

BACHELORARBEIT

Der Einfluss von Noise Cancelling auf Preferred Listening Levels

vorgelegt am 16. Mai 2026
Christian Lincke

Erstprüferin: Prof. Dr. Eva Wilk
Zweitprüfer: Lena Schell-Majoor

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Fakultät Elektro-, Medien- und Informationstechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht, wie sich die Nutzung von Kopfhörern mit aktivem Noise Cancelling (NC) auf die Preferred Listening Levels (PLLs) beim mobilen Hören von Audiomedien in einer Umgebung mit erheblicher Lärmbelastung auswirkt.

Dazu wurde ein Hörversuch mit 13 Proband:innen durchgeführt, bei dem in einer künstlichen Lärmumgebung in zwei Versuchsdurchgängen die PLLs mit und ohne aktivem NC aufgezeichnet wurden sowie Fragebögen zum Höreindruck beantwortet wurden. Die Proband:innen hörten ein dreiminütiges Programm aus einem Popsong und einem Podcast. Der Lärm wurde aus Aufnahmen und synthetisierten Klängen zusammengestellt und über eine Wellenfeldsynthese-Anlage wiedergegeben.

Zusätzlich wurden mehrere Messungen durchgeführt, die die Wirkung des NC sowie die Reduktion des Lärmpegels messtechnisch erfassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die PLLs, betrachtet als $L_{KH,Aeq}^1$, durch die Nutzung von NC im Durchschnitt um $5,0 \pm 3,3$ dB reduziert wurden.

Abstract

This work examines how headphones with active noise cancelling (NC) lead to reduced Preferred Listening Levels (PLLs) while listening to audio media in a noisy environment.

To investigate this, a listening test with a total of 13 participants was conducted. The test consisted of two rounds, in which the participants were exposed to artificial noise and their PLLs were recorded with NC on and off. In addition to that, a questionnaire about their subjective listening experience was answered. The audio material consisted of a piece of pop music and a podcast with a total length of three minutes. The noise was composed of audio recordings and synthesized sounds and played back using wave field synthesis.

In addition to the listening test, several measurements were made to examine the function of the NC and the reduction of the noise level.

The results show that the PLLs, viewed as $L_{KH,Aeq}^2$, were on average reduced by 5.0 ± 3.3 dB.

¹ $L_{KH,Aeq}$ bezeichnet den äquivalenten Dauerschallpegel, der durch die Kopfhörer versucht wird

² $L_{KH,Aeq}$ ist he equivalent continuous sound pressure level caused by the headphones

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelverzeichnis.....	V
1 Einführung.....	6
2 Methodik	8
2.1 Modellieren einer Lärmumgebung	8
2.1.1 Analyse einer Umgebung, Aufnahme und Pegel	8
2.1.2 Nachbildung durch Aufnahmen und Synthese.....	11
2.1.3 Erzeugen einer immersiven Lärmumgebung im Raum	15
2.2 Gestaltung des Hörversuchs	19
2.2.1 Auswahl der Kopfhörer.....	19
2.2.2 Auswahl des Hörmaterials	20
2.2.3 Fragebogen.....	20
2.2.4 Aufbau und Einrichtung.....	22
2.3 Messungen mit den Kopfhörern	23
3 Durchführung	24
3.1 Durchführung des Hörversuchs.....	24
3.2 Durchführung der Messungen	25
4 Auswertung	29
5 Zusammenfassung.....	49
6 Literaturverzeichnis.....	50
7 Anhang	52
7.1 Messergebnisse Lärmpegelmessungen (Bus).....	52
7.2 Messergebnisse Geräuschunterdrückung weißes Rauschen.....	54
7.3 Messergebnisse $L_{KH,ref}$	55
Eigenständigkeitserklärung.....	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Ergebnis Lärmpegelmessung Linie 3	9
Abbildung 2 - Pd-Abstraktion des Resonators.....	13
Abbildung 3 - Schematische Darstellung der Synthese in Pd.....	14
Abbildung 4 - Pd-Patch zur Modellierung der Fahrgeräusche (oberste Abstraktionsebene)	14
Abbildung 5 - Synthese eines vorbeifahrenden Autos mit Dopplereffekt	15
Abbildung 6 - Positionierung der Schallquellen in xWonder.....	16
Abbildung 7 - Messergebnisse der Pegel- und Spektrummessung der WFS-Lärmkulisse.....	17
Abbildung 8 - Apple AirPods Pro.....	19
Abbildung 9 - Fragebogen zu einem Durchgang des Hörversuchs	21
Abbildung 10 - Aufbau des Hörversuchs.....	22
Abbildung 11 - Position der Proband:innen beim Hörversuch	24
Abbildung 12 - Reaper-Projekt mit aufgezeichneter Volume-Automation	25
Abbildung 13 - Kalibrierung des Messsystems	26
Abbildung 14 - KU100 in der WFS-Anlage	26
Abbildung 15 - KU100 mit Apple AirPod Pro und Ohropax	27
Abbildung 16 - Aufbau KU100 Regie 4.....	28
Abbildung 17 - Ergebnisse der NC-Messungen mit Pinkem Rauschen	30
Abbildung 18 - Ergebnisse der Lärmpegelmessung mit KU100 und AirPods in der WFS.....	32
Abbildung 19 - Ergebnisse aller Hörversuche als $LDAW$	34
Abbildung 20 - Ergebnis $LDAW(t)$ Proband:in 7	35
Abbildung 21 - Referenzschalldruckpegel LKH, ref bei $LDAW = 0\text{ dB}$	36
Abbildung 22 - LKH bei $LDAW = -30\text{ dB}$	37
Abbildung 23 - PLLs als LKH, Aeq, dtt	38
Abbildung 24 – PLL von Proband:in 7 als $LKH, Aeq, dt(t)$	39
Abbildung 25 - Mittelwerte LKH	41
Abbildung 26 - $L_{total}, Z_{eq}, dt(t)$ von Proband:in 7	42
Abbildung 27 – Gesamtschallpegel L_{totlt}	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Maximalpegel und Äquivalentpegel der Messungen	11
Tabelle 2 – gemittelte Messergebnisse $LL_{\text{ärm}}, eq$	33
Tabelle 3 - LKH, Aeq aller Hörversuche.....	40
Tabelle 4 - Gesamtschallpegel L_{total}, Zeq für die Fälle NC off und NC on.....	44
Tabelle 5 - Ergebnisse des Fragebogens Fragen 1 – 4.....	45
Tabelle 6 - Ergebnisse des Fragebogens Frage 5 & 6.....	46

Formelverzeichnis

Formel 1 - Mittelung von äquivalenten Dauerschallpegeln.....	11
Formel 2 - Berechnung von Leq als Mittelung von Stichprobenergebnissen.....	30
Formel 3 - Berechnung der Standardabweichung $\sigma Leqf$	30
Formel 4 – Berechnung von $LL_{\text{ärm}}, Zeq, dt$	32
Formel 5 - Berechnung von $\sigma LL_{\text{ärm}}, Zeq$	32
Formel 6 - Berechnung von $LL_{\text{ärm}}, eq$	33
Formel 7 - Berechnung von LKH, ref aus mehreren Messungen.....	36
Formel 8 - Berechnung der Standardabweichung $\sigma LKH, ref$	36
Formel 9 - Berechnung von LKH	37
Formel 10 - Bestimmung von Leq über den Messzeitraum.....	39
Formel 11 - Fortpflanzung der Standardabweichung $\sigma LKH, eq$	40
Formel 12 - Berechnung von $\Delta Leq, NC onoff$	40
Formel 13 - Berechnung von L_{total}	42

1 Einführung

Lärm wird nicht nur oft als unangenehm empfunden, sondern birgt auch ernsthafte Risiken für die Gesundheit von Betroffenen. Gerade in urbanen Räumen ist man in unterschiedlichsten Situationen Lärm ausgesetzt, maßgeblich auch bei der Teilnahme am öffentlichen Verkehr.

Musik hingegen wird im Allgemeinen als schön empfunden und ist gleichzeitig unterhaltsame Begleitung und willkommene Ablenkung in lärmigen Umgebungen. Eine repräsentative Nutzerbefragung zum mobilen Konsum von Audiomedien der Landesanstalt für Medien NRW stellte fest, dass 73% der Befragten regelmäßig unterwegs mit dem Smartphone Audiomedien hören und davon 46% (Bluetooth-) Kopfhörer nutzen. Eine Studie von 2014 mit Schüler:innen und Student:innen in Singapur stellte fest, dass unter jungen Leuten sogar 95.8% täglich mit portablen Musikplayern hören.

Diese Studie stellte allerdings ebenfalls fest, dass davon 16,4% der Teilnehmer:innen bei einem Preferred Listening Level (PLL) von über 85 dB(A) hören – ein Wert, bei dem langfristig irreversible Hörschäden entstehen können. Das ist u.a. das Ergebnis eines Konflikts: Die Umgebung ist lärmig und laut, ich möchte lieber Musik hören – also muss die Musik auch laut sein, damit ich tatsächlich etwas höre.

In dieser Situation von Lärm in öffentlichen Umgebungen und weit verbreitetem, regelmäßig mobilen Musikkonsum hat sich über die letzten Jahre eine neue Technologie im Consumer-Markt etabliert: Kopfhörer mit Noise Cancelling (NC), die mittels aktiver Geräuschunterdrückung ermöglichen, Umgebungsgeräusche aus dem persönlichen Musikhören auszublenken.

Die Technik beruht auf dem Prinzip von Antischall: Im einfachsten Fall wird der externe Lärm über ein Mikrofon aufgenommen, das Signal invertiert, verstärkt und zusammen mit dem Nutzsignal auf den Lautsprecher des Kopfhörers gegeben. Mittels destruktiver Interferenz von direktem Störsignal und invertiertem NC-Signal findet so innerhalb des Gehörgangs eine Auslöschung des störenden Lärms statt. Moderne NC-Systeme sind sehr komplex und nutzen digitale Filter und verkettete Feedforward- und Feedback-Zweige, um eine hohe Stabilität, wenig Artefakte und eine effektive Geräuschunterdrückung zu gewährleisten.

Auf den täglichen Wegen durch die laute Stadt muss die Musik mit NC-Kopfhörern dadurch weniger gegen das Ensemble aus Lärm ankämpfen. Ich selbst habe dabei eine interessante Beobachtung gemacht: In lauten Umgebungen konnte ich mit neu erworbenen NC-Kopfhörern bei niedrigerer Lautstärke hören als zuvor, ohne dass wesentliche Elemente der Musik von den Umgebungsgeräuschen überdeckt wurden.

Genau dieses Verhalten wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht: Wird mobiles Musikhören durch die Nutzung von Noise Cancelling in einer lärmigen Umgebung dahingehend beeinflusst, dass PLLs reduziert werden und somit langfristig Hörschaden vorgebeugt wird?

Mehrere Studien haben dieses Verhalten untersucht und sind zu dem Schluss gekommen, dass die Nutzung von NC tatsächlich zu einer Reduktion der PLLs führt . Diese Arbeit knüpft an diese Studien an.

Um die These zu überprüfen, wurde ein Hörversuch mit 13 Proband:innen durchgeführt, in dem die Proband:innen ein Musikstück und einen Ausschnitt aus einem Podcast über NC-Kopfhörer (Apple AirPods Pro) hörten, während sie von einer WFS-Anlage mit Lärm beschallt wurden. In zwei Versuchsdurchgängen wurden die PLLs als relative PegelEinstellung aufgezeichnet, einmal bei aktiviertem Noise Cancelling und einmal ohne. Im Anschluss wurde eine Reihe von Messungen mit den Kopfhörern durchgeführt, um die Wirkweise des NC zu erfassen und Referenzwerte für PLLs zu bestimmen.

Die im Hörversuch genutzte Lärmumgebung stellte eine realistische Situation nach und wurde mit einer Kombination aus Synthese und Audioaufnahmen erzeugt.

2 Methodik

2.1 Modellieren einer Lärmumgebung

Für den Hörversuch war es nötig, eine Lärmumgebung zu erzeugen, die das Zusammenspiel von verschiedenen Schallquellen einer realen Lärmsituation nachstellt. In der Vorbereitung dieser Arbeit kam früh die Idee auf, hierfür die Wellenfeldsynthese-Anlage der HAW zu nutzen, da diese einige Vorzüge im Vergleich zu Stereo- oder 3D-Anlagen bietet: Bei der Wellenfeldsynthese können unterschiedlich stark gekrümmte Wellenfronten erzeugt werden, es kann also die Entfernung zu einer Punktschallquelle realistisch nachgebildet oder eine ausgedehnte Schallquelle approximiert werden.

Es ist naheliegend, für die Modellierung Audioaufnahmen einer realen Lärmumgebung zu nutzen. Allerdings ist es schwierig, herkömmliche Mehrkanal- oder Ambisonics-Aufnahmen abbildungsgetreu auf eine WFS-Anlage zu übertragen, daher wurde die Lärmumgebung aus einer Kombination von Synthese und einzelnen Audioaufnahmen erzeugt.

Bei der Wahl einer Lärmumgebung wurden verschiedene öffentliche Situationen in Erwägung gezogen, die typisch für den Alltag in einer Großstadt sind und Umgebungen darstellen, in denen häufig NC-Kopfhörer genutzt werden:

- Bahnfahrt
- Busfahrt
- Straßenverkehr
- Baustelle

Für den Hörversuch wurde die Busfahrt als Lärmkulisse gewählt, da hier ein großer Dynamikbereich abgedeckt wird und eine ganze Reihe von prägnanten Klängen wie z.B. Fahrgeräusche, Durchsagen und Straßenverkehr existieren.

2.1.1 Analyse einer Umgebung, Aufnahme und Pegel

Zur detailgetreuen Simulation einer Klangumgebung ist es nötig, diese zuerst zu analysieren. Für die Analyse wurden folgende Methoden festgelegt:

- Messung von Schallpegeln und Spektren
- Identifizieren von einzelnen Schallquellen und zeitlichen Abläufen
- Audioaufnahme als Referenz zum Erstellen der Simulation

Es wurden an mehreren Tagen insgesamt 5 Messungen in unterschiedlichen Buslinien in Hamburg durchgeführt. Das genutzte Messgerät war ein NTI Audio XL2, mit dem Schallpegel- und Spektralmessungen und Audio aufgezeichnet wurden. Das Messintervall war am Gerät auf 1 s eingestellt, die Messdauer der Messungen lag zwischen 4:56 min und 5:55 min.

Parallel zu den Messungen wurden Notizen zu Höreindruck und Schallereignissen während der Fahrt gemacht, welche als Vorlage zur Modellierung dienten. U.a. wurde notiert, ob der Bus mit Verbrenner- oder Elektromotor fuhr, wie die Beschaffenheit der Straße und das Verkehrsaufkommen waren und welche Klänge innerhalb des Busses auffielen.

Zur Auswertung der Lärmpegelmessungen wurde der A-gewichteten Maximalschallpegel für jedes Messintervall $L_{AFmax,dt}(t)$ sowie L_{AFmax} und der äquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq} über den gesamten Messzeitraum betrachtet.

Das Spektrum wurde mit Z-Gewichtung aufgezeichnet. Das Messgerät misst $L_{eq,dt}$ in Terzbändern zwischen 6,3 Hz und 20 kHz in dem festgelegten Messintervall von 1 s. Betrachtet werden hier Frequenzen oberhalb von 20 Hz, da Infraschall in dieser Arbeit nicht mit einbezogen wird.

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Messung in der Buslinie 3 zwischen Schützenstraße und Holstenstraße, die im Folgenden exemplarisch ausgewertet wird. Die Ergebnisse der anderen Messungen sind in Anhang 7.1.

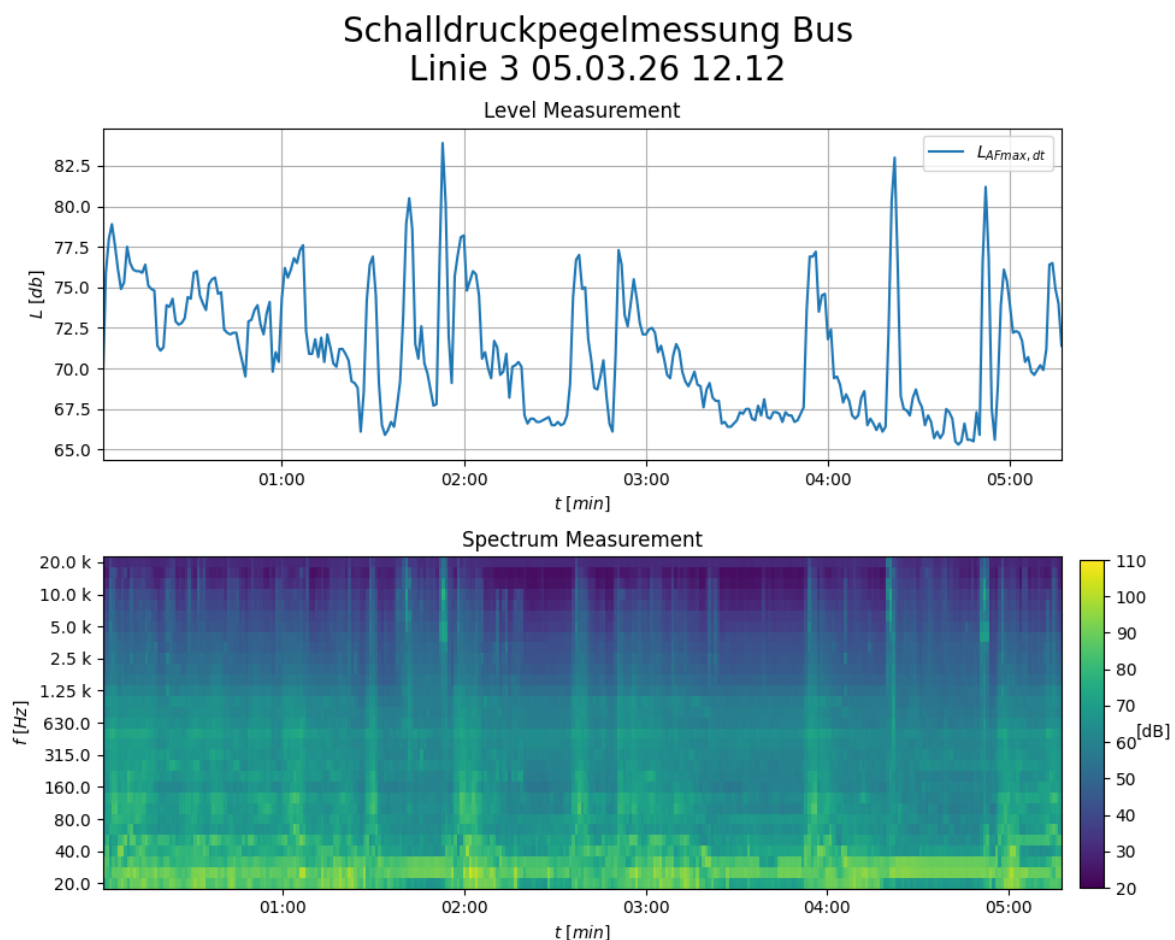


Abbildung 1 - Ergebnis Lärmpegelmessung Linie 3
Quelle: Eigene Darstellung

Der Bus fuhr mit Verbrennermotor, das Verkehrsaufkommen war typisch für die Tageszeit und die Anzahl der Fahrgäste normal (etwa 30). Die Messung fand im hinteren Teil des Busses in der Nähe einer Tür statt.

Während der Fahrt fielen folgende Geräusche auf:

- Motor: viele tiefe Frequenzen, immer hörbar, Anfahren / Beschleunigen besonders laut, regt Resonanzen und Klappern der Karosserie an
- Rollgeräusche und Unebenheiten der Straße: sehr tiefe, dumpfe, nicht tonale Impulse, Klappern im ganzen Bus bei größeren Schlaglöchern
- Türen: Quietschen beim Öffnen und Schließen, dumpfer Impuls beim Schließen, Signaltöne
- Lüftung: konstantes, mittiges Rauschen
- Verkehr: vorbeifahrende Autos, rauschhaft, Motorengeräusche wenig hörbar
- Durchsagen: mittiger, präsenter, komprimierter Klang der Stimme
- Fahrgäste: Gespräche hörbar aber meistens wenig verständlich, mittig

Die Betrachtung der Ergebnisse der Schallpegel- und Spektralmessung in Abbildung 1 bestätigen die Beobachtungen. Besonders fallen die Schwankungen der Schalldruckpegels und die große Präsenz von (Sub-)Bassfrequenzen auf.

