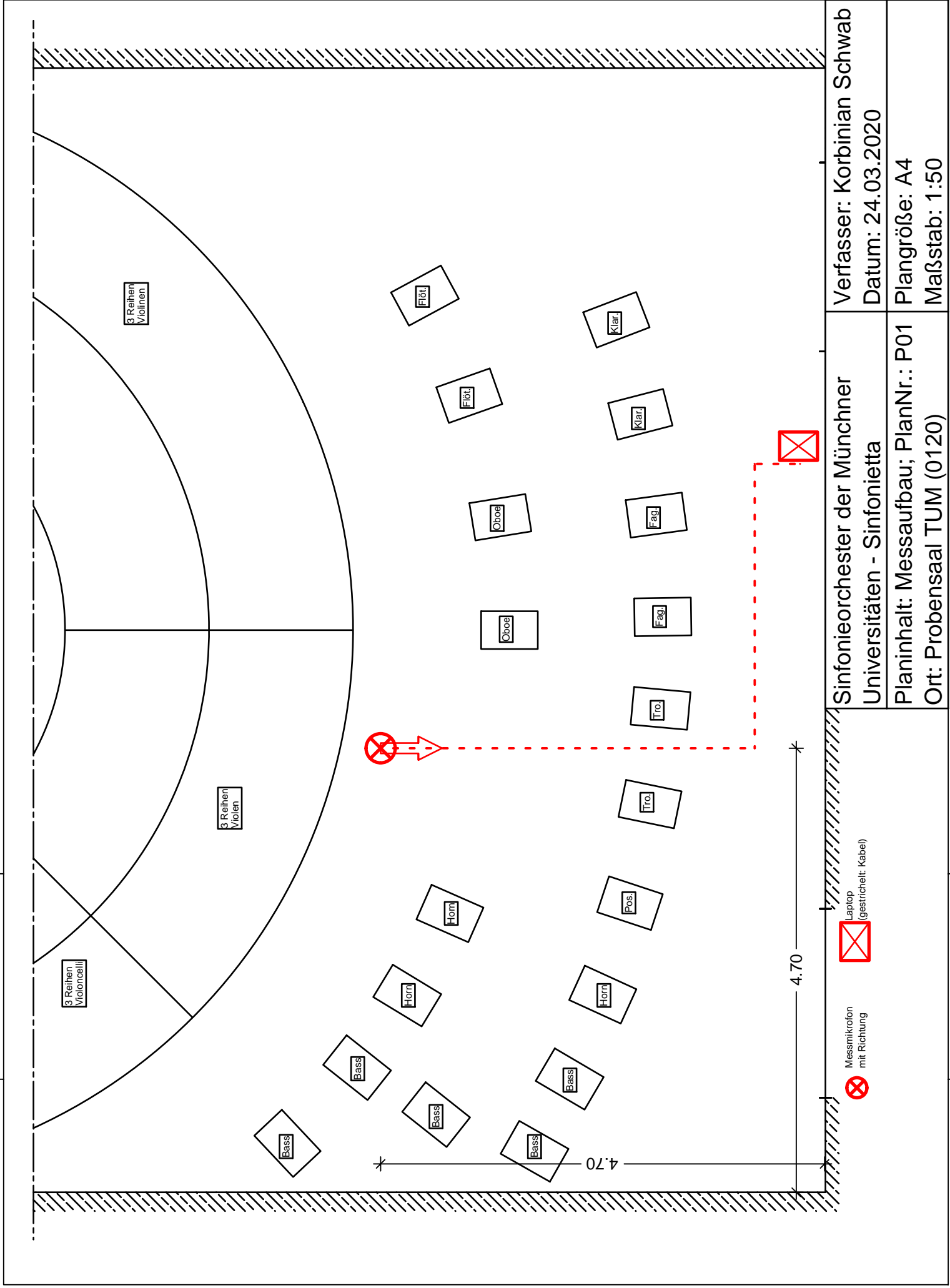
It starts with a 100ms burst at 60dB, continues with a pause of 5ms and continues with a burst of 10ms with a level of 80db.