Mit der Audioaufnahme als Referenz kann der hohe Pegel zu Beginn der Messung auf das Anfahren des Busses zurückgeführt werden, in der Spektralmessung zu erkennen an einem diffusen Spektrum zwischen 20 Hz und 70 Hz. In diesem Frequenzbereich kann auch die mit der Drehzahl steigende Frequenz des Motors beobachtet werden (2:35 min). Bei stehendem Bus, z.B. 4:20 min bis 4:50 min, ist dieser Frequenzbereich konstanter, hier sind Frequenzen im Bereich zwischen 30 Hz und 40 Hz dominant.

Die Stöße durch Unebenheiten in der Straße und Schlaglöcher und das dadurch angeregte Klappern sind als breitbandige Pulse zu erkennen, z.B. bei 2:00 min und 3:50 min. Diese Impulse tragen zu dem diffusen Bassspektrum bei.

Das Öffnen und Schließen der Türen produzierte ein mittig bis hochfrequentes Quietschen, das sowohl in der Pegelmessung als auch in der Spektralmessung heraussticht, zu erkennen an den Pegelspitzen bei 1:40 min, 1:50 min, 4:20 min und 4:50 min. Beim Schließen der Türen ertönte außerdem ein Signalton mit vielen Frequenzanteilen im hohen mittleren Frequenzbereich bei ca. 4 kHz. Der hohe Pegel der Türgeräusche ist darauf zurückzuführen, dass die Messung direkt neben einer Tür erfolgte.

Die durchgängigen Frequenzen bei ca. 500 Hz und 1 kHz ordne ich der Lüftung zu. Bei etwa 2:10 min wurde eine ca. 10 s lang Ansage im Bus abgespielt, diese kann in der Spektralmessung im tiefen Mitten- bis Höhenbereich wiedergefunden werden.

Die restlichen Geräusche sind in den Messergebnissen schwierig zu identifizieren. Sowohl der Verkehr außerhalb des Busses als auch die Gespräche und Bewegungsgeräusche der anderen Fahrgäste klangen sehr gedämpft bzw. mittig.

Die anderen Messungen zeigen ähnliche Ergebnisse. Bei einer Fahrt mit der Buslinie 111 (Elektromotor) fuhr der Bus zum Teil über Kopfsteinpflaster, hier stieg der Schallpegel L_{AFmax} im Vergleich zur Fahrt über Asphalt um etwa 10 dB an. Die kontinuierlichen Stöße waren besonders im Bass- und tiefen Mittbereich präsent, regten aber auch viel Klappern an, das höhere Frequenzen abdeckte.

Tabelle 1 - Maximalpegel und Äquivalentpegel der Messungen
Quelle: Eigene Darstellung

Datum & Zeit	Buslinie & Strecke	$T [min]$	$L_{AFmax} [dB(A)]$	$L_{Aeq} [dB(A)]$
03.03.26 9:55	111 Kirchenweg - Fischauktionshalle	05:55	94,8	69,5
04.03.25 11:10	30 Neumühlen - Altona	04:56	79,7	67,8
05.03.26 11:46	2 Altona - Celsiusweg	05:04	77,8	62,5
05.03.26 12:12	3 Schützenstraße - Holstenstraße	05:17	83,9	71,3
05.03.26 8:13	12 Fischers Allee - Halbmondsweg	05:03	80,4	69,1

Die äquivalenten Dauerschallpegel der einzelnen Messungen wurden nach Formel 1 gemittelt, der Mittelwert der Messungen beträgt $\bar{L}_{Aeq} = 68,9 \text{ dB(A)}$.

$$\bar{L}_{eq} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_{ges}} \sum_{i=1}^N T_i 10^{0,1 L_{eq,i}} \right] \text{ dB} \quad (1)$$

Formel 1 - Mittelung von äquivalenten Dauerschallpegeln

2.1.2 Nachbildung durch Aufnahmen und Synthese

Die Nachbildung der Geräuschkulisse einer Busfahrt erfolgte anhand der Messungen, Notizen und Aufnahmen. Hierbei wurden zwei Techniken angewendet: Arrangieren von Audioaufnahmen und Synthese mit Pure Data. Je nach Schallquelle wurde eine der beiden Methoden gewählt.

Die Synthese bietet in diesem Anwendungsfall mehrere Vorteile gegenüber Aufnahmen: Klänge können sehr fein justiert werden und es gibt keinen Einfluss durch Mikrofonierung oder Raumklang – letzteres war für die Arbeit mit der WFS-Anlage sehr hilfreich, da verhallte Aufnahmen hier unrealistisch klangen.

Die Synthese einiger Klänge erfolgte nach Prinzipien des Physical Modelling. Das Ziel war, eine für den Hörversuch hinreichende Immersion zu erreichen, ohne die realen mechanischen Eigenschaften der Klangerzeuger bis in Detail nachzubilden. Die Modelle, die mit Physical Modelling umgesetzt sind, sind daher an vielen Stellen vereinfacht, beruhen aber auf dem Prinzip von Generatoren und Resonatoren.

Bei genauerer Betrachtung sind besonders die Fahrtgeräusche sehr komplex und eng miteinander verknüpft: Vibrationen des Motors und Impulse durch Unebenheiten in der Straße regen die Karosserie des Fahrzeugs an, was wiederum eine ganze Reihe von neuen Schwingungen anregt – Klappern von Fenstern, Türen und diversen Teilen der Innenraumverkleidung des Busses. Die Summe dieser einzelnen Klänge deckt ein breites Frequenzspektrum ab, Schwingungen von Motor und Karosserie sind sehr tiefrequent, Rollgeräusche enthalten viele Anteile im tiefen Mittelebereich und das Klappern der verschiedenen Gegenstände deckt ein breites Spektrum im mittleren und hohen Frequenzbereich ab.

Dieses System kann heruntergebrochen werden in Motor und die Straße/Reifen als Generatoren und die Karosserie und andere Fahrzeugteile als Resonatoren. Dem entsprechend habe ich hierfür Ansätze des Physical Modeling verwendet.

Für den Motor wurde das Modell der Advanced Engine von Andy Farnell genutzt. Dieses simuliert die verschiedenen Komponenten eines Verbrennermotors mit Techniken wie subtraktiver, additiver, nicht-linearer Synthese sowie Physical Modelling und erzeugt einen sehr realistischen Klang. Durch verschiedene Parameter kann der Klang dahin angepasst werden, dass er dem Klang eines Busmotors sehr ähnelt.

Die Interaktion von Straße und Reifen wurde mit einer Mischung aus gefiltertem Rauschen und kurzen, tiefrequenten Impulsen modelliert. Das Rauschen stellt die Rollgeräusche der Reifen dar, während die Impulse Unebenheiten und Schlaglöcher nachbilden. Frequenz, Amplitude und Zeitintervall zwischen den Impulsen ist dabei variabel und alle drei Parameter werden zufällig moduliert, um Schlaglöcher und Hubbel unterschiedlicher Größe, Tiefe und Häufigkeit darzustellen.

Die Karosserie, also vor allem die langen Seitenwände des Busses, wurden als Resonatoren betrachtet, die von Motor und Impulsen angeregt werden und daraufhin kurz nachschwingen. Dabei wurde angenommen, dass die Dämpfung hoch und die Resonanzfrequenzen inharmonisch sind.

Dies wurde mittels einer Abwandlung des Extended Karplus-Strong Algorithmus (EKS) umgesetzt. Ein Schroeder-Allpassfilter im Rückkopplungsweig des KS-Algorithmus fügt inharmonische Resonanzfrequenzen hinzu, die bei bestimmten Einstellungen denen von schwingenden Membranen (z.B. Felle von Trommel) ähneln. Zwei kaskadierte Tiefpassfilter und ein niedrig gewählter Feedback-Parameter sorgen dafür, dass die Schwingung schnell abklingt. Die Delayzeit des KS-Modells und die Frequenz des Allpassfilter wurden so gewählt, dass die Resonanzen primär im (Sub-) Bassbereich auftreten. Andere Modelle, wie z.B. Digital Waveguide Meshs oder Banded Waveguides, wären hier genauer, sind im Vergleich aber sehr komplex und das gewählte Modell wurde für den Anwendungsfall als hinreichend genau betrachtet.

Es wurden zwei getrennte Resonatoren mit leicht unterschiedlichen Parametern umgesetzt, um die Schallabstrahlung der beiden großen Seitenwände eines Busses darzustellen.

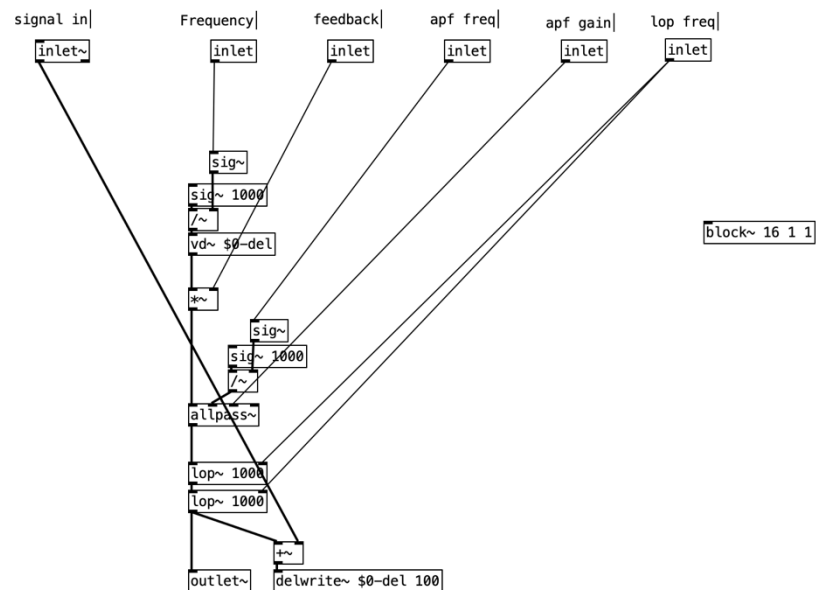


Abbildung 2 - Pd-Abstraktion des Resonators
Quelle: Eigene Darstellung

Die Schwingungen der Karosserie werden an mehrere Resonatoren weitergeleitet, die das Klappern von u.a. Fenstern und Innenverkleidung nachbilden. Die Idee war, dass diese Gegenstände bei einer Anregung zunächst geräuschlos schwingen, jedoch bei einer bestimmten Auslenkung gegen einen anderen Gegenstand schlagen und dadurch ein kurzes Geräusch erzeugen. Hierfür wurde ebenfalls ein abgewandeltes Karplus-Strong Modell genutzt, dessen Ausgangssignal ab einem festgelegten Schwellwert einen kurzen Impuls von weißem Rauschen triggert, dieses Rauschen wird dann mittels mehrere paralleler Bandpassfilter gefiltert. Der Klang ist komplex und kann durch Anpassung von KS-Frequenz, -Feedback und Bandpassfrequenz das Klappern verschiedener Gegenstände nachbilden.

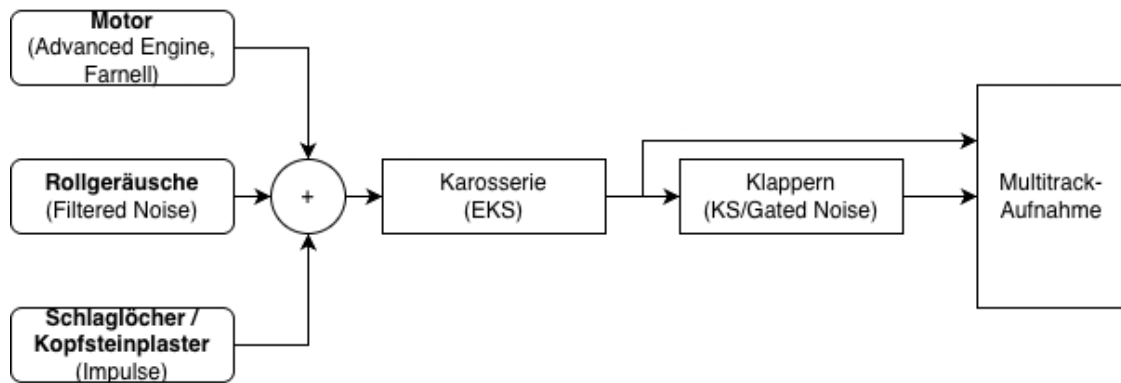


Abbildung 3 - Schematische Darstellung der Synthese in Pd
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3 zeigt schematisch die Synthese der Fahrgeräusche. Die Karosserie war in Pd zweimal umgesetzt (links und rechts), das Klappern insgesamt achtmal. Abbildung 4 zeigt den dazugehörigen Pd-Patch, der mehrere Abstraktionsebenen enthält.

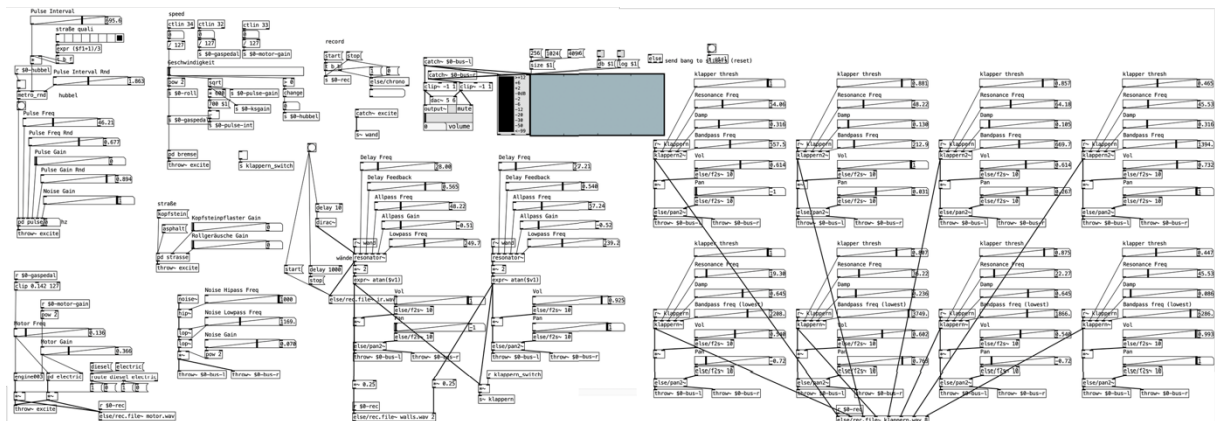


Abbildung 4 - Pd-Patch zur Modellierung der Fahrgeräusche (oberste Abstraktionsebene)
Quelle: Eigene Darstellung

Die Fahrtgeräusche wurden als Multitrack in Pure Data aufgenommen. Für die Steuerung der Parameter wurde ein MIDI-Controller genutzt, um u.a. Fahrtgeschwindigkeit, Lautstärke des Motors sowie Häufigkeit und Intensität der Impulse in Echtzeit zu steuern.

Die weiteren Klänge des Busses wurden isoliert betrachtet und synthetisiert. So wurde mit Rauschen, Bandpassfilter und Amplitudenmodulation die Lüftung nachgestellt, das Quietschen der Tür ebenfalls mit Rauschen und Filtern und das dumpfe Schließen mit einem kurzen Rauschimpuls und schmalbandigen Bandpassfiltern. Der Signalton bei Schließen wurde mit FM-Synthese und nichtlinearer Verzerrung erzeugt. Vorbeifahrenden Autos wurden mit Rauschen synthetisiert, dabei wurde der Dopplereffekt mit einem Bandpassfilter nachgestellt, dessen Frequenz sich entsprechend der relativen Fahrtgeschwindigkeit ändert.

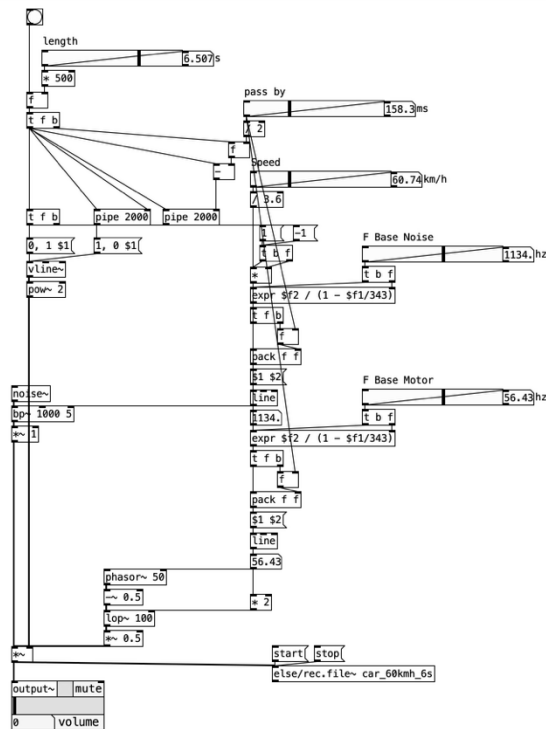


Abbildung 5 - Synthese eines vorbeifahrenden Autos mit Dopplereffekt
Quelle: Eigene Darstellung

Für die Durchsagen und Gespräche der Fahrgäste wurden Aufnahmen aus einer Sound-Datenbank³⁴⁵ sowie Sprachclips verwendet, die mit einem KI-basierten Text-to-Speech-Tool⁶ erzeugt wurden. Diese wurden mit EQs, die Ansagen zusätzlich mit einem Kompressor bearbeitet. Nach dem Prinzip von Foley-Aufnahmen wurden Schritte aufgenommen, die beim Ein- und Aussteigen von Fahrgästen zu hören sind.

Die Aufnahmen wurden mit der DAW Reaper editiert und arrangiert und ein Stereo-Roughmix als Vorbereitung für die Arbeit mit der WFS-Anlage erstellt und die Spuren anschließend als Stems exportiert.

2.1.3 Erzeugen einer immersiven Lärmumgebung im Raum

Aus den exportierten Stems wurde mit Hilfe der WFS-Anlage in Studio 4 eine immersive, räumliche Lärmumgebung erzeugt. Die Ansteuerung der WFS erfolgte mit der Software Suite WONDER, die Ausspielung und Anpassung der einzelnen Spuren mit der DAW Ardour.

³ SpliceSound – Indoor adult murmur, small group, *pixabay.com*, <https://pixabay.com/sound-effects/people-indoor-adult-murmur-small-groupwav-14573/>, abgerufen am 02.04.26

⁴ Iqbalfirdaus Hasan – Urban traffic noise, *pixabay.com*, <https://pixabay.com/sound-effects/city-urban-traffic-noise-378409/>, abgerufen am 02.04.26

⁵ Guyburns (freesound) – Conversations #2, *pixabay.com*, <https://pixabay.com/sound-effects/people-conversations-2-23754/>, abgerufen am 02.04.26

⁶ Natural Reader, <https://www.naturalreaders.com/online/>, abgerufen am 31.03.26

Die Positionierung der Schallquellen sowie die Lautstärkeeinstellungen der einzelnen Spuren simulierten den Höreindruck, den eine Person im hinteren Bereich des Busses in der Nähe des Motors hat. Hierfür wurde der Mittelpunkt der WFS-Anlage als Position für die Proband*innen festgelegt. Die Schallquellen, die innerhalb des Busses liegen, wurden an entsprechenden Positionen innerhalb der Anlage positioniert, z.B. Durchsagen und Gespräche, die Lüftung, den Motor sowie das Klappern. Die Karosserie wurde als ausgedehnte, annähernd ebene Schallquelle betrachtet und die beiden Kanäle dementsprechend außerhalb der Anlage angeordnet.

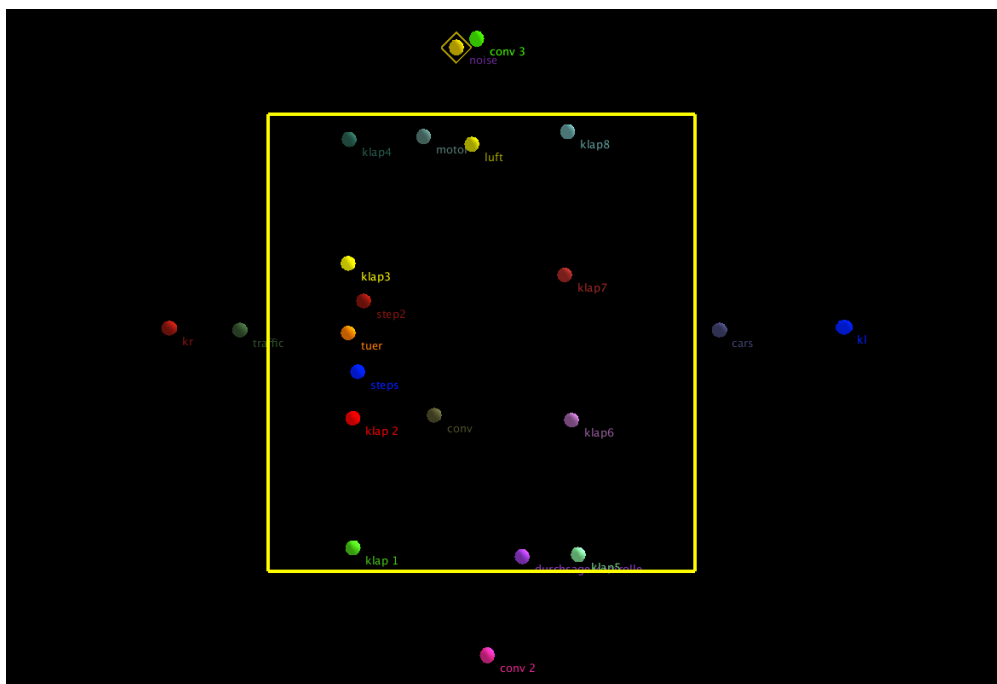


Abbildung 6 - Positionierung der Schallquellen in xWonder
Quelle: Eigene Darstellung

Als weitere Orientierung diente das Prinzip von „Context“ und „External Foreground Elements“, also die Staffelung von situationsspezifischen, eher hintergründigen Klängen und herausstechenden Klängen, die mehr Aufmerksamkeit beanspruchen. Nach diesem Prinzip wurden die Fahrtgeräusche und Gespräche als, stellenweise sehr präsenter, Context und die Durchsagen und Signaltöne als External Foreground Elements arrangiert.

Während der Umsetzung der Lärmkulisse in der WFS-Anlage wurden regelmäßig Pegel- und Spektrummessungen mit dem NTI XL2 durchgeführt, die Messergebnisse wurden mit den Messergebnissen der realen Busfahrten abgeglichen. Auf Grundlage des Höreindrucks und der Messergebnisse wurden die Schallquellen bei Bedarf mit Filtern und Equalizern bearbeitet sowie die Pegel angepasst.

Schalldruckpegelmessung Lärm wfs 07.04.27 16.48

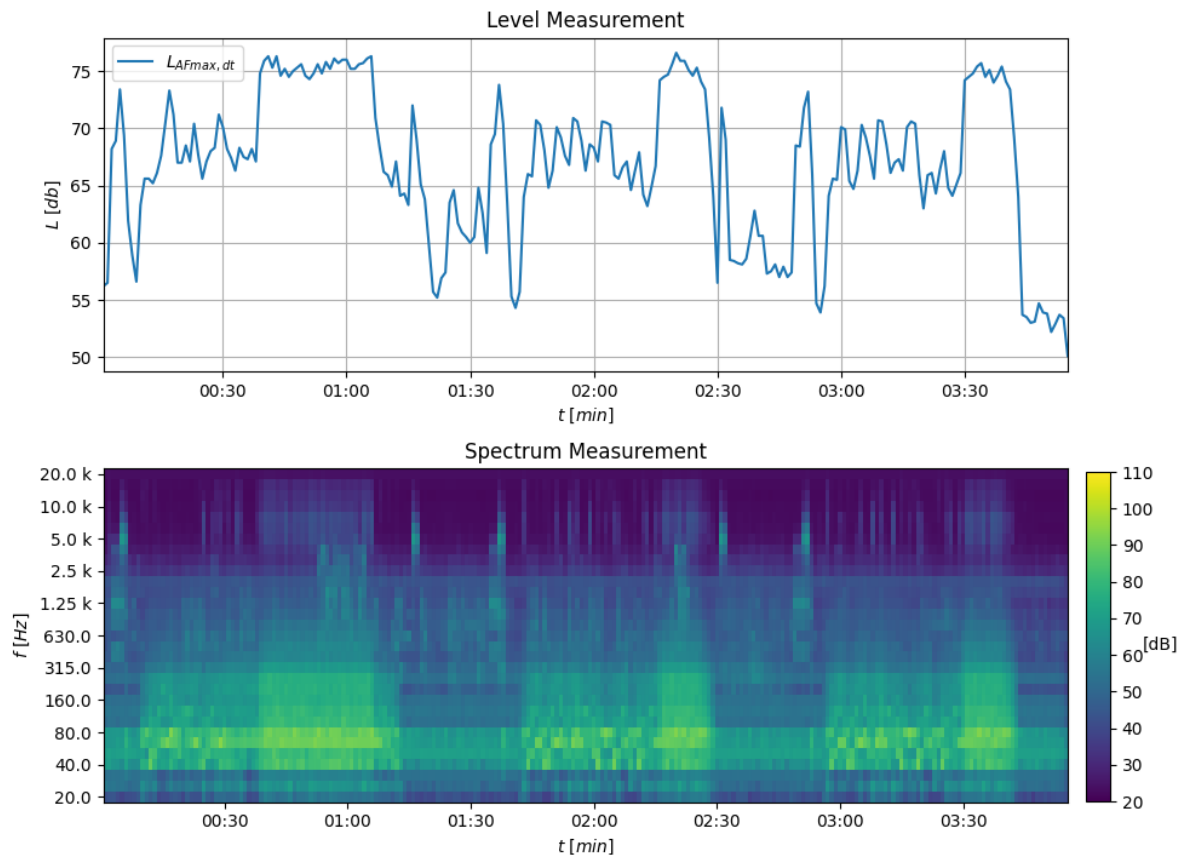


Abbildung 6 - Messergebnisse der Pegel- und Spektrummessung der WFS-Lärmkulissee
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7 zeigt die Messergebnisse der finalen Lärmkulissee. Der äquivalente Schalldruckpegel betrug $L_{A,eq} = 68,7 \text{ dB(A)}$.

Die Messung zeigte eine technische Limitierung der Anlage auf, durch die untere Grenzfrequenz von 50 Hz konnten die tiefsten Frequenzen der Lärmkulissee nur schlecht abgebildet werden. Dies wurde kompensiert, indem der Bereich von 80 Hz – 100 Hz durch Pegelanpassung und EQ-Bearbeitung einzelner Spuren leicht überbetont wurde, um trotz der Einschränkungen einen vergleichbaren Höreindruck zu erhalten.

Im Vergleich zu den realen Busfahrten ist der maximal Schalldruckpegel etwas geringer, was unter anderem auf die begrenzte Basswiedergabe der WFS-Anlage und die geringere Dynamik der synthetisierten Klänge zurückzuführen ist. Das Sounddesign wurde für den Versuch jedoch als hinreichend realistisch betrachtet, es wurde auf weitere Bearbeitungen mit z.B. Volume-Automation verzichtet.

Nach der Durchführung der Hörversuche wurde festgestellt, dass es technisch bedingte Probleme mit der WFS-Anlage gab: Schallquellen, die innerhalb der Anlage platziert waren, wurden fälschlicherweise als Realschallquellen abgebildet. Mehrere Person gaben bei einer Vorführung der Lärmkulissee an, diese

Schallquelle auf der Ebene der Lautsprecher zu lokalisieren, die gewünschte Immersion wurde also nicht erreicht. Dieses Problem wurde in der Vorbereitung der Versuche nicht identifiziert. Es wird aber angenommen, dass dies keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Hörversuchs hatte.

2.2 Gestaltung des Hörversuchs

2.2.1 Auswahl der Kopfhörer

Für den Hörversuch stand eine Reihe von Bluetooth In-Ear Kopfhörern verschiedener Hersteller zur Verfügung. Für den Versuch wurden ein Paar Apple AirPods Pro (1. Gen) ausgewählt, da Kopfhörer der Firma Apple weit verbreitet sind und das gewählte Modell gute NC-Eigenschaften mit einer Dämpfung von bis zu 21 dB besitzt.



Abbildung 7 - Apple AirPods Pro

Quelle: Apple, <https://store.storeimages.cdn-apple.com/4668/storeimages.apple.com/is/MTJV3?wid=1200&hei=630&fmt=jpeg&qlt=95&.v=1694014871985>, abgerufen am 21.04.26

Die AirPods bestehen aus einem soliden Plastikgehäuse, auf das Silikonauflagen in drei unterschiedlichen Größen gesteckt werden können. Dadurch ist eine individuelle Anpassung an die Form des Ohrs möglich. Die Kopfhörer sitzen im Eingang des Gehörgangs und schließen diesen idealerweise ab.

Wie bei den meisten Consumer-Produkten gibt es zu den AirPods keine offiziellen Angaben oder Datenblätter, die auf die technischen Details der Kopfhörer und insbesondere der verwendeten NC-Algorithmen eingehen. Da diese Arbeit sich auf Effekte und Wirkung von NC konzentriert, werden auch nur diese im Rahmen der Versuche und Messungen näher untersucht; die zugrundeliegende Technik wird als Black Box behandelt.

Bei der Wahl der Kopfhörer wurde angenommen, dass die klanglichen und geräuschunterdrückenden Eigenschaften (aktiv und passiv) der AirPods als vergleichbar mit denen anderer Ohrhörer gleicher Bauart sind.

2.2.2 Auswahl des Hörmaterials

Das Audiomaterial, das die Proband:innen über die Kopfhörer hörten, bestand aus einem Musikstück und einem Ausschnitt eines Podcast, die zu einem Programm mit einer Länge von 3:05 min zusammengestellt wurden. Das ausgewählte Musikstück war der Song „Many Times“ des R&B-Künstlers Dijon⁷, der Podcast war ein Ausschnitt des Deutschlandfunk Nova Beitrags „Wissensnachrichten“⁸.

Das Musikstück entspricht in vielerlei Hinsicht einer modernen Pop-Ästhetik mit angehobenen Bass-Frequenzen sowie präsenten, komprimierten Vocals und Drums. Das Stück ist verhältnismäßig laut gemastert – die heruntergeladene flac-Datei hatte eine integrierte Lautheit von -5,7 LUFS und eine Loudness Range von 1,7 LU. Der Song wurde im Hörversuch in der vollen Länge von 2:07 min wiedergegeben.

Der Podcast war ein reiner Sprachbeitrag ohne Hintergrundmusik, jedoch mit kurzen Jingles am Anfang und Ende. Die integrierte Lautheit betrug -18,3 LUFS, die Loudness Range 2,6 LU. Die Länge des Beitrags war 58 s.

Die Clips wurden in REAPER auf die gleiche Lautheit normalisiert, als Wert wurde hier -14 LUFS gewählt, mit dem u.a. der Streaminganbieter Spotify arbeitet. Die Clips wurden mit einem kurzen Crossfade aneinandergesetzt.

2.2.3 Fragebogen

Um Teile des subjektiven Höreindrucks der Proband:innen zu erfassen, wurde ein Fragebogen erstellt (Abbildung 9). Dieser umfasste Fragen zur Qualität des Musik- und Podcasthörens, zum Wohlbefinden mit der gewählten Lautstärke und Wahrnehmung des Lärms. Personenbezogene Daten wurden nicht aufgenommen.

Mit den ersten beiden Fragen wurde ermittelt, wie die wahrgenommene Hörqualität war – also ob alle Elemente von Musik und Podcast gehört werden konnten und es ein zufriedenstellendes Hörerlebnis war. Dies konnten die Proband:innen mit einer fünfstufigen Skala von „sehr schlecht“ bis „sehr gut“ bewerten. Die nächste Frage zielte darauf ab, wie sehr der Lärm dazu beigetragen hat, dass das Hörerlebnis nicht optimal war. Auch diese Frage konnte mit fünf Stufen von „sehr störend“ bis „nicht störend“ beantwortet werden.

⁷ Dijon – Many Times, *Absolutely*, R&R/Warner Records Inc. (2021)

⁸ Wissensnachrichten – So weit ins All ist noch niemand geflogen, Deutschlandfunk Nova (ausgestrahlt am 02.04.2026, abgerufen am 04.04.2026)

Teilnehmer:in _____	NC _____										
1. Wie war die Hörqualität der Musik? <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>sehr schlecht</td> <td>schlecht</td> <td>mittel</td> <td>gut</td> <td>sehr gut</td> </tr> <tr> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </table>		sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut	☐	☐	☐	☐	☐
sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut							
☐	☐	☐	☐	☐							
2. Wie war die Hörqualität des Podcast? <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>sehr schlecht</td> <td>schlecht</td> <td>mittel</td> <td>gut</td> <td>sehr gut</td> </tr> <tr> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </table>		sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut	☐	☐	☐	☐	☐
sehr schlecht	schlecht	mittel	gut	sehr gut							
☐	☐	☐	☐	☐							
3. Wie hast Du den Hintergrundlärm wahrgenommen? <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>sehr störend</td> <td>störend</td> <td>etwas störend</td> <td>kaum störend</td> <td>nicht störend</td> </tr> <tr> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </table>		sehr störend	störend	etwas störend	kaum störend	nicht störend	☐	☐	☐	☐	☐
sehr störend	störend	etwas störend	kaum störend	nicht störend							
☐	☐	☐	☐	☐							
4. Ich habe mich mit der von mir eingestellten Lautstärke wohl gefühlt und würde längere Zeit bei dieser Lautstärke Musik / Podcast hören. <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>trifft nicht zu</td> <td>unsicher</td> <td>trifft voll zu</td> </tr> <tr> <td>☐</td> <td>☐</td> <td>☐</td> </tr> </table>		trifft nicht zu	unsicher	trifft voll zu	☐	☐	☐				
trifft nicht zu	unsicher	trifft voll zu									
☐	☐	☐									
5. Welches Element des Hintergrundlärm war besonders störend?											
6. Welches Element der Musik / die Podcasts war besonders schwer zu hören?											

Abbildung 9 - Fragebogen zu einem Durchgang des Hörversuchs
 Quelle: Eigene Darstellung

Die vierte Frage nahm das subjektive Lautstärkeempfinden mit in die Bewertung auf und sollte aufzeigen, ob und wie im Konflikt von zu lautem Lärm und zu lauter Musik ein Kompromiss gefunden werden konnte.

Mit den letzten beiden Fragen wurde erfasst, wie der Lärm das Hörerlebnis beeinträchtigt: welche Elemente des Lärms besonders prägnant und störend waren und welche Elemente von Musik und Podcast überdeckt wurden.

2.2.4 Aufbau und Einrichtung

Bei dem Hörversuch wurden zwei getrennte Audiosysteme verwendet: Die WFS-Anlage für die Ausspielung des Umgebungslärms sowie ein Laptop (MacBook Air) für die Ausspielung der Musik und des Podcast über die Kopfhörer. Die Ausspielung der Musik und des Podcast erfolgte mit REAPER, die Einstellung der PLLs durch die Proband:innen erfolgte mittels lauter/leiser-Tasten an einem Streamdeck-Controller, ähnlich wie bei einem Smartphone. Abbildung 10 zeigt den Aufbau schematisch. Der Controller war per MIDI einem Volume-Plugin in REAPER zugewiesen, der Pegel konnte in 3 dB Schritten über einen Bereich von -45 dB bis 0 dB angepasst werden. Dieser Pegel wird im Folgenden als L_{DAW} bezeichnet.

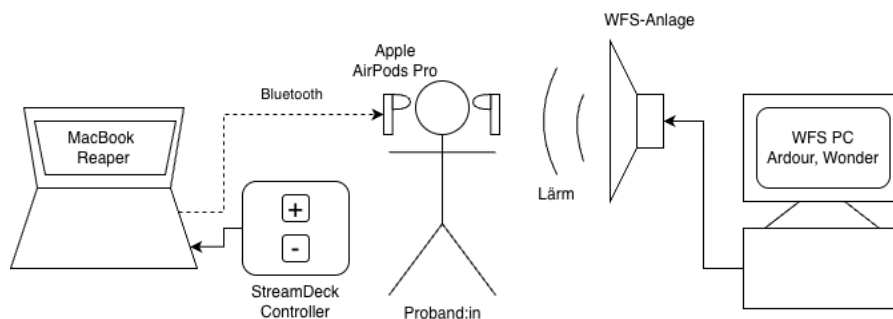


Abbildung 8 - Aufbau des Hörversuchs
Quelle: Eigene Darstellung

In einem Vorversuch wurden verschiedene Schrittgrößen und Wertebereiche getestet, der Wert von 3 dB wurde gewählt, da hier der wahrgenommene Unterschied zwischen zwei Stufen merklich, aber nicht zu sprunghaft war. Den Wertebereich wurde definiert, indem zunächst bei $L_{DAW} = 0\text{ dB}$ die Ausgangslautstärke des Laptops schrittweise erhöht wurde – bei 75% war es nach meinem Empfinden deutlich zu laut. Den unteren Wert wurde festgelegt, indem L_{DAW} reduziert wurde, bis es nach meinem Empfinden deutlich zu leise war.

Die Einstellungen der Proband:innen wurden auf einer Automationsspur in REAPER aufgezeichnet. Die Einstellung war für die Proband:innen nicht einsehbar. Aus den Werten der Automationskurve wurde mit Hilfe der späteren Referenzmessungen der tatsächliche Schalldruckpegel im Verlauf eines Versuchsdurchgangs rechnerisch ermittelt.

Um Bias innerhalb der beiden Durchgänge des Hörversuchs zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der NC-Einstellungen abwechselnd geändert: Person 1 hörte im ersten Durchgang mit ausgeschaltetem NC (NC off), im zweiten Durchgang mit eingeschaltetem NC (NC on); Person 2 hörte erst mit NC on, dann NC off usw.

L_{DAW} wurde zu Beginn jedes Durchgangs auf -45 dB zurückgesetzt, um die Teilnehmenden zu ermutigen, den Pegel bis zum eigenen PLL zu erhöhen. Zwischen den Durchgängen wurde eine Pause von

etwa 3 Minuten gemacht, in der die Proband:innen die Kopfhörer aus den Ohren nehmen sollten und der Raum still war. Durch die Pause und das Zurücksetzen des Pegels wurde eine Gewöhnung an die vorher gewählte Einstellung vermindert, aufgrund von mangelnder Fachliteratur wurde die Länge der Pause selbst gewählt.

2.3 Messungen mit den Kopfhörern

Im Anschluss an die Hörversuche wurden mehrere Messungen mit den Apple AirPods Pro durchgeführt. Das Ziel war, Referenzschalldruckpegel für das Hörmaterial $L_{KH,ref}$ und die Lärmkulisse $L_{Lärm}$ im Gehörgang zu ermitteln, um in der Auswertung die PLLs als Schalldruckpegel betrachten zu können. Darüber hinaus wurden mehrere Messungen durchgeführt, um die Funktionsweise des Noise Cancelling messtechnisch zu erfassen.

Für die Messungen wurde der Neumann Kunstkopf KU100 genutzt. Durch die realistische Anatomie des Schädels und der Ohren konnten Messungen durchgeführt werden, die viele der akustischen Eigenschaften des menschlichen Hörens mit einbeziehen und belastbare Referenzwerte für die Ergebnisse der Hörversuche liefern.