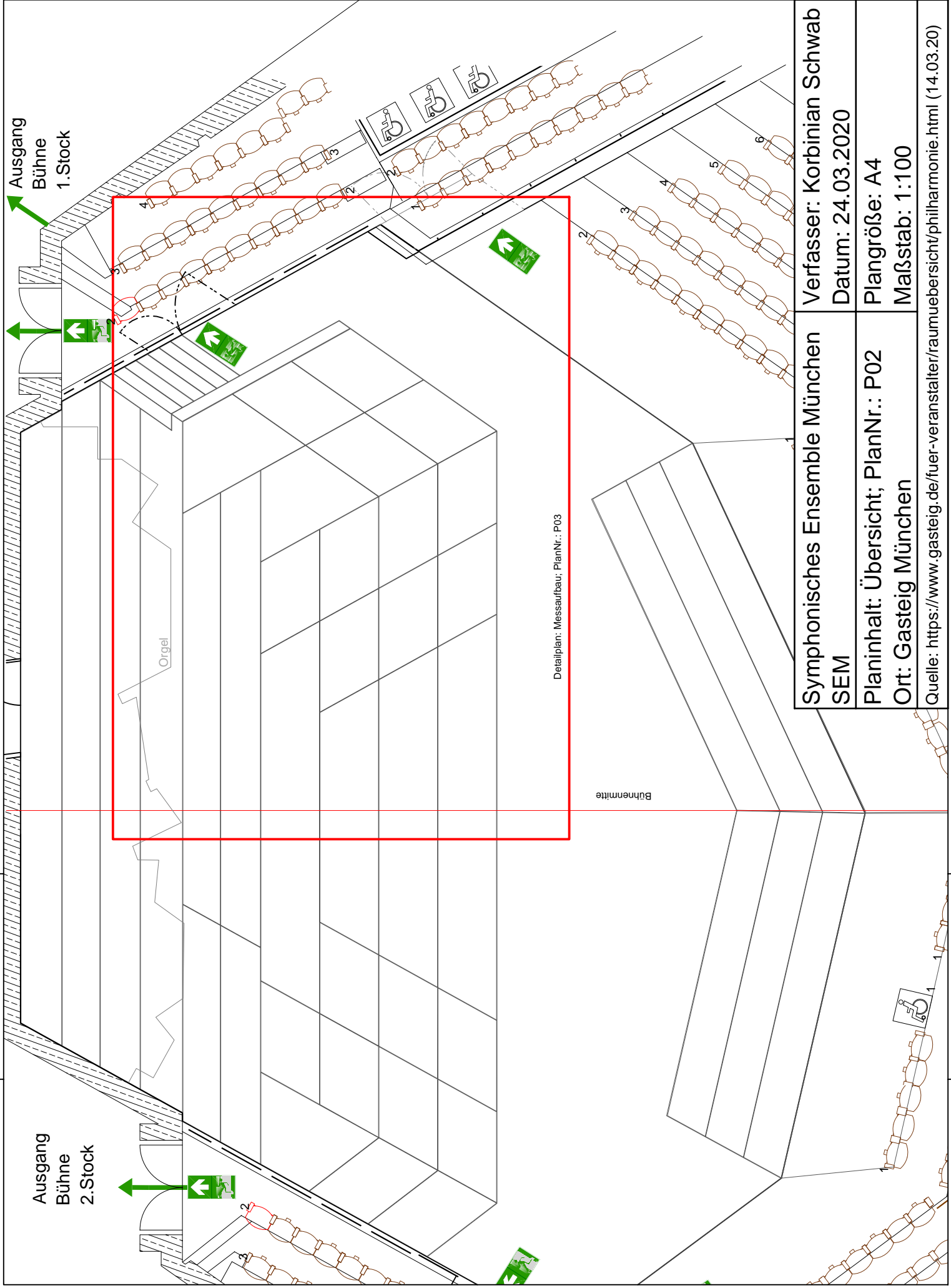
t=time in ms p=Sound pressure in Pa



1: upper limit 2: target loudness 3: lower limit



Sinfonieorchester der Münchner Universitäten - Sinfonietta	Verfasser: Korbinian Schwab
Planinhalt: Messaufbau; PlanNr.: P01	Datum: 24.03.2020
Ort: Probensaal TUM (0120)	Plangröße: A4
	Maßstab: 1:50