Insgesamt wurden drei Arten von Messungen mit Kunstkopf und Kopfhörern durchgeführt:

- Messung der Wirkweise von NC: Der Kunstkopf wurde mit eingesetzten AirPods über einen Nahfeldmonitor (Neumann KH 310A) mit weißem und pinkem Rauschen beschallt und der Schalldruckpegel bei unterschiedlich NC-Einstellungen gemessen
- Messung des Schalldruckpegels der Lärmumgebung: Der Kunstkopf wurde mit eingesetzten AirPods in der WFS-Anlage positioniert und der Schalldruckpegel des Lärms bei unterschiedlichen NC-Einstellungen gemessen
- Messung des Referenzschalldruckpegels des Hörmaterials: Hier wurde der Schalldruckpegel gemessen, den die AirPods im Gehörgang verursachen. Die Messungen erfolgten bei $L_{DAW} = 0 \text{ dB}, -15 \text{ dB}, -30 \text{ dB}$

Das verwendete Messgerät war das NTI XL2, das Messsystem wurde vor den einzelnen Versuchen mit Pistonphon und Adapter bei einem Schalldruckpegel von 94 dB kalibriert. Der Pistonphonadapter verursacht eine Einfügedämpfung von 1,7 dB, dieser Wert wurde später bei der Auswertung der Ergebnisse als Korrekturfaktor berücksichtigt.

Alle Messungen wurden mehrfach wiederholt und die Kopfhörer dabei mehrfach neu eingesetzt, um Schwankungen durch den Sitz der AirPods in den Ohren zu berücksichtigen.

Alle Messungen wurden mit dem XL2 aufgezeichnet. Die Daten wurden zur Analyse mit Python konvertiert, ausgewertet und visualisiert.

3 Durchführung

3.1 Durchführung des Hörversuchs

Die Hörversuche wurden an zwei Tagen durchgeführt, insgesamt nahmen 13 Personen teil. Die Position der Proband:innen war mittig in der WFS-Anlage und im Sitzen (Abbildung 11). Bei den Versuchen waren nur die jeweilige Proband:in und ich anwesend. Während der laufenden Hörversuche war der Raum, mit Ausnahme der Lärmkulisse, still.

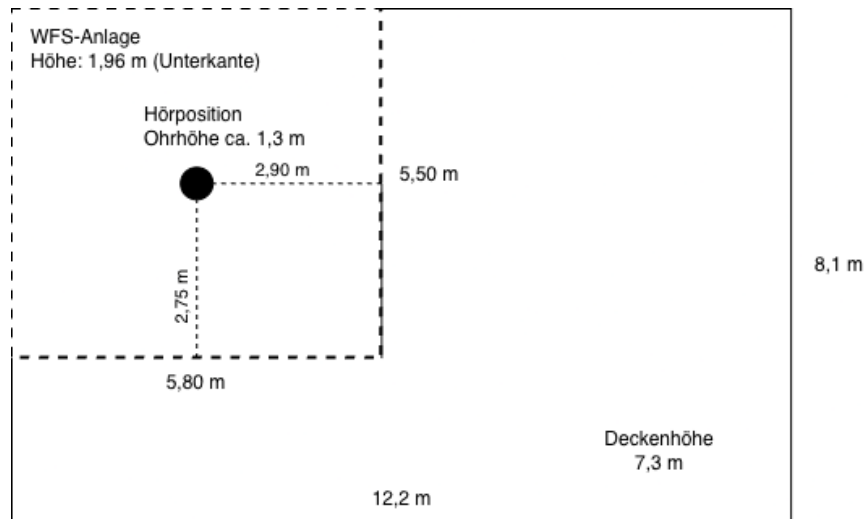


Abbildung 9 - Position der Proband:innen beim Hörversuch
Quelle: Eigene Darstellung

Zu Beginn wurde der Ablauf des Versuchs erklärt und die Anweisung gegeben, die Lautstärke mit dem Controller nach den eigenen Vorlieben einzustellen. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Musik zu Beginn jedes Durchlaufs sehr leise war und der Pegel wahrscheinlich erhöht werden müsse. Die Forschungsfrage bzw. das Ziel des Hörversuchs wurden nicht erläutert.

Die Proband:innen wurden angewiesen, die Kopfhörer einzusetzen und dabei sicherzustellen, dass diese gut in den Ohren sitzen. Die Kopfhörer waren zunächst mit den mittleren Aufsätzen bestückt, bei Bedarf wurden diese gegen die größeren oder kleineren getauscht. Die NC-Einstellung wurde am per Bluetooth gekoppelten MacBook vorgenommen, ebenso wurde zu Beginn jedes Durchgangs sichergestellt, dass die Ausgangslautstärke am Mac 75% war.

Die Wiedergabe der Audiosysteme wurde synchronisiert, indem am MacBook und am WFS-PC gleichzeitig „Play“ gedrückt wurde. Die Aufzeichnung der Automation startete automatisch mit der Wiedergabe. Einstellung bzw. Automationskurve waren für die Proband:innen nicht einsehbar.

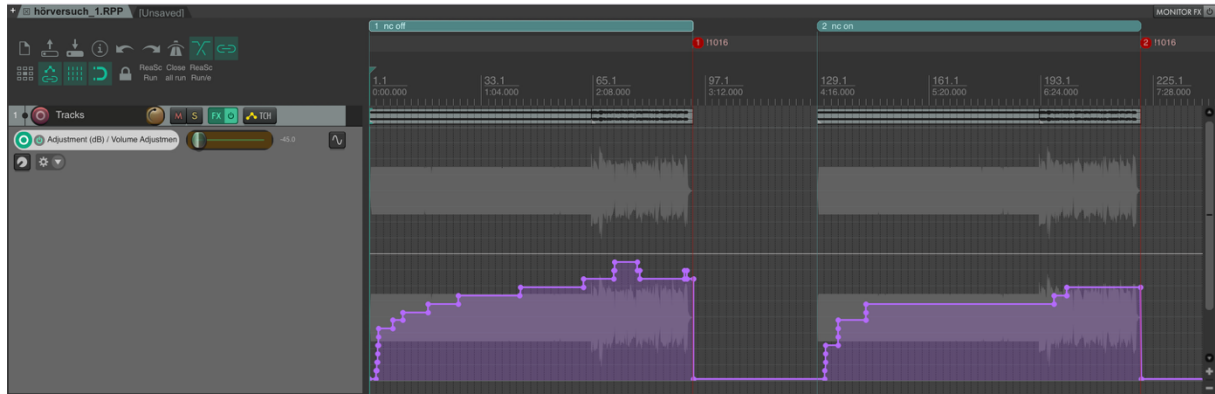


Abbildung 10 - Reaper-Projekt mit aufgezeichneter Volume-Automation
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 12 zeigt das Reaper-Projekt mit den aufgenommenen Automationskurven aus beiden Versuchsdurchgängen von Proband:in 1, die Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer:innen wurden in separaten Projekten gespeichert. Die Werte der Automationsspuren wurden im Anschluss an die Hörversuche mit Hilfe eines ReaScripts als Textdateien exportiert, die Automationskurve wurde dabei in einem Intervall von $T = 1 \text{ s}$ abgetastet.

Die AirPods wurden nach jedem Hörversuch mit Desinfektionstüchern gereinigt, um eine etwaige Keimübertragung zu verhindern.

3.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden im Tonlabor, Regie 4 (Referenzpegelmessung Hörmaterial und Wirkweise NC) und in Studio 4 (Referenzpegelmessung Lärm) und durchgeführt. Alle Messungen erfolgten für den rechten Ohrkanal, aufgrund der Symmetrie von Kunstkopf und Kopfhörern wird angenommen, dass Ergebnisse mit dem linken Kanal identisch wären.

In der Vorbereitung zu den Messungen wurde das System von KU100 und NTI XL2 kalibriert, bzw. die Kalibrierung überprüft. Hierzu war es nötig, den Kunstkopf zu öffnen, den Ohraufsatz abzuziehen und den Kalibrator auf den Ansatz des Ohrkanals zu stecken. Abbildung 13 zeigt diesen Vorgang.



Abbildung 11 - Kalibrierung des Messsystems
Quelle: Eigene Darstellung

Zuerst wurden die Messungen in der WFS-Anlage durchgeführt. Der Kunstkopf wurde dazu an der Position des Hörversuchs auf einem Mikrofonstativ aufgebaut, die Höhe wurde so eingestellt, dass der Eingang des Gehörgangs in einer Höhe von 1,30 m war. Abbildung 14 zeigt den Aufbau des KU100 mit AirPods in der WFS-Anlage.

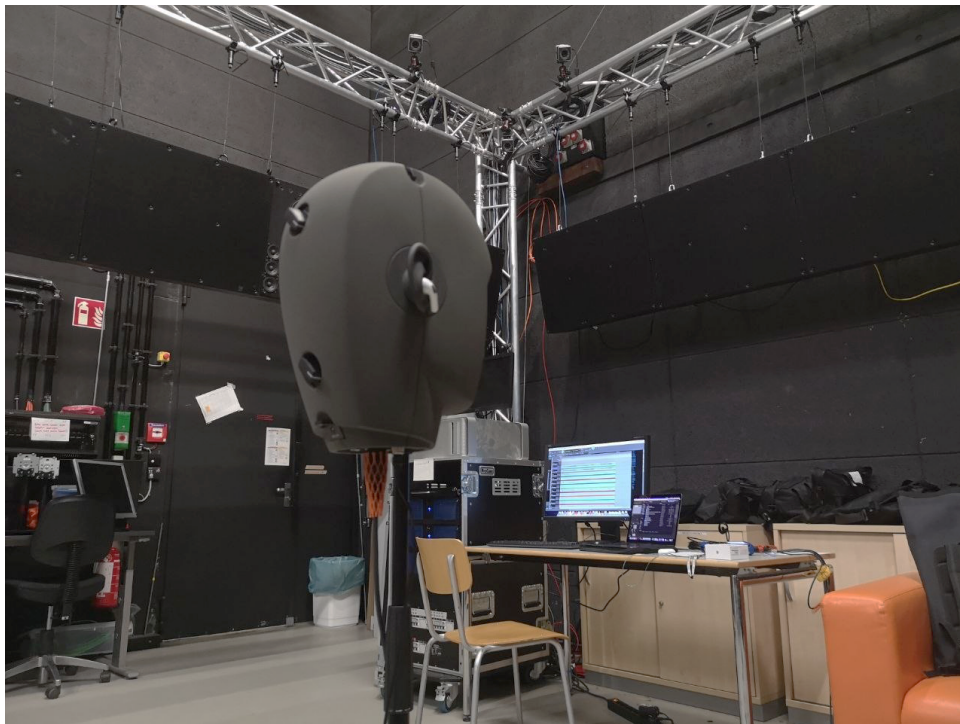


Abbildung 12 - KU100 in der WFS-Anlage
Quelle: Eigene Darstellung

Die Apple AirPods Pro wurden mit kleinem Aufsatz ins Ohr gesetzt und die Lärmkulisse über die WFS-Anlage abgespielt, es wurde kein Material über die Kopfhörer wiedergegeben. Es wurden drei Messdurchgänge gemacht, bei denen die Kopfhörer zu Beginn neu eingesetzt und je eine Messung mit und ohne NC gemacht wurde. In jeder Einzelmessung wurde die Lärmkulisse in der vollen Länge von 3:05 min abgespielt. Zusätzlich wurden zwei Messungen mit Lärm aber ohne Kopfhörer gemacht.

Hierbei wurde – entgegen meiner Erwartung – zunächst keine signifikante Reduktion des Schalldruckpegels bei aktivierten NC gemessen. Der Sitz der Kopfhörer wurde erneut kontrolliert; dabei zeigte sich, dass keine der Silikonaufsätze der AirPods den Ohrkanal des KU100 komplett abschlossen. Um ein gutes Abschießen zu erreichen, wurde zusätzlich zum Kopfhörer ein Gehörschutz-Ohrstöpsel (Ohropax) unterhalb des Tragus in das Ohr gesetzt, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Der Ohropax saß dabei zwischen AirPod und Ohrmuschel, der Kopfhörer war mit dem kleinen Aufsatz bestückt.



Abbildung 13 - KU100 mit Apple AirPod Pro und Ohropax
Quelle: Eigene Darstellung

Die drei Messdurchgänge wurden wiederholt, Kopfhörer und Ohropax wurden zu jedem Durchgang neu eingesetzt. Alle folgenden Messungen wurden ebenfalls mit und ohne Ohropax durchgeführt, um den Einfluss der Passform auf die gemessenen Größen abschätzen zu können.

Die weiteren Messungen erfolgten im Tonlabor, Regie 4. Dort wurde der Kunstkopf auf einem Mikrofonstativ in einer Höhe von 1,30 m (Boden – Eingang Gehörgang) aufgebaut. Ein Neumann KH310A Nahfeldmonitor (aktiv) war in einem Abstand von 1,00 m (Frontpanel Monitor – Ohr) auf Ohrhöhe, 90° rechts aufgebaut, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.



Abbildung 14 - Aufbau KU100 Regie 4
Quelle: Eigene Darstellung

Die Messung des Referenzschalldruckpegels (Musik & Podcast) wurde in ruhiger Umgebung durchgeführt, $L_{Raum,A} < 33 \text{ dB(A)}$. NC war deaktiviert. In jeder Messung wurde das komplette Material in einer Länge von 3:05 min wiedergegeben und der Schalldruckpegel mit dem Messgerät über diesen Zeitraum aufgezeichnet. Die Messung erfolgte sechsmal bei $L_{DAW} = 0 \text{ dB}$ (davon zweimal mit Ohropax, KH immer neu eingesetzt), zweimal bei $L_{DAW} = -15 \text{ dB}$ (einmal mit und einmal ohne Ohropax) und einmal bei $L_{DAW} = -30 \text{ dB}$ (ohne Ohropax).

Schließlich wurde mit dem gleichen Messaufbau die Wirkweise des NC gemessen. Dazu wurde der Kunstkopf mit dem Nahfeldmonitor mit weißem und pinkem Rauschen beschallt und der Schalldruck mit NC, ohne NC sowie ganz ohne Kopfhörer gemessen. Es wurde dabei nichts über die AirPods wiedergegeben. Die Rauschsignale wurden mit Room EQ Wizard erzeugt, mit einem RME Fireface UC gewandelt und direkt auf den Monitor gegeben. Die Rauschsignale wurden in Room EQ Wizard so gepegelt, sodass am Messgerät ein Wert von 75 dB(A) (ohne Korrekturfaktor) abgelesen wurde. Zusätzlich wurde mit weißem Rauschen bei 85 dB(A) (Ablesewert, keine Korrektur) gemessen. Insgesamt wurden 14 Messungen mit pinkem Rauschen (dreimal NC on/off mit und ohne Ohropax, zweimal ohne KH) und 28 Messungen mit weißem Rauschen (gleiche Verteilung wie mit pinkem Rauschen + Wiederholung bei 85 dB(A)) mit Messdauern zwischen 5 s und 10 s durchgeführt, die unterschiedlichen Messdauern wurden in der Auswertung berücksichtigt.

4 Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse aus den verschiedenen Versuchen und Messungen wird im Folgenden schrittweise dargestellt: Zunächst wird die Wirksamkeit des Noise Cancelling anhand der Ergebnisse der Messungen mit Rauschen betrachtet, dann die Messergebnisse die Ergebnisse der Messung mit der WFS-Anlage ($L_{\text{Lärm}}$). Danach werden die Ergebnisse des Hörversuchs (L_{DAW}) betrachtet und mit dem Referenzschalldruckpegel des Hörmaterial in Bezug gesetzt (L_{KH}). Bei der kombinierten Betrachtung werden Schalldruckpegel von Musik/Podcast und Lärm überlagert, um den summierten Schalldruckpegel abschätzen zu können (L_{total}). Schließlich werden die Fragebögen mit einbezogen.

Bei der Betrachtung und Auswertung wurden an mehreren Stellen Mittelwerte gebildet. Bei der Bestimmung dieser Mittelwerte wurde eine Fallunterscheidung gemacht, abhängig von gemessener und zu bestimmender Größe sowie der zu treffenden Aussage bzw. Betrachtungsweise :

Bei der Bewertung von wiederholten Messungen der gleichen Größe wurde mit dem arithmetischen Mittel der Pegel gearbeitet. Dieser Ansatz beruht auf den Annahmen, dass die gemessenen Pegel annähernd normalverteilt und die Abweichungen vom Mittelwert systematisch sind. Da bei solchen Messungen i.d.R. nur drei Wiederholungen durchgeführt wurden, kann diese Annahme nur bedingt belegt werden. In dieser Arbeit werden speziell auch die Standardabweichungen von diesen Mittelwerten betrachtet, da diese in Bezug auf einige der gemessenen Größen wichtige Aussagen liefern.

Äquivalente Dauerschallpegel hingegen wurden über den arithmetischen Mittelwert der Schallintensitäten bestimmt. Dieser Ansatz wurde u.a. gewählt, um L_{eq} der einzelnen Versuchsdurchgänge aus den Werten der einzelnen Messintervallen zu ermitteln. Im Allgemeinen wird hierbei keine Standardabweichung angegeben, Angaben von Standardabweichungen von L_{eq} sind in dieser Arbeit Fortführungen der Standardabweichungen von Referenzmessungen.

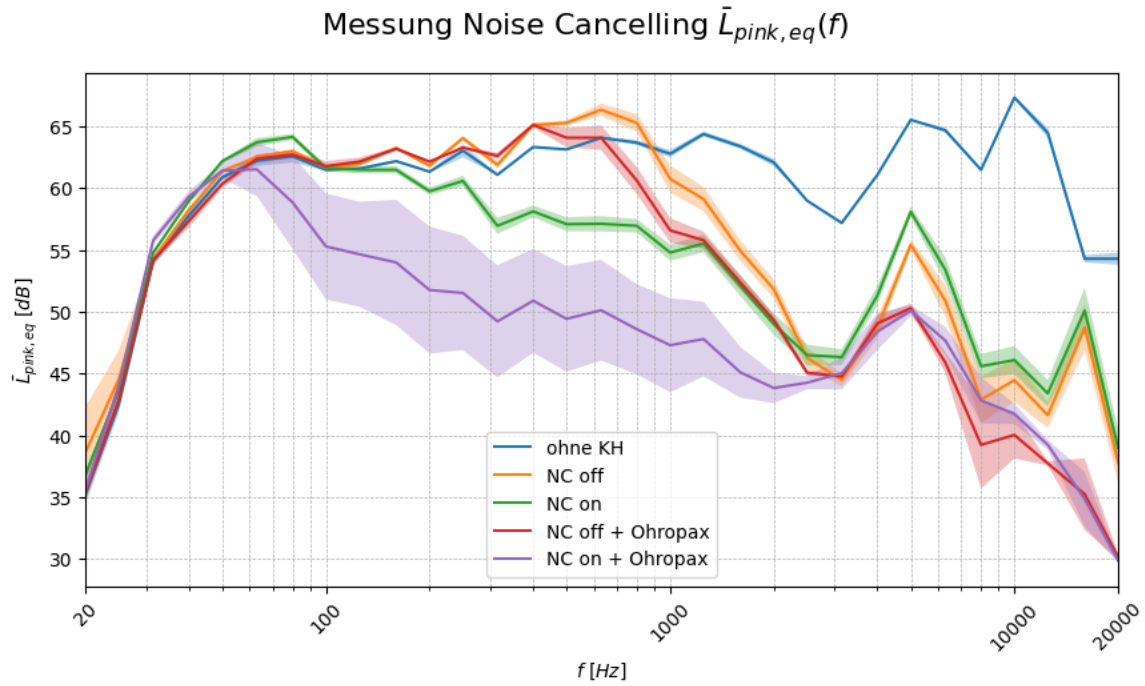


Abbildung 15 - Ergebnisse der NC-Messungen mit Pinkem Rauschen
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Messungen, die mit KU100, AirPods und pinkem Rauschen durchgeführt wurden. Dargestellt sind der gemittelte äquivalente Dauerschallpegel für jedes Frequenzband der Terzbandanalyse $\bar{L}_{eq}(f)$ sowie die Standardabweichung als Band um den Graphen. Zur Bestimmung der Mittelwerte und Standardabweichung wurden $L_{eq,i}(f)$ und $\sigma L_{eq}(f)$ von jeweils drei Messungen nach Formel 2 und Formel 3 berechnet.

$$\bar{L}_{eq}(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{eq,i}(f) \quad (2)$$

Formel 2 - Berechnung von $\bar{L}_{eq}$ als Mittelung von Stichprobenergebnissen

$$\sigma L_{eq}(f) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_{eq,i}(f) - \bar{L}_{eq}(f))^2} \quad (3)$$

Formel 3 - Berechnung der Standardabweichung $\sigma L_{eq}(f)$

Die Graphen zeigen, wie der Schalldruckpegel einzelner Frequenzbänder durch die Kopfhörer unter unterschiedlichen Bedingungen verringert wird. Als Referenz dienen hier die Messungen ohne AirPods (blaue Kurve), deren Verlauf entspricht weitgehend der HRTF⁹ des KU100 für den Fall $\theta = 90^\circ$.

In allen Messungen mit AirPods wurde im Mitten- und Höhenbereich ab etwa 1 kHz eine signifikante Reduktion des Schalldruckpegels gemessen, die in erster Linie auf die passive Dämpfung durch die Kopfhörer zurückzuführen ist – NC aktiviert oder deaktiviert hatte im Vergleich einen geringen Einfluss. Bei etwa 5 kHz und in geringerem Maße auch darüber ist in den Messungen ohne Ohropax eine Erhöhung relativ zu den Messungen mit Ohropax zu erkennen. Es wird vermutet, dass dies damit zusammenhängt, dass die AirPods den Gehörgang nicht richtig abschlossen und einen kleinen Spalt ließen, hier konnten hohe Frequenzen mit geringerer Dämpfung in den Gehörgang gelangen.

Die Funktionsweise des Noise Cancelling wird jedoch bei tieferen Frequenzen deutlich – hier kann auch der große Einfluss der Passgenauigkeit der Kopfhörer betrachtet werden. Die Messungen ohne NC zeigen bis ca. 700 Hz keine erhebliche Reduktion bzw. sogar eine leichte Erhöhung des Schalldrucks bis zu etwa 2 dB. Eine Aussage über den Ursprung dieser Überhöhung kann mit den vorliegenden Messergebnissen nicht gemacht werden und es wurde nicht weiter untersucht.

Bei den Messungen mit NC wurde der Schalldruckpegel im gleichen Frequenzbereich deutlich reduziert. Ohne Ohropax wird bei ca. 600 Hz die maximale Dämpfung von etwa 8 dB erreicht (gegenüber der Messung ohne KH), bis ca. 200 Hz ist die Dämpfung sehr gering. Mit Ohropax hingegen ist schon bei 80 Hz eine Dämpfung von ca. 3 dB festzustellen, bei 500 Hz ist die Dämpfung mit ca. 13 dB am höchsten.

Interessant ist, dass in den Messungen Frequenzen unterhalb von ca. 60 Hz unter allen Bedingungen nahezu unbeeinflusst bleiben. Ob auch dies durch mehr oder weniger gutes Abschließen der Gehörgänge bedingt ist oder auf sekundäre Übertragungswege, z.B. über den Schädel des KU100, zurückzuführen ist, kann nicht eindeutig gesagt werden.

Die systematische Abweichung der Messergebnisse mit Ohropax bei aktiviertem NC ist hoch, was nur verdeutlicht, wie sensibel das System auf Unterschiede der Passgenauigkeit der Kopfhörer reagiert. Abbildung 18 verdeutlicht dies mit den Ergebnissen der Messungen mit dem KU100 und der Lärmkulisie.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit weißem Rauschen bei 75 dB(A) und 85 dB(A) sind in Anhang 7.2 und bestätigen diese Ergebnisse.

⁹ Head Related Transfer Function: Kopfbezogene Übertragungsfunktion

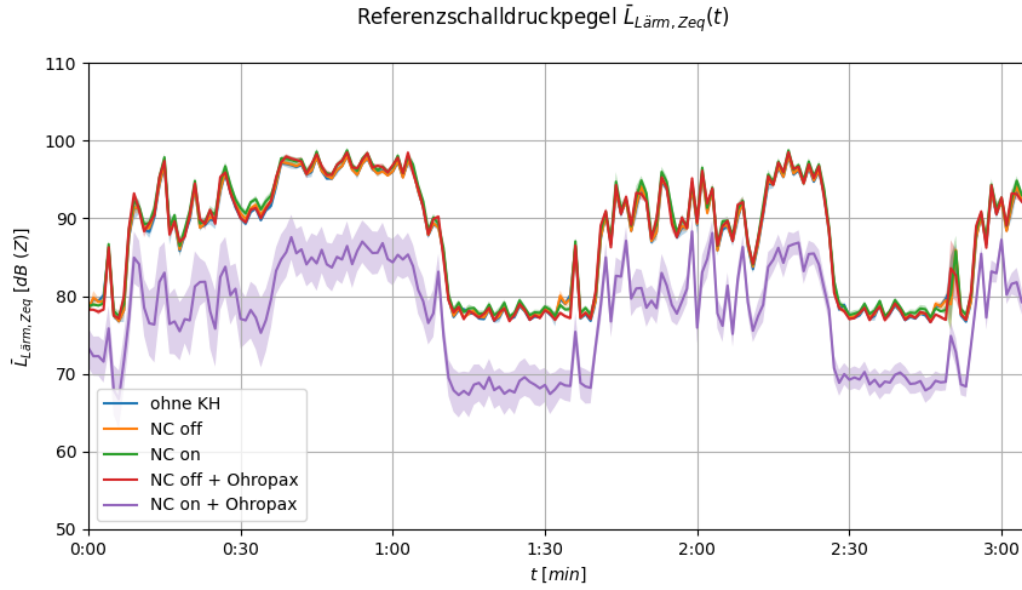


Abbildung 16 - Ergebnisse der Lärmpegelmessung mit KU100 und AirPods in der WFS
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 18 zeigt den Verlauf des gemittelten Schalldruckpegels der Lärmkulisse als $\bar{L}_{Lärm, Zeq, dt}(t)$, gemessen mit dem Kunstkopf und AirPods bei verschiedenen Einstellungen. Hierzu wurden Mittelwert und Standardabweichung der Pegel nach Formel 4 und Formel 5 gebildet.

$$\bar{L}_{Lärm, Zeq, dt}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Lärm, Zeq, dt, i}(t) \quad (4)$$

Formel 4 – Berechnung von $\bar{L}_{Lärm, Zeq, dt}$

$$\sigma_{L_{Lärm, Zeq, dt}}(t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_{Lärm, Zeq, dt, i}(t) - \bar{L}_{Lärm, Zeq, dt}(t))^2} \quad (5)$$

Formel 5 - Berechnung von $\sigma_{L_{Lärm, Zeq}}$

$L_{eq, dt}$ bezeichnet dabei den vom NTI XL2 bestimmten äquivalenten Dauerschallpegel jedes Messintervalls ($T = 1 s$), der mit A-, C- und Z-Gewichtung aufgezeichnet wird.

Aus den Dauerschallpegeln des gesamten Messzeitraums $L_{Lärm, eq, i}$ der wiederholten Messungen wurde nach Formel 6 der mittlere Dauerschallpegel der unterschiedlichen NC-Einstellungen mit A- und Z-Gewichtung ermittelt, Tabelle 2 stellt diese Ergebnisse dar.

$$\bar{L}_{Lärm, eq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Lärm, eq, i} \quad (6)$$

Formel 6 - Berechnung von $\bar{L}_{Lärm, eq}$

Tabelle 2 – gemittelte Messergebnisse $L_{Lärm,eq}$
 Quelle: Eigene Darstellung

Setting	$L_{Lärm,Aeq} [dB(A)]$	$L_{Lärm,Zeq} [dB(Z)]$
ohne KH	$72,6 \pm 0,3$	$91,7 \pm 0,1$
NC off	$72,4 \pm 0,4$	$91,8 \pm 0,2$
NC on	$70,9 \pm 1,0$	$92,4 \pm 0,4$
NC off + Ohropax	$70,6 \pm 0,8$	$92,2 \pm 0,2$
NC on + Ohropax	$56,8 \pm 2,4$	$81,4 \pm 2,4$

Zu erkennen ist, dass nur mit aktiviertem NC und eingesetztem Ohropax eine signifikante Reduktion des Schalldruckpegels gemessen wurde. Unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften der Lärmkulissee (Abbildung 7) und der Ergebnisse der Messungen mit pinkem Rauschen (Abbildung 17) kann das erklärt werden: Die Lärmkulissee hat stark betonte (Sub)-Bässe – die AirPods erreichen in dem Frequenzbereich nur mit Ohropax und eingeschaltetem NC eine signifikante Dämpfung. Die höhere Dämpfung der Mitten und Höhen bei den anderen Einstellungen fällt im Fall der Lärmkulissee weniger ins Gewicht.

Auch bei diesen Messungen war die Streuung der Schalldruckpegelwerte bei NC und Ohropax erheblich.

Als nächstes werden die PLLs betrachtet, zunächst als $L_{DAW}(t)$.

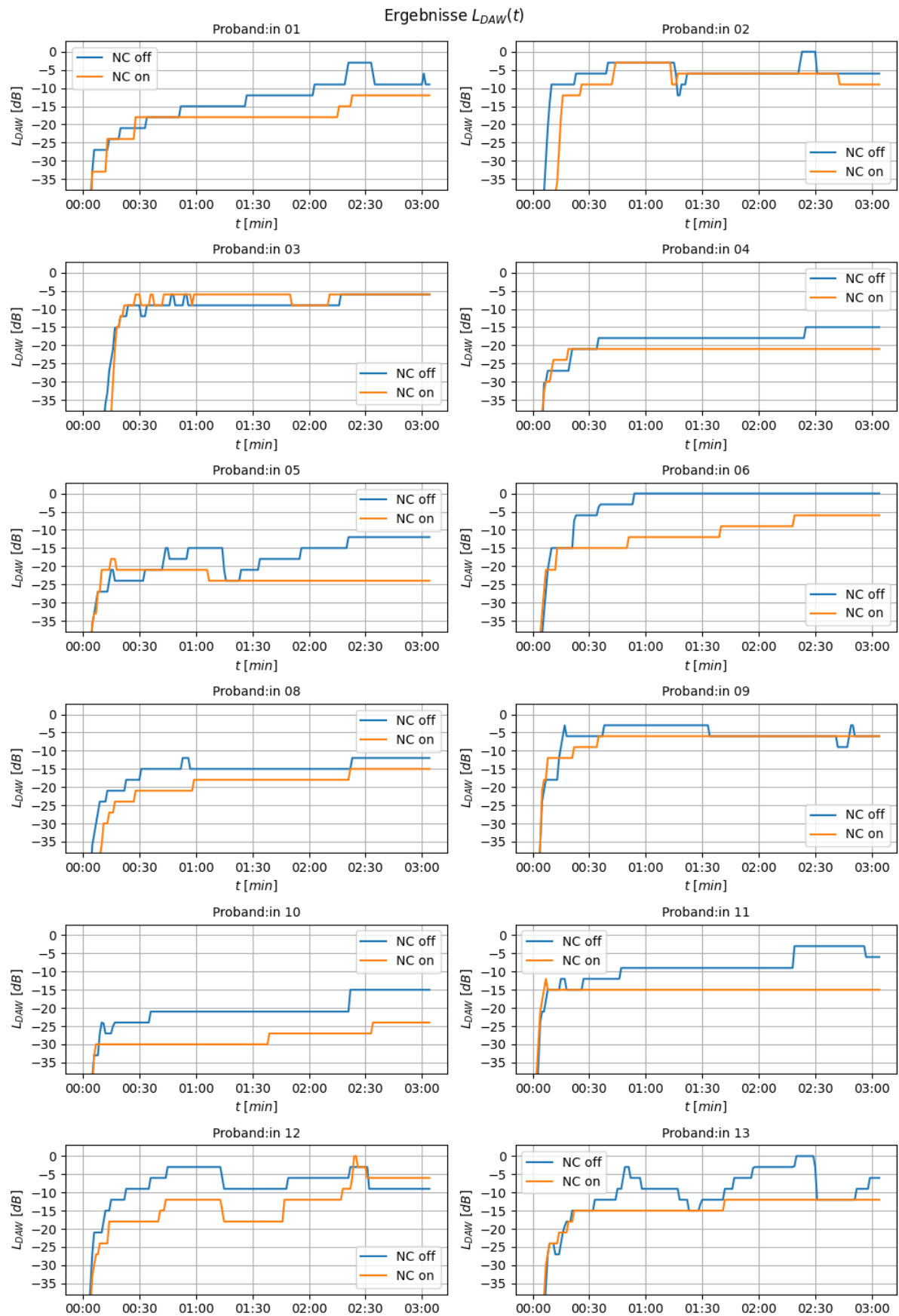


Abbildung 17 - Ergebnisse aller Hörversuche als L_{DAW}
 Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19 zeigt die PLLs aller Proband:innen für beide Versuchsdurchgänge als $L_{DAW}(t)$, das Ergebnis von Proband:in 7 ist nicht enthalten und stattdessen in Abbildung 20 dargestellt.

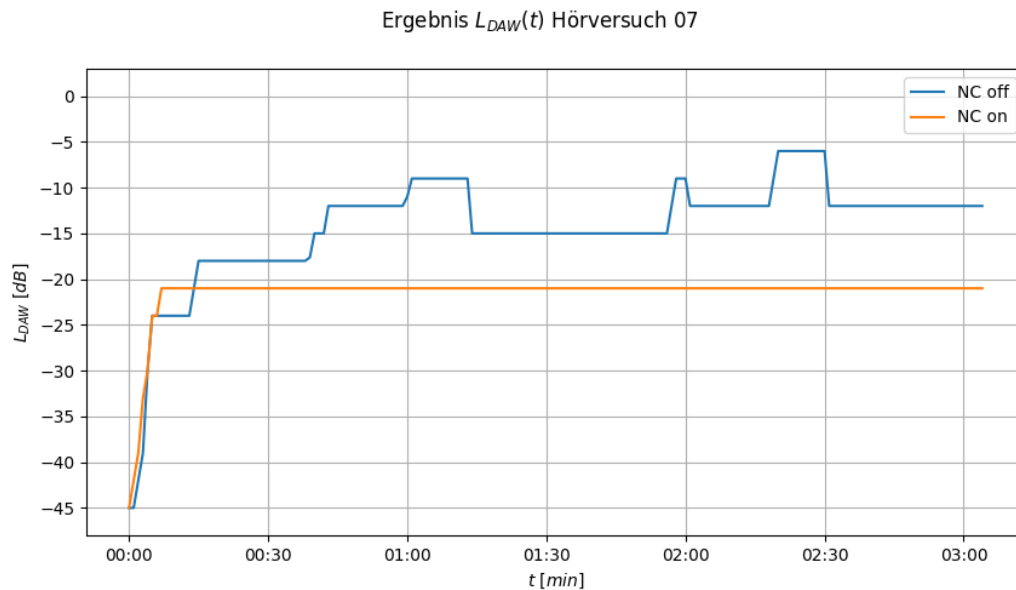


Abbildung 18 - Ergebnis $L_{DAW}(t)$ Proband:in 7
Quelle: Eigene Darstellung

$L_{DAW}(t)$ von Proband:in 7 wird im Folgenden exemplarisch betrachtet. Im ersten Durchgang des Hörversuchs war NC aus und wurde im zweiten Durchgang eingeschaltet.

Hier ist zu erkennen, dass das aktivierte NC bei Proband:in 7 mit einer Reduktion des Pegels über weite Teile des Hörversuchs einherging. Besonders auffällig ist, dass die Person bei aktivierter Geräuschunterdrückung den Pegel im Laufe des Versuchs nicht mehr veränderte; ohne NC fanden mehrere Anpassungen statt, bei denen der Pegel über kürzere Zeiträume angehoben wurde. Markante Stellen sind zwischen ca. 0:40 min und 1:15 min sowie 2:20 min und 2:30 min – in der Lärmkulisse fuhr der synthetische Bus in diesen Zeiträumen über Kopfsteinpflaster, der Schalldruckpegel des Lärms war dabei sehr hoch (siehe Abbildung 7). Das Preferred Listening Level von Proband:in 7 war hier ohne NC bis zu 12 dB bzw. 15 dB höher.

Einige der anderen Proband:innen zeigten ein ähnliches Verhalten, bei dem das PLL bei hohem Lärmpegel entsprechend angepasst wurde (1, 2, 5, 12, 13), andere wählten generell einen höheren Pegel (4, 6, 8, 10, 11). In vielen Fällen ist auch zu sehen, dass bei aktiviertem NC der Pegel nur wenig oder gar nicht geändert wurde, ohne NC hingegen schon (4, 5, 9, 11, 13).

Zwei der Proband:innen fallen dadurch auf, dass die PLLs in beiden Durchgängen gleich waren, bzw. mit NC ein leicht höherer Pegel gewählt wurde. Dies wird im weiteren Verlauf der Auswertung diskutiert.

Im nächsten Schritt werden die PLLs als Schalldruckpegel der Kopfhörer L_{KH} betrachtet. Hierzu war es nötig, zunächst den Referenzschalldruckpegel $L_{KH,ref}$ aus den Messergebnissen zu bestimmen.

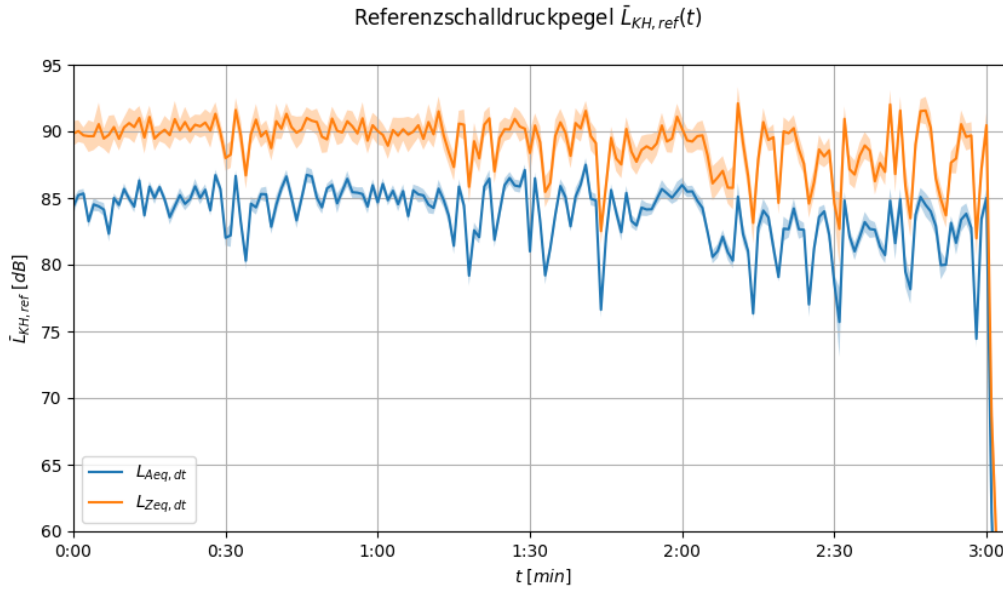


Abbildung 19 - Referenzschalldruckpegel $L_{KH,ref}$ bei $L_{DAW} = 0 \text{ dB}$

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 21 zeigt den Verlauf von $\bar{L}_{KH,ref}(t)$ mit A- und Z-Gewichtung, die Standardabweichung ist als Band dargestellt. Hierzu wurde aus fünf Referenzpegelmessungen Mittelwert und Standardabweichung von $L_{eq,dt}(t)$ bei $L_{DAW} = 0 \text{ dB}$ gebildet (KU100 und AirPods, dreimal ohne und zweimal mit Ohropax). Die Berechnung erfolgte wie bei der vorherigen Mittelung der Lärmpegel.

$$\bar{L}_{KH,ref}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{KH,ref,eq,\Delta t,i}(t) \quad (7)$$

Formel 7 - Berechnung von $\bar{L}_{KH,ref}(t)$ aus mehreren Messungen

$$\sigma L_{KH,ref}(t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_{KH,ref,eq,\Delta t,i}(t) - \bar{L}_{KH,ref}(t))^2} \quad (8)$$

Formel 8 - Berechnung der Standardabweichung $\sigma L_{KH,ref}$

Um sicher zu stellen, dass L_{DAW} und L_{KH} sich tatsächlich proportional verhalten, wurden auch die Ergebnisse der Messungen mit $L_{DAW} = -15 \text{ dB}$ und $L_{DAW} = -30 \text{ dB}$ betrachtet. Abbildung 22 zeigt $L_{KH}(t)$ bei $L_{DAW} = -30 \text{ dB}$ und bestätigt, dass die Proportionalität gegeben ist. Das Ergebnis der Messungen bei $L_{DAW} = -15 \text{ dB}$ ist in Anhang 7.3.