**Symphonisches Ensemble München
SEM**

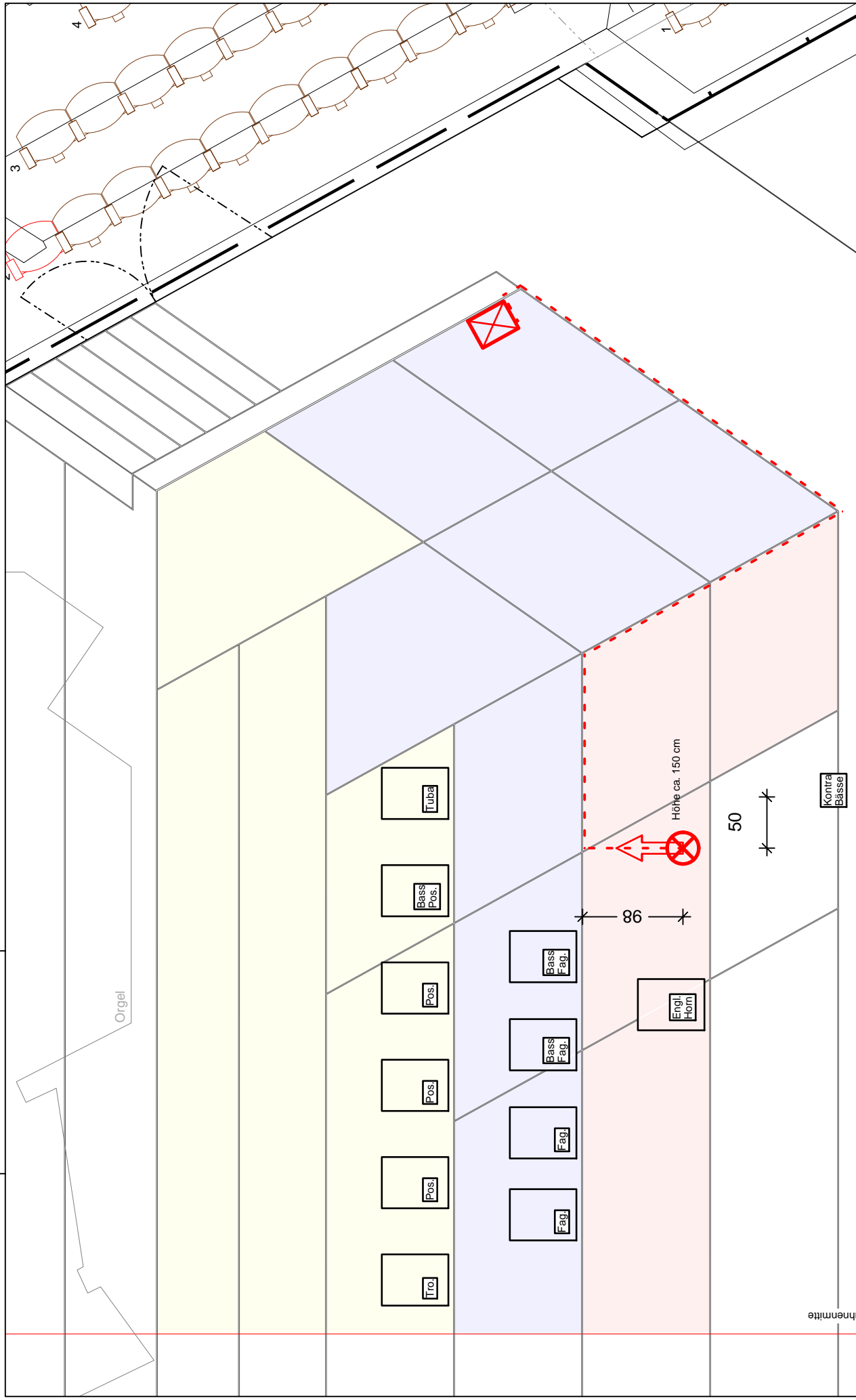
**Verfasser: Korbinian Schwab
Datum: 24.03.2020**

Planinhalt: Übersicht; PlanNr.: P02

**Plangröße: A4
Maßstab: 1:100**

Ort: Gasteig München

Quelle: <https://www.gasteig.de/fuer-veranstalter/raumuebersicht/philharmonie.html> (14.03.20)



Symphonisches Ensemble München
SEM
Planinhalt: Messaufbau; PlanNr.: P03
Ort: Gasteig München

Verfasser: Korbinian Schwab
Datum: 14.03.2020
Plangröße: A4
Maßstab: 1:50