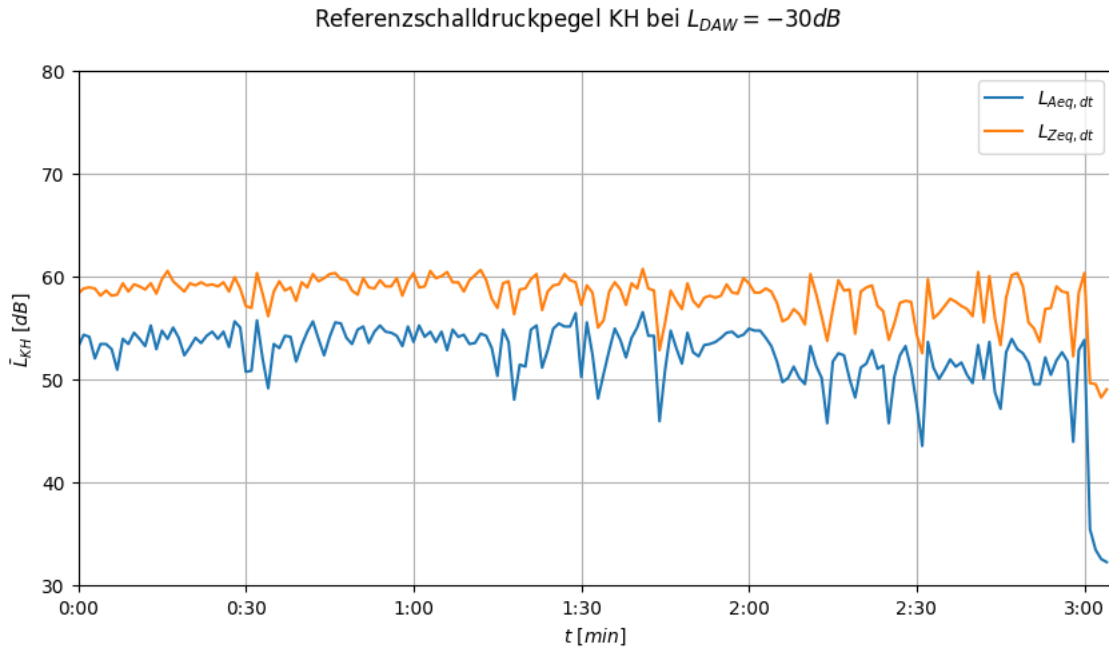


Abbildung 20 - L_{KH} bei $L_{DAW} = -30\text{ dB}$
 Quelle: Eigene Darstellung

Mit $\bar{L}_{KH,ref}$ als Referenzwert kann nach Formel 9 der tatsächliche Schalldruckpegel $L_{KH}(t)$ für die einzelnen Hörversuche bestimmt werden. Da L_{DAW} und L_{KH} proportional sind, geht mit einer Pegeländerung von L_{DAW} eine gleich große Pegeländerung von L_{KH} einher:

$$L_{KH}(t) = \bar{L}_{KH,ref}(t) - |L_{DAW}(t)| \quad (9)$$

Formel 9 - Berechnung von L_{KH}

Im Folgenden werden die ersten 20 s des Hörversuchs nicht mit einbezogen, da die Proband:innen den Pegel in dieser Zeit unterschiedlich schnell vom Startwert $L_{DAW,0} = -45\text{ dB}$ erhöhten.

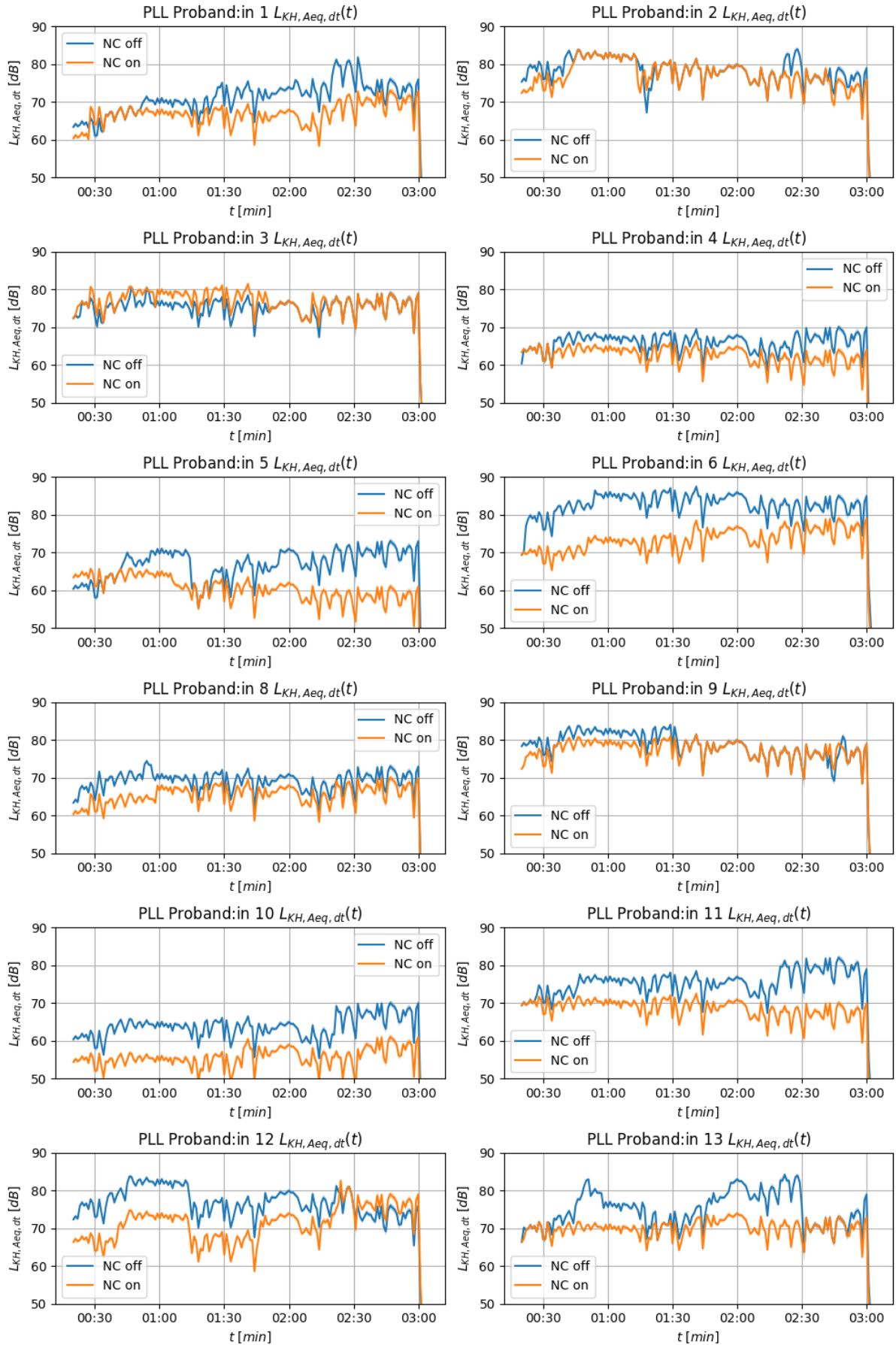


Abbildung 21 - PLLs als $L_{KH,Aeq,dt}(t)$
 Quelle: Eigene Darstellung

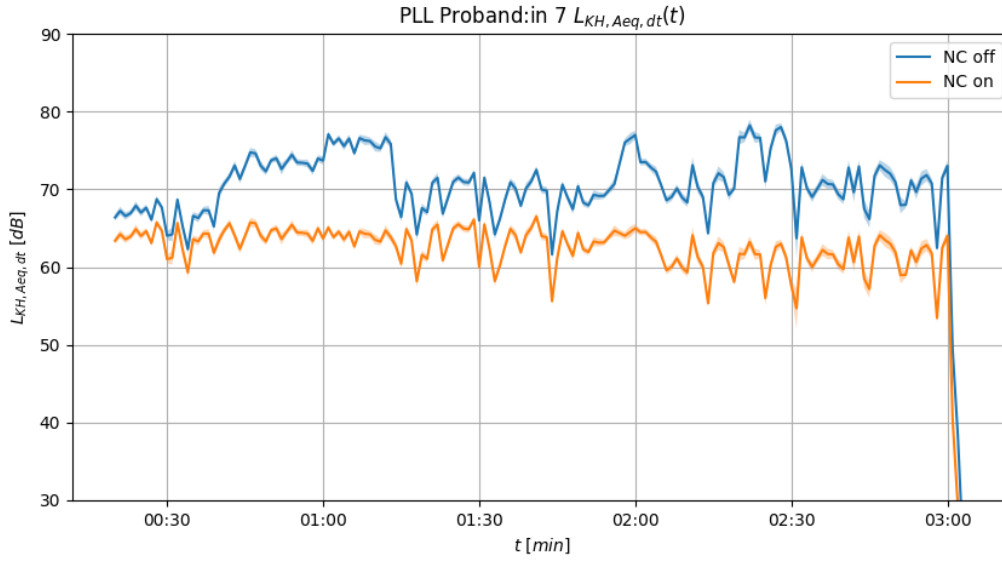


Abbildung 22 – PLL von Proband:in 7 als $L_{KH,Aeq,dt}(t)$

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 23 stellt die damit berechneten Schalldruckpegel als $L_{KH,Aeq,dt}(t)$ mit A-Gewichtung für die Fälle NC off und NC on dar, Abbildung 24 für Proband:in 7. Der Verlauf zeigt, dass bei aktivem NC ein konstanter Pegel von etwa 65 dB(A) gewählt wurde, die Ausschläge in der zweiten Hälfte des Hörversuchs sind auf die Dynamik des Musikstücks und v.a. des Podcasts mit natürlichen Gesprächspausen zurückzuführen. Der Durchgang ohne NC zeigt die gleiche Pegeldifferenz, die auch schon in Abbildung 20 zu erkennen war, hier wurde über weite Teile ein etwas höherer Pegel zwischen ca. 70 dB(A) und 75 dB(A) gewählt.

Mit den berechneten Werten kann nach Formel 10 der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} des gesamten Versuchsdurchgangs bestimmt werden.

$$L_{KH,eq} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{t=20}^{185} T_i * 10^{0,1 * L_{KH,eq,dt}(t)} \quad (10)$$

Formel 10 - Bestimmung von L_{eq} über den Messzeitraum

Dabei wurde nach Formel 11 die Standardabweichung von $\bar{L}_{KH,ref}$ mitgeführt.

$$\sigma L_{KH,eq} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{t=20}^{185} T_i * 10^{0,1 * \sigma L_{KH,ref}(t)} \quad (11)$$

Formel 11 - Fortpflanzung der Standardabweichung $\sigma L_{KH,eq}$

Tabelle 3 zeigt die so ermittelten äquivalenten Dauerschallpegel $L_{KH,Aeq}$ aus allen Hörversuchen für die Fälle NC on und NC off sowie die Differenz von beiden Durchgängen $\Delta L_{eq,NC\ on/off}$, bestimmt durch Formel 12.

$$\Delta L_{KH,Aeq,i} = L_{KH,Aeq,NC\ on,i} - L_{KH,Aeq,NC\ off,i} \quad (12)$$

Formel 12 - Berechnung von $\Delta L_{KH,Aeq}$

Tabelle 3 - $L_{KH,Aeq}$ aller Hörversuche
Quelle: Eigene Darstellung

Proband:in	$L_{KH,Aeq,NC\ off} [dB(A)]$	$L_{KH,Aeq,NC\ on} [dB(A)]$	$\Delta L_{KH,Aeq} [dB]$
1	$73,0 \pm 0,6$	$67,7 \pm 0,6$	$-5,3 \pm 1,2$
2	$79,4 \pm 0,6$	$78,5 \pm 0,6$	$-0,9 \pm 1,2$
3	$75,9 \pm 0,6$	$77,4 \pm 0,6$	$1,6 \pm 1,2$
4	$66,5 \pm 0,6$	$63,1 \pm 0,6$	$-3,4 \pm 1,2$
5	$68,2 \pm 0,6$	$61,4 \pm 0,6$	$-6,8 \pm 1,2$
6	$83,3 \pm 0,6$	$74,2 \pm 0,6$	$-9,0 \pm 1,2$
7	$72,1 \pm 0,6$	$63,1 \pm 0,6$	$-9,0 \pm 1,2$
8	$69,7 \pm 0,6$	$66,1 \pm 0,6$	$-3,6 \pm 1,2$
9	$79,6 \pm 0,6$	$77,8 \pm 0,6$	$-1,8 \pm 1,2$
10	$64,7 \pm 0,6$	$56,3 \pm 0,6$	$-8,4 \pm 1,2$
11	$76,5 \pm 0,6$	$69,1 \pm 0,6$	$-6,4 \pm 1,2$
12	$78,2 \pm 0,6$	$73,4 \pm 0,6$	$-4,8 \pm 1,2$
13	$77,1 \pm 0,6$	$70,5 \pm 0,6$	$-6,7 \pm 1,2$

Zu sehen ist, dass Noise Cancelling bei den meisten Proband:innen tatsächlich dazu beitrug, den Schalldruckpegel zu reduzieren: bei 10 der 13 Proband:innen war der äquivalente Dauerschallpegel des Hörmaterials bei aktivierter Geräuschunterdrückung mehr als 3 dB niedriger, davon in sechs Fällen mehr als 6 dB und in zwei Fällen sogar 9 dB. In drei Fällen war die Reduktion sehr gering, bzw. wurde von einer Person bei aktivem NC sogar eine höhere Einstellung gewählt.

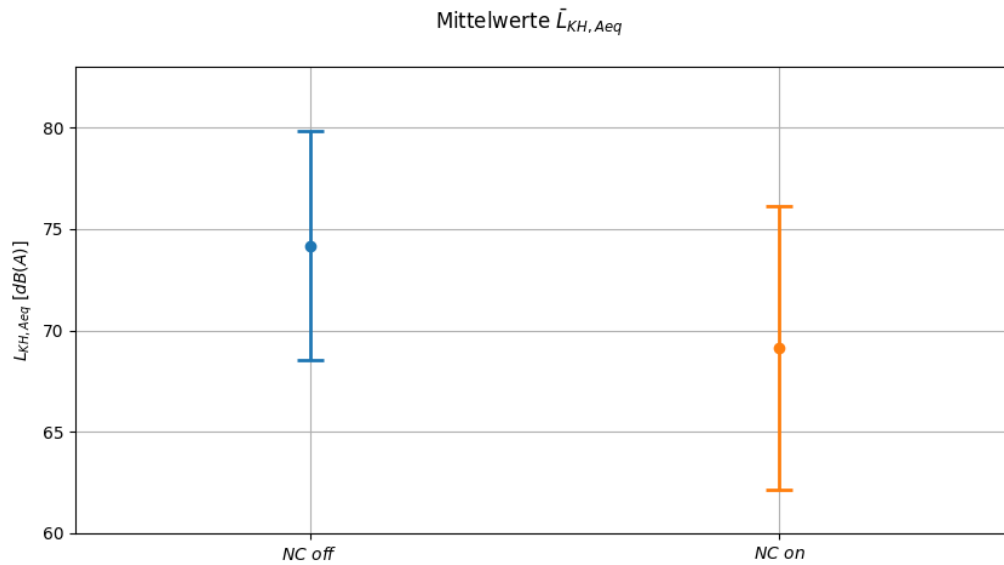


Abbildung 23 - Mittelwerte $\bar{L}_{KH}$
 Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 25 zeigt die Mittelwerte der PLLs als $\bar{L}_{KH,Aeq}$. Danach war der Schalldruckpegel:

- bei deaktiviertem NC $\bar{L}_{KH,Aeq,NC\ off} = 74,2 \pm 5,7\ dB(A)$
- bei aktiviertem NC $\bar{L}_{KH,Aeq,NC\ on} = 69,1 \pm 7,0\ dB(A)$

und die Mittelwert der Pegeländerung durch Aktivierung des NC $\bar{\Delta L}_{KH,Aeq} = -5,0 \pm 3,3\ dB$.

Der Wert von $\bar{\Delta L}_{KH,Aeq}$ bestätigt an dieser Stelle meine Hypothese, dass die Nutzung Noise Cancelling in einer lärmigen Umgebung dazu führt, die PLLs zu senken.

Anhand von L_{KH} und $L_{Lärm}$ kann im nächsten Schritt der summierte Schalldruckpegel L_{gesamt} nach Formel 13 bestimmt werden. L_{gesamt} wird dabei für jede Proband:in für beide Durchgänge als inkohärente Überlagerung von L_{KH} und $L_{Lärm}$ für die Fälle NC off und NC on betrachtet. Dabei wurde mit den Z-gewichteten Werten gerechnet, da die A-gewichteten Pegel hier aufgrund der großen spektralen Unterschiede zwischen Lärm und Hörmaterial das Ergebnis verfälschen könnten. Als Referenz für $L_{Lärm}$ wurde die Mittelung der Messungen mit AirPods und Ohropax gewählt, es wurde also vom Idealfall mit einer hohen Geräuschunterdrückung ausgegangen. Aufgrund der hohen Streuung durch die Unterschiede der Passform sind diese Werte jedoch nur als grobe Richtwerte zu betrachten.

$$L_{total,Zeq,dt}(t) = 10 * \log(10^{0,1*L_{KH,Zeq,dt}(t)} + 10^{0,1*L_{Lärm,Zeq,dt}(t)}) \quad (13)$$

Formel 13 - Berechnung von L_{total}

In Abbildung 26 ist $L_{total,Zeq,dt}(t)$ exemplarisch für Proband:in 7 dargestellt, die Ergebnisse der anderen Teilnehmer:innen sind in Abbildung 27. Auch hier wurde der äquivalente Dauerschallpegel $L_{total,Zeq}$ bestimmt und ist in Tabelle 4 aufgeführt, zudem wurde die Pegeldifferenz $\Delta L_{total,Zeq}$ bestimmt.

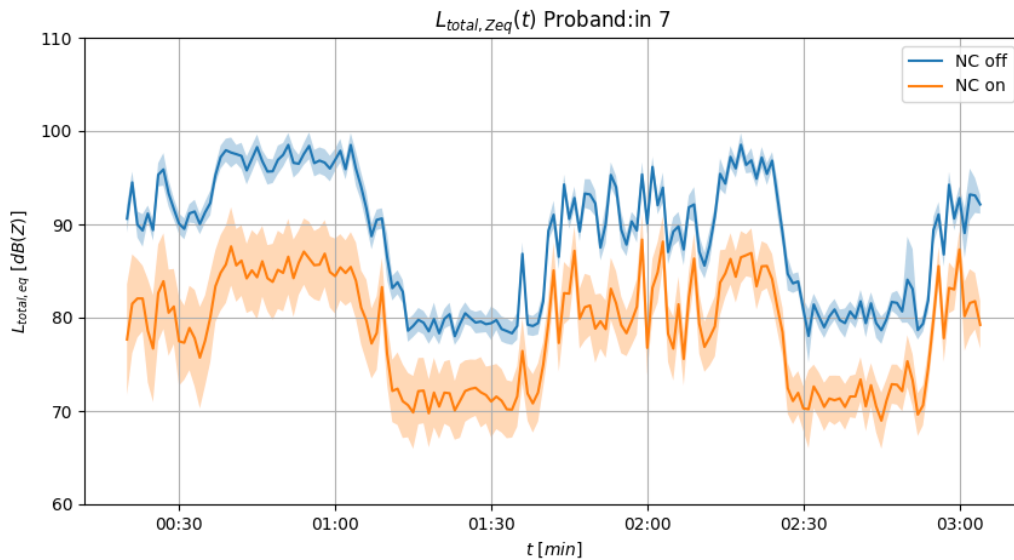


Abbildung 24 - $L_{total,Zeq,dt}(t)$ von Proband:in 7

Der Einfluss des NC auf L_{KH} und $L_{Lärm}$ führte bei Proband:in 7 dazu, dass $L_{total,Zeq}$ von 92,8 dB auf 82,0 dB reduziert wurde.

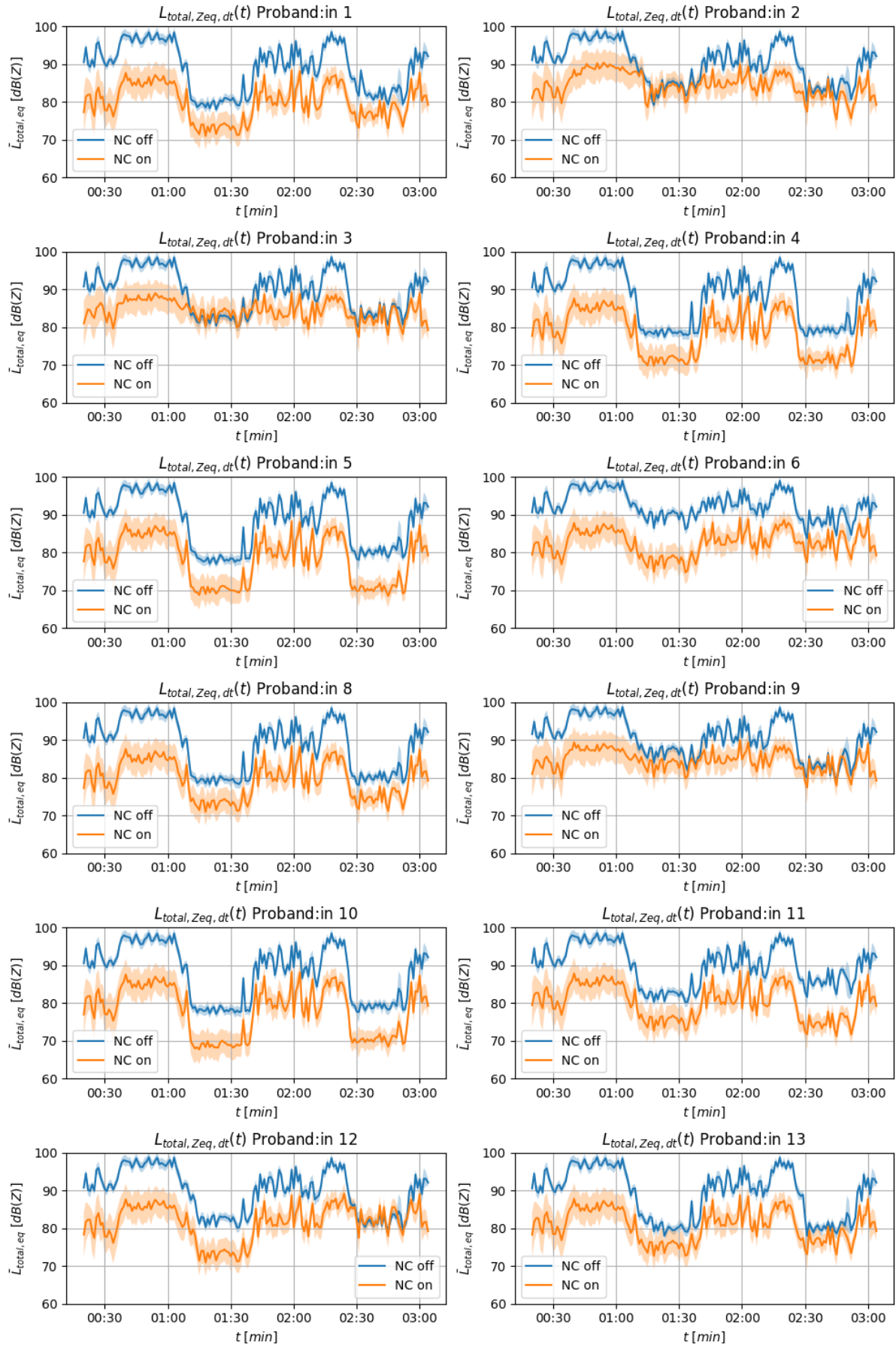


Abbildung 25 – Gesamtschallpegel $L_{total}(t)$

Tabelle 4 - Gesamtschallpegel $L_{total,Zeq}$ für die Fälle NC off und NC on

Proband:in	$L_{total,Zeq,NC\ off} [dB(Z)]$	$L_{total,Zeq,NC\ on} [dB(Z)]$	$\Delta L_{total,Zeq} [dB]$
1	$92,9 \pm 1,9$	$82,4 \pm 4,0$	$-10,5 \pm 5,9$
2	$93,3 \pm 1,9$	$85,8 \pm 4,0$	$-7,5 \pm 5,9$
3	$93,0 \pm 1,9$	$85,3 \pm 4,0$	$-7,7 \pm 5,9$
4	$92,7 \pm 1,9$	$82,0 \pm 4,0$	$-10,7 \pm 5,9$
5	$92,8 \pm 1,9$	$82,0 \pm 4,0$	$-10,8 \pm 5,9$
6	$94,1 \pm 1,9$	$83,9 \pm 4,0$	$-10,2 \pm 5,9$
7	$92,8 \pm 1,9$	$82,0 \pm 4,0$	$-10,8 \pm 5,9$
8	$92,8 \pm 1,9$	$82,2 \pm 4,0$	$-10,6 \pm 5,9$
9	$93,4 \pm 1,9$	$85,5 \pm 4,0$	$-7,9 \pm 5,9$
10	$92,7 \pm 1,9$	$81,9 \pm 4,0$	$-10,8 \pm 5,9$
11	$93,1 \pm 1,9$	$82,6 \pm 4,0$	$-10,5 \pm 5,9$
12	$93,2 \pm 1,9$	$83,6 \pm 4,0$	$-9,6 \pm 5,9$
13	$93,1 \pm 1,9$	$82,8 \pm 4,0$	$-10,3 \pm 5,9$

Aus den Daten ergeben sich die Mittelwerte:

- $\bar{L}_{total,Zeq,NC\ off} = 93,1 \pm 2,3\ dB(Z)$
- $\bar{L}_{total,Zeq,NC\ on} = 83,2 \pm 5,5\ dB(Z)$
- $\overline{\Delta L}_{total,Zeq} = -9,8 \pm 7,2\ dB$

Die mittlere Pegeldifferenz ist hier größer als bei der isolierten Betrachtung von L_{KH} , da hier auch die Pegelreduktion von $L_{Lärm}$ einfließt.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 ist zu erkennen, dass in beiden Fällen (NC off und NC on) der Einfluss von $L_{Lärm}$ auf L_{total} groß ist, der charakteristische Dynamikverlauf der Lärmkulisse ist in den Graphen zu erkennen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass der ungewichtete Lärmpegel nach den durchgeführten Messungen (Abbildung 18 und Tabelle 2) in vielen Fällen, besonders in den lauten Passagen der Lärmkulisse und ohne NC, höher war als L_{KH} . Bei eingeschaltetem NC sind die Dynamikunterschiede von L_{total} in vielen Fällen kleiner, besonders, wenn L_{KH} hoch war – hier war der Einfluss von $L_{Lärm}$ geringer.

Die Ergebnisse des Fragebogens in Tabelle 5 und Tabelle 6 ermöglichen, die Eindrücke der Proband:innen mit in die Bewertung einzubeziehen und hier ein genaueres Bild zu schaffen. Die freien Antworten der Fragen 5 und 6 sind hier zur besseren Darstellung nicht wortgetreu, aber sinngemäß wiedergegeben.

Tabelle 5 - Ergebnisse des Fragebogens Fragen 1 – 4

Proband:in	1. Wie war die Hörqualität der Musik?		2. Wie war die Hörqualität des Podcasts?		3. Wie hast du den Lärm wahrgenommen?		4. Ich habe mich mit der Eingestellten Lautstärke wohl gefühlt	
	NC off	NC on	NC off	NC on	NC off	NC on	NC off	NC on
	mittel	gut	mittel	gut	sehr störend	etwas störend	nein	ja
2	schlecht	gut	mittel	gut	störend	etwas störend	nein	nein
3	mittel	gut	gut	gut	störend	etwas störend	nein	ja
4	mittel	gut	mittel	gut	störend	kaum störend	ja	ja
5	mittel	sehr gut	gut	sehr gut	störend	etwas störend	ja	ja
6	schlecht	gut	mittel	gut	störend	kaum störend	unsicher	ja
7	gut	sehr gut	gut	sehr gut	etwas störend	kaum störend	ja	ja
8	mittel	gut	gut	gut	störend	störend	unsicher	ja
9	mittel	gut	gut	sehr gut	störend	kaum störend	ja	ja
10	gut	sehr gut	mittel	gut	etwas störend	kaum störend	unsicher	ja
11	mittel	sehr gut	gut	gut	etwas störend	nicht störend	ja	ja
12	schlecht	gut	schlecht	mittel	sehr störend	störend	nein	unsicher
13	mittel	sehr gut	mittel	sehr gut	sehr störend	kaum störend	unsicher	ja

Tabelle 6 - Ergebnisse des Fragebogens Frage 5 & 6

Proband:in	5. Welches Element des Hintergrundlärms war besonders störend?		6. Welches Element der Musik / des Podcasts war schwer zu hören?	
	NC off	NC on	NC off	NC on
1	Tiefe Freq., Signalton	Tiefe Freq. Signalton, Durchsage	Stimme (Podcast)	Gitarre (Musik), Stimme (Podcast)
2	Tiefe Freq.	Tiefe Freq.	alles außer Stimme / Gesang	Bass, hohe Freq.
3	Signalton	Tiefe Freq.	Bass	Hintergrundgeräusche (Podcast)
4	Tiefe Freq.	Signalton	Bass	Bass
5	Signalton, Tür	Tür, Tiefe Freq. (im Körper), Signalton	Instrumente, Feinheiten	k.A.
6	Tiefe Freq. Durchsage	Durchsage	k.A.	k.A.
7	Tiefe Freq.	Signalton, Durchsage	k.a	k.A.
8	Tiefe Freq.	Signalton, Stimmen	Schwer, sich zu konzentrieren	Stimme (Podcast)
9	Tiefe Freq.	Signalton	Bass	k.A.
10	Plötzliche Geräusche	Signalton	Stimme (Podcast), Bass	Stimme (Podcast)
11	Tiefe Freq., Signalton	Signalton	k.A.	k.A.
12	Tiefe Freq., Signalton	Tiefe Freq.	Bass, Stimme (Podcast)	Stimme (Podcast)
13	Tiefe Freq., Signalton	Signalton, Durchsage	k.A.	k.A.

Bei allen 13 Proband:innen sorgte eingeschaltetes NC für eine bessere Hörqualität der Musik und bei elf Proband:innen für eine bessere Hörqualität des Podcasts, die übrigen bewerteten die Qualität als gleichbleibend. Mit NC wurde das Hörerlebnis um durchschnittlich $1,5 \pm 0,5$ Stufen (Musik) bzw. $0,8 \pm 0,6$ Stufen (Podcast) besser bewertet.

Der Lärm wurde von 12 Personen als weniger störend empfunden und im Durchschnitt um $1,5 \pm 0,8$ Stufen weniger störend bewertet. Zehn Personen gaben an, dass ohne Noise Cancelling besonders die tieffrequenten Elemente des Lärms störten, mit NC fühlten sich davon nur noch fünf gestört – mehrere Personen teilten im Anschluss an den Hörversuch mündlich mit, dass die tiefen Frequenzen bei aktivierter Geräuschunterdrückung mehr gespürt als gehört wurden. Diese Aussage steht etwas im Widerspruch zu den Messungen (Abbildung 17), nach denen besonders tiefe Frequenzen, die als Vibrationen gespürt

werden können, durch NC wenig gedämpft werden. Ob hier psychoakustische Effekte bzw. die Hörkurve des Menschen oder Fehler in den Messungen für den augenscheinlichen Widerspruch sorgen, ist nicht bekannt.

Bei eingeschaltetem NC gaben elf Personen an, sich mit der gewählten Lautstärke wohl gefühlt zu haben (eine Person unsicher, eine Person unwohl), ohne NC waren es fünf. Vier Personen gaben an, sich mit der Lautstärke nicht wohl gefühlt zu haben.

Bei der gemeinsamen Betrachtung der Messergebnisse (Abbildung 17 und Abbildung 18) sowie Tabelle 3, Tabelle 5 und Tabelle 6 können Überlegungen zu den gemessenen PLLs sowie deren Streuung angestellt werden: vermutlich haben die AirPods nicht bei allen Proband:innen die Ohren gleich gut abgeschlossen, die Wirkung des NC war daher wahrscheinlich sehr unterschiedlich.

Einige der Extremfälle der PLLs, z.B. Proband:innen 2 und 3, legen im Kontext der Auswertung nahe, dass die Kopfhörer bei diesen Personen schlechter im Ohr saßen als bei anderen. Die PLLs wurden mit NC nur geringfügig niedriger bzw. sogar höher als ohne NC gewählt und beide gaben auch mit NC an, dass tiefe Frequenzen des Lärms als störend wahrgenommen wurden. Person 2 sagte außerdem, dass sie sich in beiden Durchläufen des Hörversuch mit dem gewählten PLL nicht wohl fühlte und dass bei aktiviertem NC hohe Frequenzen des Lärms störten – letzteres ist ein Hinweis darauf, dass mutmaßlich auch die passive Dämpfung durch die KH nicht hoch war.

Bei anderen Proband:innen, z.B. Person 6 und 7, sind die Ergebnisse sehr viel eindeutiger; die gewählten PLLs lagen mit NC jeweils 9 dB niedriger als ohne. Beide gaben an, dass die Hörqualität gleichzeitig verbessert wurde, und, dass beim Durchgang mit NC die tiefen Frequenzen als nicht bzw. weniger störend empfunden wurden. Dies legt nahe, dass die Passform der AirPods gut mit der Form der Ohren harmonierte und die Geräuschunterdrückung effektiv arbeitete.

Außerdem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass PLLs sehr individuell sind und von Dingen abhängen, die in dieser Arbeit nicht erfasst wurden. So sagten mehrere Proband:innen im Anschluss an den Hörversuch, dass z.B. der Lieblingssong i.d.R. etwas lauter gehört wird; andere gaben an, dass sie auch mit Noise Cancelling gerne etwas von der Umgebung wahrnehmen und daher meistens eher leise hören, wenn sie in der Öffentlichkeit sind.

Im Hörversuch hätte ein dritter Durchgang ohne Lärm bzw. in stiller Umgebung die Ergebnisse weiter schärfen können, da in diesem Fall die PLLs weitgehend ohne äußeres Einwirken gewählt worden wären.

Der Einfluss von NC auf PLLs wurden in mehreren Studien untersucht, welche ebenfalls zu dem Ergebnis kamen, dass NC dazu beiträgt, PLLs zu reduzieren. Einige dieser Studien stellten mit anderen Kopfhörerbauarten deutlich höhere PLLs fest, die PLLs von Ohrkanalhörern mit und ohne NC sind aber vergleichbar.

Es existieren mehrere Empfehlungen der WHO zur Belastung des Gehörs. Danach sollte die Belastung das Äquivalent von 40 h/Woche bei 80 dB(A) bzw. 8 h/Tag bei 85 dB(A) nicht überschreiten. Mit der Annahme, dass die Proband:innen regelmäßig und über längere Zeiträume unter Bedingungen, die mit denen des Hörversuchs vergleichbar sind, Musik hören, wurden diese Richtwerte bei isolierter Betrachtung der PLLs als $L_{KH,Aeq}$ nur in einem Fall überschritten.

Durch die gewählte Methode zur Bestimmung von L_{total} und die vergleichsweise hohe Unsicherheit kann dieser Pegel nicht eindeutig mit den Empfehlungen in Bezug gesetzt werden. Auch hier wurde aber eine Verminderung des Schalldruckpegels festgestellt, was bedeutet, dass das Gehör weniger belastet wurde.

Die Versuche bestätigen, dass durch die Nutzung von Noise Cancelling das PLL in der Mehrzahl der Fälle reduziert wird und sich gleichzeitig die subjektive Hörqualität verbessert. Die PLLs wurden jedoch auch ohne NC in fast allen Fällen so gewählt, dass eine Verminderung des Hörvermögens aufgrund von andauernder hoher Belastung unwahrscheinlich ist.

Die durchgeführten Messungen belegen, wie NC arbeitet, zeigen aber auch, wie sensibel Noise Cancelling Systeme sein können. Aus den Messungen geht hervor, dass im Falle von In-Ear Kopfhörern erst eine signifikante Geräuschreduktion eintritt, wenn die Kopfhörer bzw. Aufsätze den Gehörgang vollständig abschließen. In Bezug auf die Hörversuche stellt dieses Verhalten eine Unbekannte dar, doch die Versuchsergebnisse sprechen dafür, dass das NC in den meisten Fällen effektiv arbeiten konnte.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Hörversuchs zeigen in dieser Arbeit, dass Noise Cancelling durch den größeren Abstand von Stör- zu Nutzsignal in vielen Fällen eine Reduktion des Preferred Listening Levels ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Durchschnitt eine Reduktion des PLLs (betrachtet als L_{KH}) von $5,0 \pm 3,3$ dB erzielt wurde. Ohne Noise Cancelling lagen die PLLs bei $74,2 \pm 5,7$ dB(A), mit NC bei $69,1 \pm 7,0$ dB(A).

Das Sounddesign hatte dabei maßgeblich Einfluss auf die Realitätsnähe des Versuchs. Anhand von Referenzmessungen von realem Lärm, der bei mehreren Busfahrten gemessen und in der Zusammensetzung erfasst wurde, konnte eine künstliche Lärmumgebung erzeugt werden, die im Zusammenspiel mit der WFS-Anlage eine realistische Nachbildung darstellte. Mit verschiedenen Synthesetechniken wie Physical Modelling wurden dabei grundlegende Mechanismen von unterschiedlichen Lärmerzeugern näherungsweise simuliert, die bei der gemeinsamen Ausspielung zu einem immersiven Höreindruck führten. Durch die Auswahl der Klänge und gezieltes Arrangieren, besonders der Dynamik, konnten in der Auswertung des Hörversuchs die Reaktionen der Proband:innen auf einzelne dieser Klänge betrachtet und eingeordnet werden.

So wurden in vielen Versuchsdurchgängen mit NC die tieffrequenten Fahrtgeräusche als weniger störend empfunden, bei deaktiviertem NC ließ sich oft die eine Anpassung der PLLs an den momentanen Lärmpegel betrachten.

Die Messungen mit dem Neumann KU100 und den AirPods boten die Grundlage für eine nähere Betrachtung der Funktionsweise von NC. Die Ergebnisse der Messungen mit Testsignalen (pinkes Rauschen) zeigen, wie NC vornehmlich tiefe Frequenzen dämpft. Gleichzeitig wurde aus diesen Messungen deutlich, wie empfindlich NC gegenüber Abweichungen der Passgenauigkeit der Ohrhörer ist: Schließen diese nicht komplett ab, ist die Geräuschunterdrückung deutlich weniger effektiv.

Letzteres wurde erst im Anschluss an die Hörversuche festgestellt, es ist daher nicht bekannt, wie gut die Passform bei den einzelnen Proband:innen war. Die Ergebnisse der PLLs und der Fragebögen lassen aber zu, Abweichungen zu analysieren und einzuordnen. Danach ist davon auszugehen, dass die AirPods mutmaßlich bei mehreren Proband:innen nicht optimal im Ohr saßen und der Einfluss der aktiven Geräuschunterdrückung daher geringer war als bei anderen Proband:innen. Die Ergebnisse wurden dennoch mit in die Auswertung einbezogen, um ein vollständiges Bild zu behalten.

Letzteres hat auch Einfluss auf die Aussagekraft der überlagerten Schalldruckpegel L_{total} . Unter der Annahme, dass die NC-Wirkung der Kopfhörer in allen Fällen optimal war, ergibt sich eine Reduktion von $9,8 \pm 7,2$ dB. Dieser Wert entspricht jedoch aufgrund der messtechnisch ermittelten Sensibilität mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht dem wahren Pegel.

Insgesamt zeigt sich, dass die Nutzung von NC zu einem besseren Hörerlebnis führt und gleichzeitig dazu beiträgt, die PLLs zu reduzieren.

6 Literaturverzeichnis

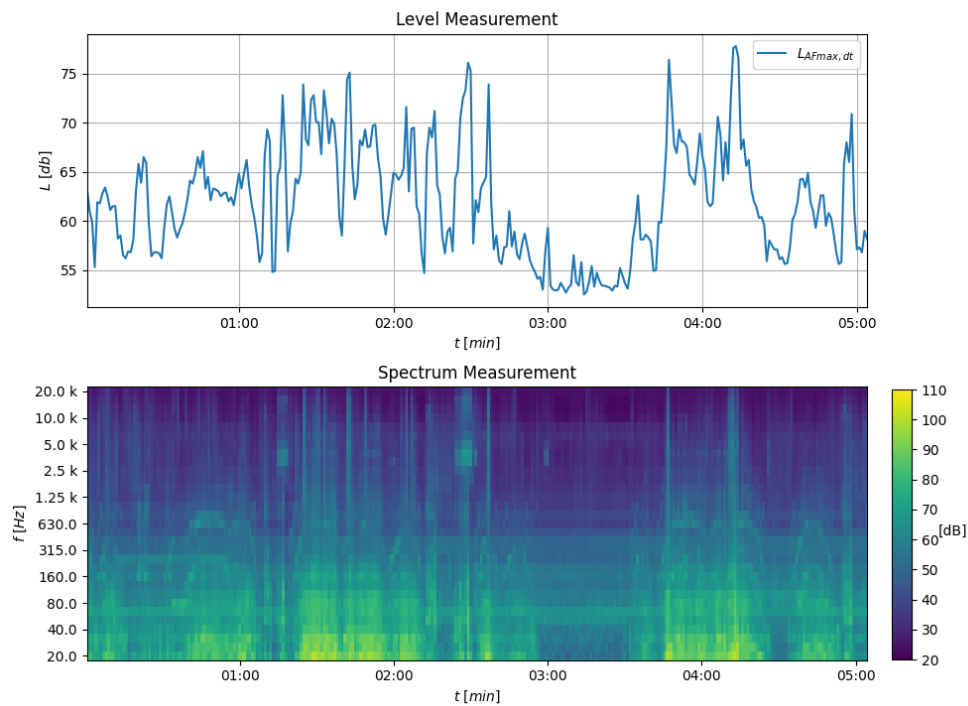
- DIN 45641. (1990). *Mittelung von Schallpegeln*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- DIN 45645-1. (1996). *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normungen.
- Farnell, A. (2010). *Designing Sound*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Four Audio. (2026). *WFS*. Von Four Audio: <https://www.four-audio.com/produkte/wfs/> abgerufen am 10.04.2026
- Görne, T. (2015). *Tontechnik*. München: Carl Hanser Verlag.
- Georg Neumann GmbH. (2016). *Pistonphonadapter PA 100*.
- Hoshina, T., Fujiyama, D., Koike, T., & Ikeda, K. (2022). Effects of an Active Noise Control Technology Applied to Earphones on Preferred Listening Levels in Noisy Environments. *Journal of Audiology & Otology*.
- KBV research. (08 2024). *Global Noise Cancelling Headphones Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product*. Von KBV research: <https://www.kbvresearch.com/noise-cancelling-headphones-market/> abgerufen am 04.04.2026
- Krishna, R., Ka Fei, T., & Chee Yong, L. (2019). Active Noise Reduction using LMS and FxLMS Algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Landesanstalt für Medien NRW. (2021). *On Track*. Düsseldorf.
- Lee, G. J., Lim, M. Y., Kuan, A. Y., Teo, J. H., Tan, H. G., & Low, W. K. (2014). The music listening preferences and habits of youths in Singapore and its relation to leisure noise-induced hearing loss. *Singapore Medical Journal*.
- Lueg, P. (1934). *USA Patentnr. US2043416A*.
- Okokona, E. O., Yli-Tuomia, T., Turunena, A. W., Taimistoa, P., Pennanena, A., Vouitsisb, I., . . . Lankia, T. (2017). Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environmental Research*.
- Rane, M., Coleman, P., Mason, R., & Bech, S. (2022). Quantifying headphone listening experience in virtual sound environments using distraction. *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*.
- Seol, H.-Y., Kim, S.-H., Kim, G.-Y., Jo, M., Cho, Y.-S., Hong, S.-H., & Moon, I.-J. (2022). Influence of the Noise-Canceling Technology on How We Hear Sounds. *Healthcare Journal*.
- Smith, J. O. (2010). *Physical Audio Signal Processing*. Von <http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/> abgerufen am 02.03.2026

- Spotify AB. (2026). *Loudness normalization on Spotify*. Von spotify.com: <https://support.spotify.com/us/artists/article/loudness-normalization/> abgerufen am 21.04.26
- Stewart, J., Bronzaft, A., McManus, F., Rodgers, N., & Weedon, V. (2011). *Why Noise Matters*. Abington: Earthscan.
- Thauvette, J., McCuaig, V., & Khong, Y. (21. 04 2021). *Apple AirPods Pro Headphones Review*. Von rtings.com: <https://www.rtings.com/headphones/reviews/apple/airpods-pro-truly-wireless> abgerufen am 26.02.26
- Vennerød, J. (2017). *Binaural Reproduction of Higher Order Ambisonics - A Real-Time Implementation and Perceptual Improvements*.
- WHO. (2015). *Hearing loss due to recreational exposure to loud sounds*.
- WHO. (2021). *World Report on Hearing*.

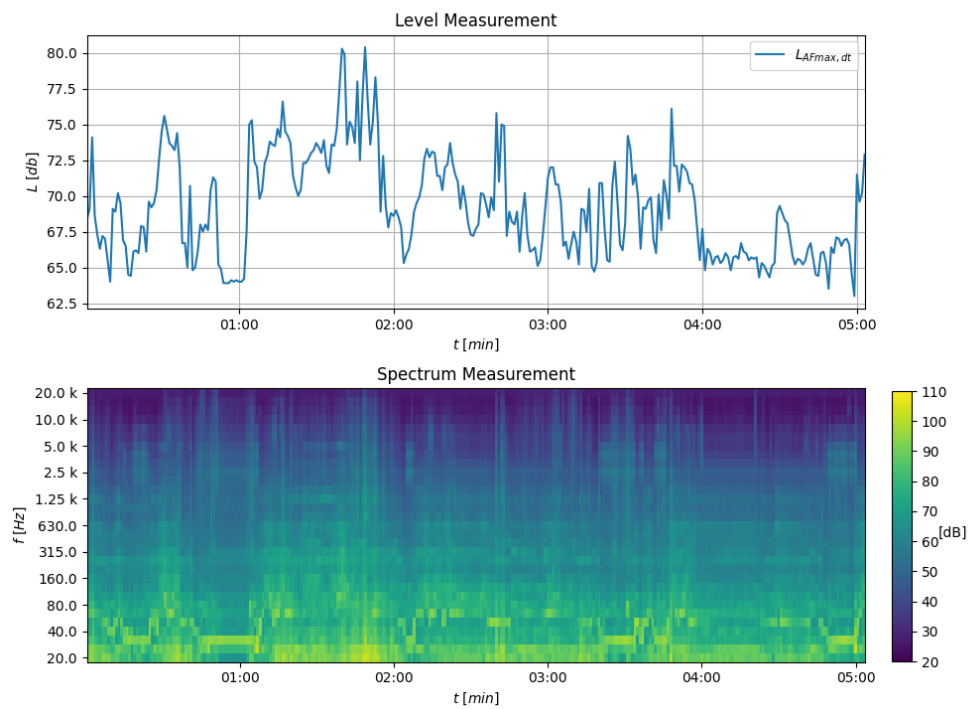
7 Anhang

7.1 Messergebnisse Lärmpegelmessungen (Bus)

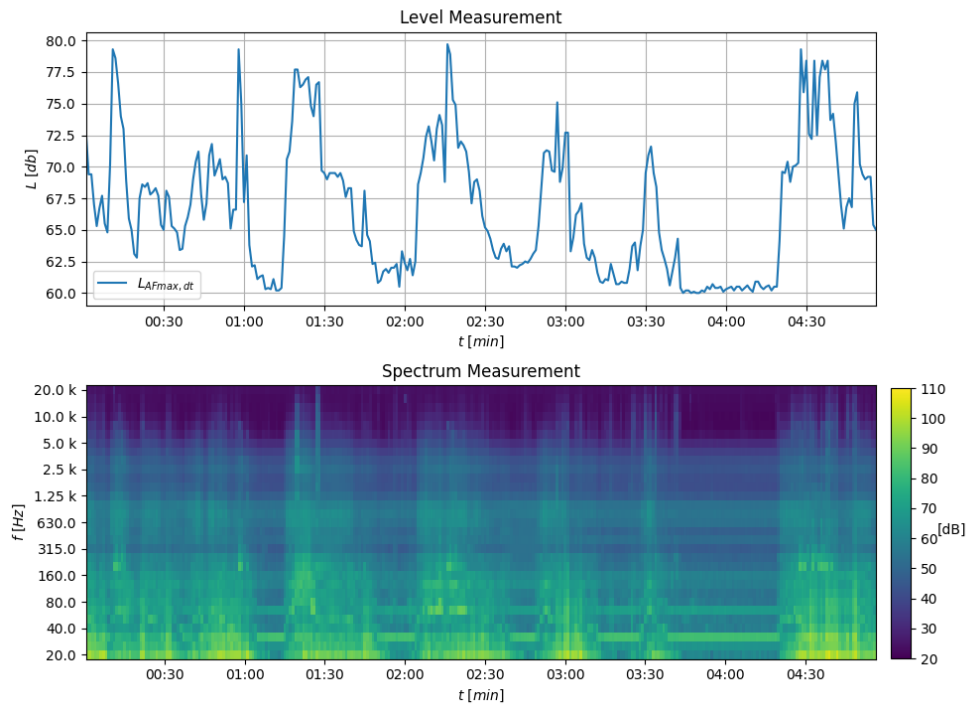
Schalldruckpegelmessung Bus
Linie 2 05.03.26 11.46



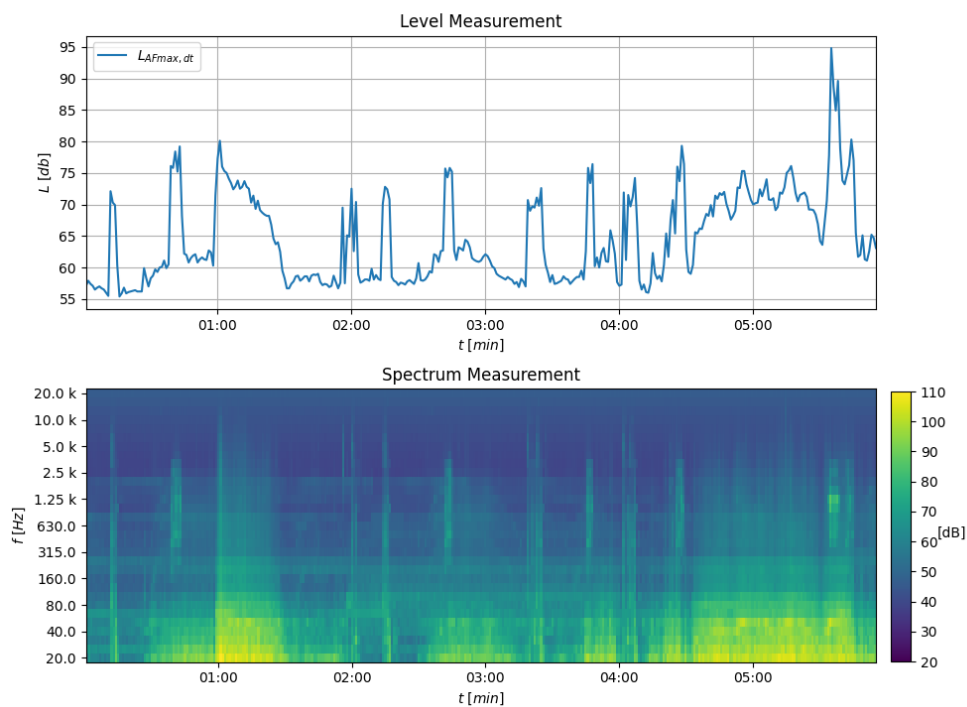
Schalldruckpegelmessung Bus
Linie 12 05.03.26 18.13



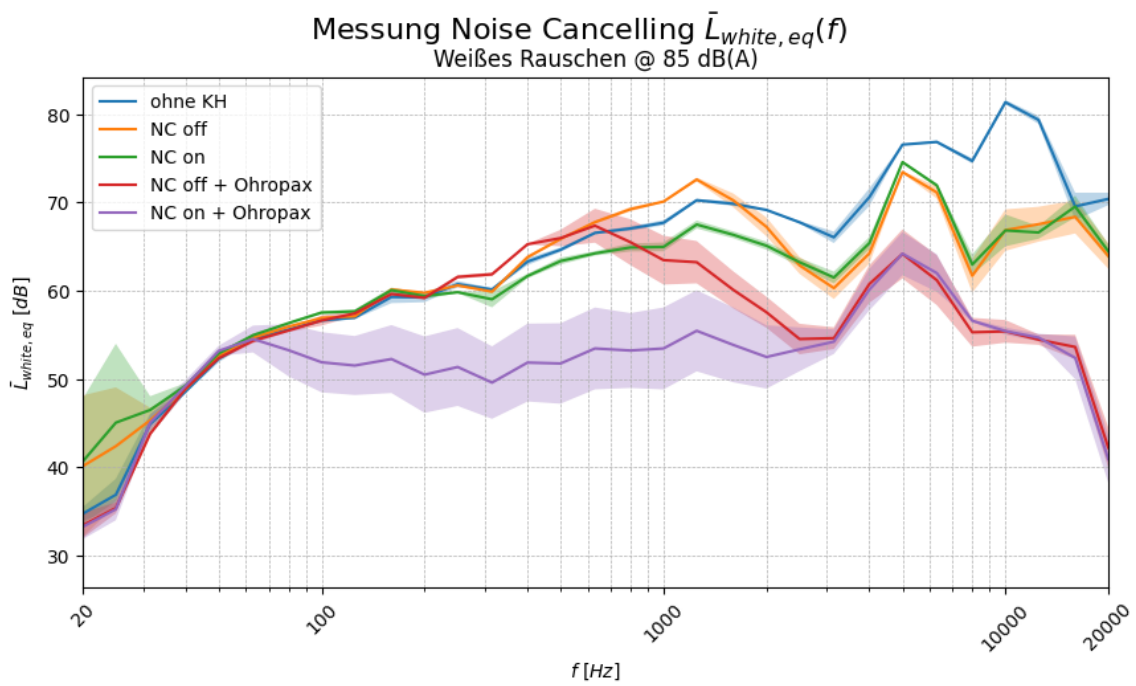
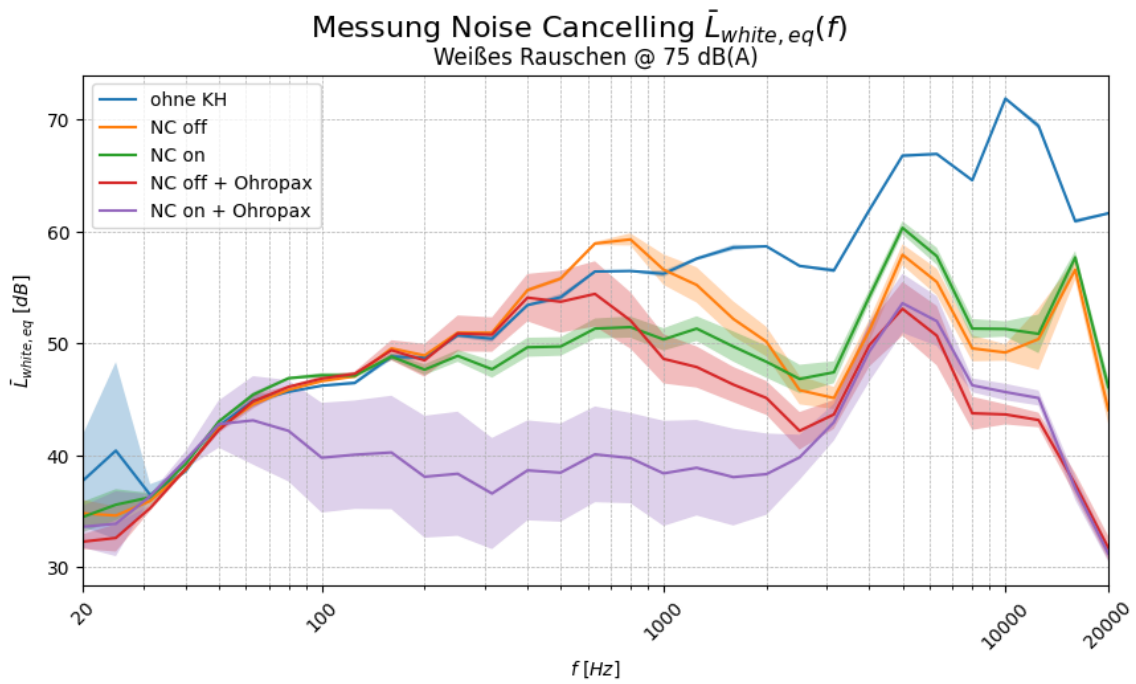
Schalldruckpegelmessung Bus Linie 30 04.03.26 11.10



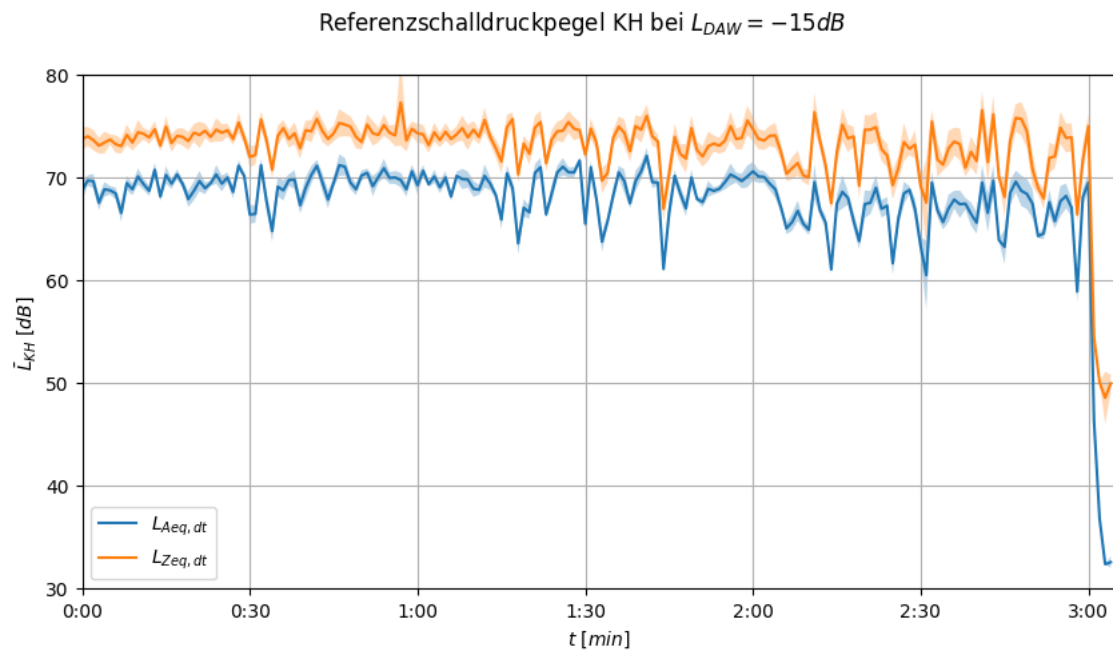
Schalldruckpegelmessung Bus Linie 111 03.03.26 9.55



7.2 Messergebnisse Geräuschunterdrückung weißes Rauschen



7.3 Messergebnisse $L_{KH,ref}$



Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift