



Akustik eines Flügels

positionsabhängige Klangfarbenveränderungen und dessen
Nutzen bei akustischen Musikproduktionen

Bachelorarbeit zur Erlangung
des akademischen Grades eines **Bachelor of Engineering**
an der **Hochschule der Medien Stuttgart**

vorgelegt von **Constantin Kiefer**

Matrikel-Nr.: **36977**

Erstprüfer: **Prof. Oliver Curdt**
Zweitprüfer: **Prof. Dr. Frank Melchior**

23.02.2025

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Constantin Kiefer, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: "Akustik eines Flügels – positionsabhängige Klangfarbenveränderungen und dessen Nutzen für die akustische Musikproduktion" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Ebenso sind alle Stellen, die mit Hilfe eines KI-basierten Schreibwerkzeugs erstellt oder überarbeitet wurden, kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden."

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 24 Abs. 2 Bachelor-SPO, § 23 Abs. 2 Master-SPO (Vollzeit)) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.



Köln, den 23.02.2025

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Erstprüfer Prof. Oliver Curdt und Zweitprüfer Prof. Dr. Frank Melchior, welche mir bei all meinen Fragen stets mit Rat zur Seite standen und sich für mehrere Gespräche immer Zeit genommen haben. Während meines Studiums haben mich ihre Vorlesungen durchgehend begleitet und meinen Werdegang an der Hochschule der Medien geprägt. Zusätzlich möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders bei meiner Partnerin und meiner Familie, auf deren emotionale Unterstützung ich stets zählen konnte.

Kurzfassung

Die hier vorliegende Arbeit befasst sich mit der Akustik eines Flügels unter dem Aspekt der Klangfarbenbildung. Besonderer Fokus wird dabei auf die positionsabhängigen Klangfarbenveränderungen im Umfeld akustischer Musikproduktionen gelegt.

Um grundlegendes Wissen über die Bildung der Klangfarbe im Instrument zu vermitteln, werden im ersten Teil dieser Arbeit der Einfluss mehrerer Bauteile und Mechanismen des Instruments auf die Färbung des Klangs dargestellt und erläutert. Ebenso werden grundlegende akustische Begebenheiten des Klavierklangs sowie die für den Forschungsteil wichtige Grundbegriffe erklärt.

Um die zugrundeliegende Forschungsfrage dieser Arbeit nach den positionsabhängigen Veränderungen der Klangfarbe zu beantworten, wurde für eine Aufnahme eines Stücks aus mehreren Positionen, drei horizontale sowie drei vertikale Ebenen auf Regelmäßigkeiten und Besonderheiten in Bezug auf spektrale Entwicklungen in verschiedenen Frequenzbereichen untersucht. Die daraus resultierenden zusammengefassten Ergebnisse stellen der Abschluss dieser Arbeit dar.

Abstract¹

This paper deals with the acoustics of a grand piano from the point of view of timbre. Special attention is given to the position-dependent changes in timbre in the environment of acoustic music production.

In the first part of this thesis, the influence of various components and mechanisms of the instrument on the colour of the sound are presented and explained in order to convey basic knowledge about the formation of timbre in the instrument. Basic acoustic characteristics of the piano sound were also explained, as well as basic terms that were important for the research part.

To answer the underlying research question about position-dependent changes in timbre, three horizontal and vertical planes were examined for regularities and peculiarities in relation to spectral changes in different frequency ranges for a recording of a piece from several positions. The summarized results represent the conclusion of my examination.

¹ unter Verwendung der Anwendung DeepL aus der deutschen Fassung (siehe Kurzfassung) übersetzt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	1
2 Klangerzeugung: Bildung der Klangfarbe im Instrument.....	2
2.1 Saiten	2
2.2 Hämmer.....	5
2.3 Saiten-Hammer-Interaktion.....	5
2.4 Pedale	8
3 Akustische Grundlagen des Klavierklangs.....	9
3.1 Definition Klangfarbe.....	9
3.2 Klangstruktur und spektrale Besonderheiten	11
3.3 Dynamikraum	12
3.4 Zeitlicher Verlauf des Klangs.....	13
4 Grundlagen der Schallabstrahlung	15
4.1 Resonanzboden	15
4.2 Korpus.....	20
5 Vorbereitung und Methodik der Analyse.....	21
5.1 Forschungsfrage	21
5.2 Methodik	22
5.3 Informationen zum Ausgangsmaterial	24
6 Auswertung und Analyse der Messungen	25
6.1 Subjektive Höreindrücke	25
6.2 Horizontale Ebenen	27
6.2.1 Auswertung der oberen Ebene	28
6.2.2 Auswertung der mittleren Ebene	37
6.2.3 Messungen der unteren Ebene.....	45

6.3	Zugrundeliegende Mechanismen der Horizontalebene	53
6.4	Vertikale Ebenen	55
6.4.1	Messungen der linken Ebene	55
6.4.2	Messungen der mittleren Ebene	62
6.4.3	Messungen der rechten Ebene	68
6.4.4	Zugrundeliegende Mechanismen der vertikalen Ebenen.....	75
7	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	76
8	Praktische Anwendung.....	83
9	Ausblick	84
10	Literaturverzeichnis.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gußrahmen mit Saiten im Kreuzbezug, von unten	3
Abbildung 2: Wellenform des Tons G1.....	4
Abbildung 3: Stärke des Grundtons und des 2. und 3. Teiltens für 3 verschiedenen Lautstärkestufen	7
Abbildung 4: Ausschwingverhalten eines Flügels, links: Resonanzbodenschwingung in zwei Ebenen.....	14
Abbildung 5: Erste und zweite Eigenmode des Resonanzbodens	16
Abbildung 6: relative Intensitätsmuster des Resonanzbodens 1.....	18
Abbildung 7: relative Intensitätsmuster des Resonanzbodens 2.....	19
Abbildung 8: Abstrahleffizienz für 4 Frequenzbereiche	20
Abbildung 10: Mikrofonpositionen der Aufnahme des Steinway & Sons D247 ...	22
Abbildung 9: Verhältnis der wahrgenommenen Lautstärke in Abhängigkeit der Bark-Bänder	23
Abbildung 11: obere Ebene - Bassbereich (20-300 Hz).....	28
Abbildung 12: obere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz).....	29
Abbildung 13: obere Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)	30
Abbildung 14: obere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)	32
Abbildung 15: obere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)	33
Abbildung 16: obere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz).....	34
Abbildung 17: obere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz).....	35
Abbildung 18: mittlere Ebene - Bassbereich (0-300 Hz)	37
Abbildung 19: mittlere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz).....	38
Abbildung 20: mittlere Ebene - Mittenbereich 1 (600 - 1200 Hz)	39
Abbildung 21: mittlere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000Hz)	40
Abbildung 22: mittlere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)	41
Abbildung 23: mittlere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz).....	43
Abbildung 24: mittlere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz).....	44
Abbildung 25: untere Ebene - Bassbereich (20-300 Hz)	45
Abbildung 26: untere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)	46
Abbildung 27: untere Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz).....	47
Abbildung 28: untere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)	49
Abbildung 29: untere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)	50
Abbildung 30: untere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz).....	51
Abbildung 31: untere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz).....	52

Abbildung 32: linke vertikale Ebene - Bassbereich (20-300 Hz)	55
Abbildung 33: linke vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)	56
Abbildung 34: linke vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz).....	57
Abbildung 35: linke vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)	58
Abbildung 36: linke vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)....	59
Abbildung 37: linke vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz).....	60
Abbildung 38: linke vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)	61
Abbildung 39: mittlere vertikale Ebene - Bassbereich (20-300 Hz).....	62
Abbildung 40: mittlere vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz) ..	63
Abbildung 41: mittlere vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz).....	64
Abbildung 42: mittlere vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz).....	65
Abbildung 43: mittlere vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)	66
Abbildung 44: mittlere vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)	67
Abbildung 45: mittlere vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)	68
Abbildung 46: rechte vertikale Ebene - Bassbereich (60-300 Hz).....	69
Abbildung 47: rechte vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)	70
Abbildung 48: rechte vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz).....	71
Abbildung 49: rechte vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz).....	72
Abbildung 50: rechte vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz) ..	73
Abbildung 51: rechte vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)	74
Abbildung 52: rechte vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)	75
Abbildung 53: Heatmap Bassbereich (20-300 Hz)	77
Abbildung 54: Heatmap unterer Mittenbereich (300-600 Hz)	78
Abbildung 55: Heatmap Mittenbereich (600-2000 Hz).....	79
Abbildung 56: Heatmap oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)	80
Abbildung 57: Heatmap Präsenzbereich (3500-6000 Hz).....	81
Abbildung 58: Heatmap Brillanzbereich (6000-15000 Hz).....	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Adjektive zur Beschreibung von Höreindrücken	10
Tabelle 2: Werte der Bark-Skala	24

1 Einleitung

Wer schon mal einem Klavierkonzert in einem der vielen Konzerthäuser dieser Welt beigewohnt hat weiß, wie eindrucksvoll ein Konzertflügel auf der Bühne wirken kann und einen ganzen Saal mit Klang füllen kann. Dabei ist die durch den Pianisten hervorgerufene Klangfarbe für den Transport der in den Noten festgehaltenen Stimmungen und Aussagen von essenziellem Wert. Dass ein Großteil der Erarbeitungszeit solcher Stücke in die Perfektionierung dieser besagten Klangfarben läuft, überrascht dabei nicht und kann aus meiner eigenen Erfahrung als Pianist bestätigt werden. Diese einzufangen, sollte dementsprechend eine große Priorität eines jeden Tonschaffenden bei der Anfertigung akustischer Aufnahmen eines Flügels sein. Dabei stellt sich diese Aufgabe aufgrund der Komplexität des Klavierklangs als sehr schwer heraus (Haigh et al. 2020), wodurch sie nur mithilfe von fundiertem Wissen über die klangfarblichen Begebenheiten zu bewerkstelligen ist. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden handelt diese Arbeit von der Entstehung der Klangfarbe des Flügels unter besonderer Betrachtung der positionsabhängigen Klangfarbenveränderungen im typischen Aufnahmebereich einer klassischen Klavieraufnahme. Das Wissen über diese Entwicklung der Klangfarbe ermöglicht es uns ideale Mikrofonpositionen zu finden, an denen die gewünschte Klangfarbe am effektivsten eingefangen werden kann.

Neben dem persönlichen Interesse als Tonschaffender und Pianist stellt der Nutzen dieser Arbeit als Nachschlagewerk für Studierende und professionelle Toningenieure ohne Vorwissen über die Aufnahme eines Klaviers, eine zusätzliche Motivation dar. Die hier dargestellten Ergebnisse können im besten Fall als praktischer Begleiter für zukünftige Aufnahmen eines Flügels dienen.

2 Klangerzeugung: Bildung der Klangfarbe im Instrument

Die Bildung der Klangfarbe eines Flügels unterliegt dem Einfluss vieler verschiedener Bauteile und Mechanismen im Instrument. Warum und wie dieser Einfluss auf den Klang nehmen, wird im folgenden Kapitel genauer erläutert.

Durch die Betätigung einer Taste wird die dahinterliegende Hammermechanik, sowie der dazugehörige Hammer in Bewegung gesetzt. Dieser schlägt im Anschluss gegen die im Gussrahmen aufgespannte Saite, was sie in Schwingung versetzt und zur Abgabe von Schallwellen anregt. Weitergegeben über die Stege verstärkt der Resonanzboden den abgegebenen Klang der Saiten und gibt ihn mithilfe von Reflektionen am Deckel in Richtung des Publikums ab. (Fletcher und Rossing 1991, S. 306)

2.1 Saiten

„The Strings are the heart of the piano. They convert some of the kinetic energy of the moving hammers into vibrational energy, store this energy in normale modes, and pass it on to the bridges and the soundboard in a manner that determines the sound quality of the instrument“ (Fletcher und Rossing 1991, S. 315)

Die Saiten stellen, wie von Fletcher und Rossing beschrieben, das Herzstück des Flügels dar, den Ort, an dem aus der mechanischen Energie des Tastendrucks und der Hammer der Klang des Instruments entsteht. (Fletcher und Rossing 1991, S. 315)

Damit der Flügel ein breites Klangspektrum abbilden kann, werden typischerweise 243 Stahlsaiten von verschiedener Länge verbaut. Dabei hat die kürzeste Saite eine Länge von 5cm, während die längste verbaute Saite bis zu 2,5m lang sein kann. Da die Klaviatur eines modernen Konzertflügels aus 88 Tasten besteht, legt die gerade genannte Anzahl der Saiten eine Verwendung von Mehrfachbezügen bei bestimmten Tönen bzw. Tasten nahe. (Fletcher und Rossing 1991, S. 306)

Hierbei sind zwei bis drei Saiten eng nebeneinander aufgespannt und auf dieselbe Frequenz gestimmt. Grund für diesen Mehrfachbezug der Saiten ist die Verstärkung der auf den Steg abgegeben Kraft, wodurch der gespielte Ton in

seinem Gesamtklang an Lautstärke gewinnt (Richardson 2011, S. 107–108). Für manche Saiten lässt sich zusätzlich eine Umwicklung mit Kupferdraht erkennen (Fletcher und Rossing 1991, S. 306). Diese sind vor allem im Bassbereich aufzufinden und für die Erzeugung der tiefen Frequenzen mitverantwortlich. Durch die Ummantelung der Stahlseite werden eine verringerte Steifheit und erhöhte Masse erreicht, was für die Wiedergabe von tiefen Frequenzen von Vorteil ist. (Fletcher und Rossing 1991, S. 316)

Neben dem Durchmesser bestimmt besonders die Länge der Saite die Frequenz der Grundschwingung. Das Verhältnis dieser zwei Größen entscheidet über die jeweilige Länge zweier Saiten, die in einer Oktavlage zueinanderstehen. (J. Burred 2009, S. 19)

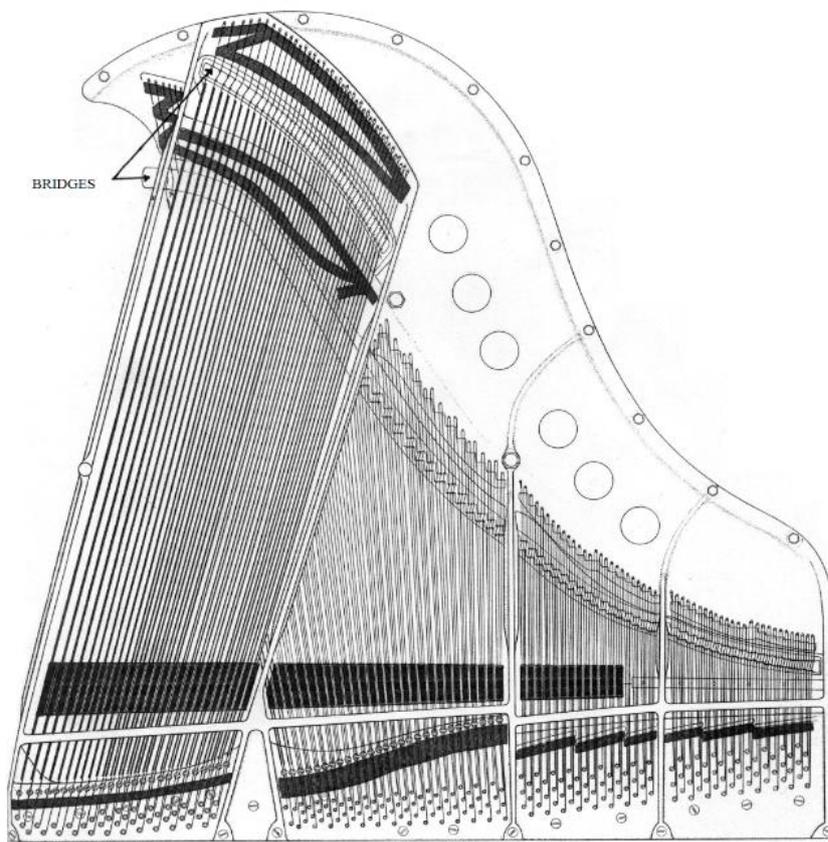


Abbildung 1: Gußrahmen mit Saiten im Kreuzbezug, von unten (J. Burred 2009, S. 21)

Für den Fall von C1 würde dies zum Beispiel eine Länge von 4,5m bedeuten, was für die Umsetzung im Instrument unpraktisch wäre. An diesem Punkt kommt die bereits angesprochene Ummantelung der Basssaiten mit Kupferdraht und der daraus resultierenden Erhöhung der Gesamtdichte der Saite ins Spiel, was eine Obergrenze der Saitenlänge auf 2,5m ermöglicht. (J. Burred 2009, S. 21) Durch die höhere Dichte und das damit einhergehende Gewicht wird die Saite träger und

die Amplitude der Schwingung schwächer, was in einer verringerten Lautstärke der von der Saite abgegeben Schallwelle resultiert. Damit der Bassbereich jedoch genau so präsent abgebildet werden kann wie der Diskantbereich, wird dieser in einem Kreuzbezug unter die Diskantsaiten verlegt. Durch diese Anordnung können die von den Basssaiten emittierenden Schallwellen besser vom Resonanzboden verstärkt und abgestrahlt werden. (Fletcher und Rossing 1991, S. 307)

Aufgrund der hohen Spannung der Saiten von bis zu 1000N (Fletcher und Rossing 1991, S. 307) kommt es zu unterschiedlichen Wellenausbreitungen bei verschiedenen Frequenz. Grund dafür ist eine bei manchen Saiten erkennbare schnellere Ausbreitungsgeschwindigkeit der höheren Teiltöne im Gegensatz zum Grundton (J. Burred 2009, S. 22).



Abbildung 2: Wellenform des Tons G1 (J. Burred 2009, S. 22)

Die obige Abbildung zeigt anschaulich am Beispiel des Tons G1 (englische Notation) wie bei der Initialwelle alle Teiltöne im Grundton enthalten sind. Schaut man sich jedoch den weiteren Verlauf der Welle an lässt, sich eine zeitliche Verschiebung der höheren Teiltöne erkennen. Sie formen sich vor dem eigentlichen Grundton, was zu einer sogenannten *Inharmonizität* führt. Durch diese Verschiebung sind die Wellenmoden keine perfekten Vielfachen des Grundtons mehr, was zu einer Erhöhung der Frequenz der Teiltöne führt. Diese Verschiebung bedeutet für den theoretischen zwanzigsten Teilton eine Verschiebung um eine ganze Stufe. (J. Burred 2009, S. 22)

Da Durchmesser und Länge der Saiten über den Frequenzbereich des Flügels variieren, kommt es an verschiedenen Stellen im Instrument zur unterschiedlich starken Ausprägung dieser sogenannten „Inharmonizität“. Im hohen bis mittleren Register fällt dieser Effekt eher schwach aus, während er mit abnehmender Grundfrequenz der Saiten steigt. Besonders bei den Basssaiten kommt es aufgrund des größeren Verhältnisses von Durchmesser zu Länge zu einer Verstärkung der Inharmonizität. (J. Burred 2009, S. 22)

2.2 Hämmer

Damit die nun fein aufeinander abgestimmten Saiten klingen dürfen benötigt es eine Kraft, die sie in Schwingung versetzt. Für die Bereitstellung dieser Kraft in Form eines Impulses sind die Hämmer zuständig. Diese bestehen aus einem harten Holzkern, welcher von ein bis zwei Lagen Filz umgeben ist (Giordano 2016, S. 66). Dabei spielen Härte, Textur sowie Dichte des Filzes eine entscheidende Rolle für den Klang des Instruments (J. Burred 2009, S. 12).

Die äußerste Lage Filz ist meist weich, während die weiter innenliegende Lage eine höhere Dichte und damit größere Härte aufweist. Betrachtet man den Moment, an dem der Hammer auf die Saite trifft, so lässt sich der Einfluss der beiden unterschiedlich harten Lagen bemerken. Bei diesem Kontakt kommt es zu einer Verformung des Filzes, welche in seiner Intensität stark von der Art des Anspiels abhängig ist. Kommt es zu einem leichten und damit leisen Anspiel durch den/die Pianist*in, so verformt sich die äußere, weichere Lage des Filzes nur gering. Wählt sie/er jedoch einen härteren Anschlag, um damit einen lauterer Ton zu erzeugen, kommt es zu einer deutlich stärkeren Verformung der äußeren Lage. Die durch das härtere Spiel erzeugte Verformung kann sich bei ausreichend starkem Anschlag bis in die innere, härtere Lage des Filzes bewegen. Für den Klang des Instruments bedeutet dies, dass der Hammer bei stärkerem Anschlag bzw. lauterem Spiel aufgrund der tiefergehenden Verformung effektiv als ein härterer Hammer fungiert und damit eine andere Klangfarbe erzeugt. Analog dazu bedeutet ein sanfter Anschlag eine rein oberflächliche Verformung, was in einem effektiv weicheren Hammer resultiert. (Giordano 2016, S. 66–67)

Warum die Härte des Hammers einen Effekt auf die Klangfarbe hat, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

2.3 Saiten-Hammer-Interaktion

Damit es zu einer Klangerzeugung kommen kann, muss die Saite in Schwingung gebracht werden. Ausgangspunkt dafür ist die Taste der Klaviatur, welche durch den Druck des/der Pianist*in die dahinterliegende Mechanik in Gang setzt. (J. Burred 2009, S. 5) Fletcher beschreibt dabei die Mechanik als den Ort, an dem die Energie der Finger auf den Hammer und damit die Saite übertragen werden (Fletcher und Rossing 1991, S. 38).

Am Ende der sogenannten Hammermechanik befinden sich sowohl der Hammer mit seinem Filzkopf als auch ein Dämpfer, welcher die Saite vom Schwingen abhalten soll. Die Betätigung der Taste hat dabei eine gleichzeitige Anhebung der Dämpfer und ein in Bewegung setzen des Hammers als Resultat. Durch diese Bewegung trifft der Hammer auf die jetzt ungedämpfte Saite und löst in dieser einen wellenartigen Impuls aus, bevor er nach wenigen Millisekunden die Saite wieder verlässt und in eine Ruhelage fällt, was die Saite nun frei schwingen lässt. (J. Burred 2009, S. 5)

Durch den Impuls verformt sich die Saite und es kommt zu einer Ausbreitung von zwei Wellen mit entgegengesetzter Richtung vom Kontaktpunkt des Hammers und der Saite. Die Stärke der Wellen ist dabei proportional zur an der Taste aufgegebenen Kraft. Erreichen die Wellen das jeweilige Ende der Saite, so werden sie mit einer um 180 Grad verschobenen Phase reflektiert. (Giordano 2016, S. 65) Die dabei erzeugten stehenden Wellen stellen die Grundlage für die Bildung der Teiltöne dar (Giordano 2016, S. 73) .

Wie im vorherigen Kapitel bereits angesprochen, hat die Härte der Hämmer einen direkten Einfluss auf die Bildung der Klangfarbe. Eine Erklärung, warum und in welcher Form die Härte der Hämmer Einfluss auf die Klangfarbe nimmt, wurde bisher aber noch nicht gegeben. Bei der Erklärung ist die intuitive Annahme, dass die Kontaktzeit eines Schlages mit einem weichen Gegenstand auf ein hartes Objekt deutlich länger ist als die mit meinem harten Gegenstand, essenziell. (Giordano 2016, S. 69)

Aus dieser Annahme lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Kontaktzeit des Hammers mit der Saite und der effektiven Härte des Hammers erschließen. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt den Ort der höchsten spektralen Energie so lässt sich folgende Regelmäßigkeit erkennen:

Bei einer kurzen Kontaktzeit befindet sich die meiste Energie im hochfrequenten Bereich, was in deutlich wahrnehmbaren oberen Teiltönen resultiert. Handelt es sich jedoch um einen längeren Saiten-Hammer-Kontakt, so lässt sich der spektrale Schwerpunkt in den tiefen Frequenzen auffinden, was in einer schwachen Teiltonanregung resultiert. (Giordano 2016, S. 72)

Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich der Einfluss der effektiven Härte des Hammers auf die Klangfarbe wie folgt beschreiben:

Ein harter Hammer bedeutet eine geringe Kontaktzeit mit der Saite, was eine hohe Schallintensität in den hohen Frequenzen zur Folge hat und in einer darin begründeten ausgeprägten Teiltonanregung resultiert. In Kontrast dazu bedeutet ein weicher Hammer eine längere Kontaktzeit und damit eine höhere Schallintensität im tieferen Frequenzbereich, was zu einer geringen Teiltonanregung führt. (Giordano 2016, S. 73)

Die Kontaktzeit zwischen Hammer und Saite unterliegt dabei dem Einfluss der durch den Pianisten*in ausgeübten Kraft auf die Taste und damit der Saite (Nishiguchi 2004, S. 414). Mit stärker werdender Anspielkraft sinkt neben der ansteigenden Intensität der Saitenschwingung die Kontaktzeit des Hammers mit der Saite, was wie oben beschrieben direkten Einfluss auf die effektive Härte der Hämmer hat (Fletcher und Rossing 1991, S. 321)

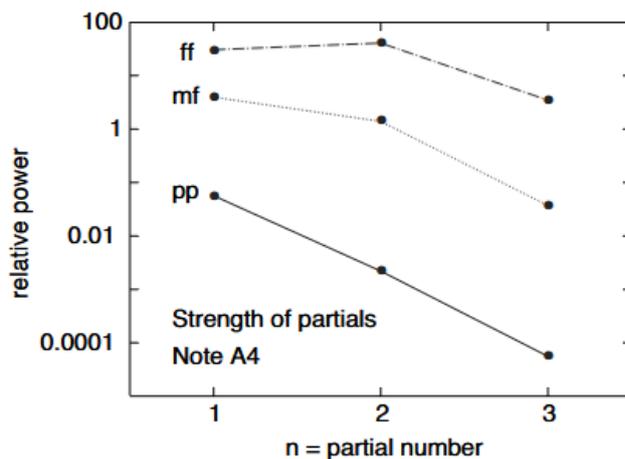


Abbildung 3: Stärke des Grundtons und des 2. und 3. Teiltons für 3 verschiedenen Lautstärkestufen (Giordano 2016, S. 75)

Spielt der/die Pianistin leise (z.B. pp=pianissimo), liegt ein sanfter Hammer-Saiten-Kontakt vor, was in Bezug auf den Hammerfilz eine geringe Verformung bedeutet sowie eine langen Kontaktzeit erzeugt. Wenden wir hier unsere Regel bezüglich des Zusammenhangs von Verformung zum effektiven Härtegrad, sowie des Einflusses der Kontaktzeit an, so handelt es sich hier um einen effektiv weichen Hammer, welcher nur schwache Teiltöne erzeugt. Im Gegensatz dazu kommt es beim harten bzw. lautem Spiel (z.B. ff = fortissimo) zu einer starken Verformung des Filzes sowie einer kurzen Kontaktzeit. Nach den oben dargestellten Erkenntnissen bedeutet dies eine hohe effektive Härte des Hammers, was in einem obertonreichen Klang resultiert. Diese Zusammenhänge lassen sich in *Abbildung 3* für die drei Dynamikbereiche sehr leise (pp), mittellaut (mf) und sehr laut (ff)

erkennen. Interessant ist hier der rapide Abstieg der Obertonstärke im sehr leisen Dynamikbereich vom über 10-fachen zwischen dem Grundton und dem zweiten Teilton. Im sehr lauten Bereich hingegen, kommt es zu einer Verstärkung der Lautstärke des zweiten Teiltons. Aufgrund dieser Entwicklung im Obertonbereich wird lautes Spiel häufig auch als heller bezeichnet. Für das geschulte Ohr lässt sich durch diese Entwicklung mithilfe der Klangfarbe eine Aussage über die von dem/der Pianist*in gewählte Dynamik und damit Intention machen. (Giordano 2016, S. 75)

Dass die Saite durch den Hammer von unten angeschlagen wird, regt die Saite zu einer Schwingung in vertikaler Ebene an. Durch bestimmte Interaktionen zwischen Saitenschwingung und dem Steg kommt es zu einer zusätzlichen horizontalen Anregung der Saite. (Giordano 2016, S. 79) Diese sogenannte transversale Schwingung ist für den Hauptanteil der durch die Saite abgegebenen Energie verantwortlich (Richardson 2011, S. 106).

2.4 Pedale

Lokalisiert zu den Füßen des/der Pianist*in befinden sich die Pedale des Flügels. Unterschieden wird dabei zwischen zwei bis drei verschiedenen Pedaltypen. Beim ersten Pedal, meist ganz rechts auffindbar, handelt es sich um das Haltepedal, bei dem alle Dämpfer, welche die Saiten vom Schwingen abhalten sollen, angehoben werden. (Fletcher und Rossing 1991, S. 315) Die damit einhergehende Fähigkeit aller Saiten frei zu schwingen, regt die der angeschlagenen Saite umgebenen Saiten zum Mitschwingen an, was dem Klang des Instruments mehr Resonanzen verleiht (Richardson 2011, S. 101)

Da das Haltepedal das wohl meistbenutzte Pedal darstellt, lohnt sich hier ein genauer Blick auf dessen Auswirkung auf die Klangfarbe. Wie bereits erwähnt, kommt es durch das Pedal zum freien Schwingen der Saite, was in einer deutlichen Verlängerung des Restklangs, das heißt dem Klang, der nach dem eigentlichen ersten Impuls des Hammers kommt, resultiert. Auf die Zeitstruktur des Klangs bezogen bedeutet dies eine deutlich längere Ausklingzeit (Decay). Zusammen mit der Grundfrequenz dürfen dadurch die Teiltöne dieser Saite länger klingen, was ein teiltonreicheres Klangspektrum zur Folge hat. (Lehtonen et al. 2007, S. 1796) Der Effekt des Pedals ist im Mitteltonbereich am stärksten, da sich durch den Zwei- bzw. Dreifachbezug mehr Saiten nebeneinander befinden, welche zum Mitschwingen angeregt werden können (Lehtonen et al. 2007, S. 1790).

Das rechte Pedal ist das sogenannte „una coda“ Pedal, bei dem sich Klaviatur samt Mechanik und Hammer nach rechts bewegt und somit bei den mehrsaitig bezogenen Saitengruppen eine Saite weniger angeschlagen wird. Eine Verringerung der Lautstärke und Veränderung der Klangfarbe sind hierbei die Folge. (Richardson 2011, S. 101)

3 Akustische Grundlagen des Klavierklangs

Um die Klangfarbe eines Instruments analysieren zu können, bedarf es einer vorherigen Klärung des Begriffs „Klangfarbe“. Im folgenden Teil wird daher eine Grundlage bezüglich der Definition und Beschreibung von Klangfarbe sowie eine Übersicht über die akustischen Eigenschaften des Klangs eines Flügels geschaffen. Dafür wird eine detaillierte Beschreibung der Klangspektren, Dynamik sowie der zeitliche Ablauf des Klavierklangs dargestellt.

3.1 Definition Klangfarbe

„Klangfarbe bzw. deren Wahrnehmung, Beschreibung und Messung gehören zu jenen Bereichen der Systematischen Musikwissenschaft, die trotz einer mehr als einhundertjährigen Forschungsgeschichte auch heute noch Rätsel aufgeben und Musiker, Akustiker, Musikpsychologen, Instrumentatoren und Musikwissenschaftler aneinander vorbeireden lassen.“ (Reuter C. 2004, S. 110)

Mit diesem Zitat beschreibt Reuter die aktuelle Lage der Hörforschung auf den Bezug der Klangfarbe äußerst treffend. Untersuchung zu dieser Thematik reichen bereits bis ins Jahr 1863 in die Zeit Helmholtz's zurück, was die Komplexität der Beantwortung der Frage nach der Definition des Begriffs „Klangfarbe“ deutlich macht. Sucht man nach einer fest formulierten Definition, so lässt sich der Versuch des „American National Standards Institute ANSI“ aufbringen, dessen Definition wie folgt klingt: „die Klangfarbe [ist] in erster Linie vom Spektrum des Signals, der Wellenform, der Lage der Frequenz im Spektrum und von zeitlichen Charakteristika des Klangs [abhängig]“ (Werner A. Deutsch 2003). Sie beschreibt die Klangfarbe (engl. Timbre) unter anderem als Residualkategorie, die Aspekte beinhaltet um

zwei Klänge mit identischer Tonhöhe und Lautstärke voneinander zu unterscheiden. (Morat und Ziemer 2018, S. 61)

Seit 1863 ist durch die Forschung von Helmholtz bekannt, dass die Phase und Stärke der Obertöne (Siedenburg K. 2020, S. 31), sowie deren Anzahl (Vogt et al., S. 150) einen großen Einfluss auf die Bildung der Klangfarbe haben.

Mit fortschreitender Forschung wurden immer mehr sogenannte Deskriptoren entdeckt, mit denen sich die Eigenschaften des Begriffs Klangfarbe messbar machen lassen. Dabei stellt zu Beginn die Betrachtung des Signals als Wellenform einen fundamentalen Deskriptor für die Untersuchung der Klangfarbe dar. Durch sie lassen sich Aus- und Einschwingvorgänge erkennen, mit denen Aussagen über die Impulsivität von Tönen getätigt werden können. Eine weitere wichtige Darstellung besteht in der zeitlichen Frequenzanalyse, was uns einen Einblick in die spektralen Schwerpunkte des zugrundeliegenden Audiomaterials ermöglicht. Dabei beschreibt der Begriff „spektraler Schwerpunkt“ den Frequenzraum, der im Klangspektrum am stärksten vertreten ist. In dieser Darstellung lassen sich zusätzlich genauere Erkenntnisse über die Verteilung der geraden und ungeraden Teiltöne gewinnen, welche, wie man bereits seit Helmholtz weiß, maßgeblichen Einfluss auf die Klangfarbe besitzen. Vor allem das Abklingverhalten dieser Teiltöne lässt sich mithilfe eines Spektrogramms erkennen, womit die Deskriptoren einen weiteren zeitlichen Parameter erhalten. (Siedenburg K. 2020, S. 34)

Bei einer subjektiven Höranalyse eines Stücks wird die Klangfarbe häufig mit Adjektiven wie „hell“ und „warm“ oder „hohl“ und „näselnd“ bezeichnet (Vogt et al., S. 148). Diese Bezeichnung von Klängen beschreibt man als „musikalische Semantik“, welche weitaus umfassender ist als die hier aufgestellten Adjektive vermuten lassen (Koelsch S. 2007, S. 14). Damit man den gehörten Eindruck mit den Messungen der Deskriptoren vergleichen kann, wird im Folgenden eine Tabelle mit ausgewählten Adjektiven zur Beschreibung der Klangfarbe in Abhängigkeit verschiedener Frequenzbereiche dargestellt:

<i>Begriffe</i>	<i>Positive Beschreibung</i>	<i>Negative Beschreibung</i>
<i>Basswiedergabe</i>	trocken, präzise, druckvoll, satt	schwammig, dröhnig, unsauber
<i>Mittenwiedergabe</i>	eindringlich, griffig, farbig, körperhaft	diffus, verwaschen, aufdringlich,
<i>Höhenwiedergabe</i>	sauber, detailreich, luftig, strahlend	scharf, metallisch, verzerrt, zu hell

Tabelle 1: Adjektive zur Beschreibung von Höreindrücken (R. Wagner 2005)

3.2 Klangstruktur und spektrale Besonderheiten

Für den Klang eines Klaviers lässt sich anders als bei Blas- und Streichinstrumenten kein stationärer Zustand feststellen (Dickreiter 2014, S. 94). Bei der Analyse eines Klavierklangs ist daher vor allem die Zeitstruktur des Ausklingverhaltens interessant. Im Fall der Anfangsphase des Klangs lässt sich ein quasistationärer Zustand annehmen, was uns die Möglichkeit gibt, das Teiltonspektrum in dieser Phase des Klangs genauer zu betrachten. Für das Teiltonspektrum spielt der Resonanzboden mit seiner schallabstrahlenden Wirkung eine entscheidende Rolle. Neben anderen lassen sich hierbei vor allem die stärksten Resonanzen bei 200 Hz – 1000 Hz nennen (in größeren Instrumenten kann es zusätzlich zu einem Amplitudenmaximum bei 100 – 200Hz kommen). (Meyer 2015, S. 86)

In Abhängigkeit zur Konstruktion des Klaviers, kommt es im Bereich von 1000Hz bis 2000Hz zu Resonanzen, welche dem Klang des Instruments zu mehr „Brillanz“ verhelfen. Für die restlichen Bereiche im Frequenzspektrum gilt eine Dominanz des Grundtons gegenüber seinen Teiltönen. Lediglich im Tieftonbereich zwischen 100Hz und 250Hz, genauer in den beiden untersten Oktaven, überwiegen die Teiltöne dem Pegel des Grundtons. Bewegt man sich ab diesem Amplitudenmaximum in die Richtung abfallender Oktaven, so nimmt die Stärke der Obertöne um 12 - 15 dB pro Oktavschritt ab. Betrachtet man außerdem den Bereich über dem Amplitudenmaximum, lässt sich ebenfalls ein Abfall der Hüllkurve erkennen. Während es unter 1500 Hz zu einer moderaten Abfallrate von 10 dB je steigender Oktave kommt, trifft man im Bereich über 1500 Hz auf eine Reduzierung der Stärke der Teiltöne von 15 bis 20 dB pro Oktave. Bezieht man diese Entwicklung beispielsweise auf den Ton C5, welcher bei 4100 Hz liegt, so sind im Klangspektrum dieses Tons nur noch drei Teiltöne vorhanden, was ihn annähernd zu einer reinen Sinuswelle macht. Über diesen Bereich hinweg kann es zu Schwankungen in der Intensität einzelner Teiltöne kommen, was durch Resonanz bzw. Resonanzlücken zu erklären ist. (Meyer 2015, S. 87)

Neben der in Kapitel 2.1 bereits erläuterten Inharmonizität der Saiten beeinflussen außerdem Geräuschanteile des Klangs die Klangfarbe des Instruments (Dickreiter 2014, S. 95). Diese lassen sich zum größten Teil im Einschwingvorgang auffinden. Deren Frequenz ist dabei ein direktes Widerspiegeln der Resonanzverhältnisse, was die besondere Präsenz der Geräusche im Bereich von 300 bis 750 erklärt. Im

Fall eines hohen Grundtons kann der Geräuschanteil aufgrund des tieffrequenten Charakters der Geräusche bis zu 6dB unter dem Grundton liegen. Da die Frequenz des Grundtons in dieser Lage weit über der Frequenz des Geräuschanteils liegt, werden diese nicht mehr vom eigentlichen Klang überdeckt und dadurch für den Zuhörer wahrnehmbar (Meyer 2015, S. 87)

3.3 Dynamikraum

Für die Anregungen verschiedener Lautstärken ist vorrangig das Spiel des/der Pianist*in ausschlaggebend. Mithilfe der aufgewendeten Kraft auf die Tasten und der Betätigung der Pedale lässt sich die Intensität des Klangs aktiv verändern. Die Aufstellung des Flügels an sich hat jedoch bereits durch die möglichen Stellungen des Flügeldeckels Einfluss auf den möglichen Dynamikraum des Instruments. Betrachtet man das zweistimmige Tonleiterspiel über das ganze Register des Flügels, so können Spitzenpegel von bis zu 104 dB gemessen werden. Zwischen den verschiedenen Lagen des Klangspektrums herrschen dabei Unterschiede in der Intensität der jeweiligen Repräsentation im Dynamikraum. Nimmt man den Fall von offenem Deckel und die Abwesenheit des rechten Pedals (siehe Kapitel 2.4) dann liegt die Stärke der tieferen Lage mit 1–2 dB über dem Pegel der oberen Lage. Mit Benutzung des Pedals kann eine Pegelerhöhung von 4 dB in der tiefen und 3 dB in der hohen Lage erreicht werden. (Meyer 2015, S. 88)

Der Dynamikraum lässt sich allerdings auch in die negative Richtung anpassen. Dies wird einerseits mithilfe des linken Pedals (siehe Kapitel 2.4) als auch mit dem Schließen des Deckels erreicht. Bei Betätigung des linken Pedals wird der Pegel, anders als beim rechten Pedal, tonlagenunabhängig um 1 dB verringert. Schließt man zusätzlich den Deckel des Flügels so wird der Klang erneut um weitere 2 dB gedämpft, wodurch bei sehr leisem Spiel ein tonlagenunabhängiger Minimalpegel von 88 dB erreicht werden kann. Wird statt der oben angenommen zweistimmigen Tonleiter ein Einzelton gespielt, so kann es zu Klangerzeugungen kommen, die den Wert von 65 dB nicht überschreiten. (Meyer 2015, S. 88)

Bei normalem Spiel werden häufig mehr als zwei Tasten gleichzeitig betätigt, was das Schallaufkommen weiter erhöht. Für das vollgriffige Spiel lässt sich daher unter der Inbezugnahme der in diesem Kapitel erläuterten Prozesse ein Dynamikraum von 45 dB nennen. (Meyer 2015, S. 88)

Neben der offensichtlichen Auswirkung auf die Lautstärke des vom Flügel emittierenden Tons hat die Dynamik zusätzlich Einfluss auf die Anregung der Teiltöne, was sie direkt am klangfarbenbildenden Prozess teilhaben lässt. Der Grund für diese Einflussnahme wurde bereits in Kapitel 2.3 erläutert, als die Auswirkung verschiedener Härtegrade der Hämmer auf die Bildung von Teiltönen beschrieben wurde. Zur Erinnerung: Bei größerer Anschlagshärte kommt es zu einer gesteigerten effektiven Härte des Hammers und damit zu einer stärkeren Anregung der Teiltöne. Für das Klangspektrum bedeutet dies eine Erhöhung der Teiltöne im Frequenzraum um 3000 Hz von 2-2,5 dB, sobald sich der Pegel um 1 dB erhöht. Eine Schließung des Deckels dämmt diesen Effekt etwas ein, indem vor allem die hochfrequenten Anteile des Klangs um ca. das Doppelte im Vergleich zum stärksten Teilton dämpft. (Meyer 2015, S. 88)

3.4 Zeitlicher Verlauf des Klangs

Burred verweist in seiner Veröffentlichung über die Akustik eines Klaviers auf die signifikante Rolle der Zeitstruktur bei der Beschreibung eines Instruments und ihrer damit einhergehenden Notwendigkeit. Für den Fall des Klaviers beschreibt er dabei eine zweiteilige Zeitstruktur, was er als „Double Decay“ bezeichnet. Dabei lässt sich der Klang eines Klaviers in einen „Direktklangbereich“ mit schneller Abklinggeschwindigkeit und in einen „Resonanzbereich“ mit langsamer Abklinggeschwindigkeit einteilen. (J. Burred 2009, S. 26)

Bezieht man diese auf den Klang einer ungedämpften Saite, was eine Beobachtung von ca. 10 s ermöglicht, so kommt es zu Beginn des Klangs zu einem schnellen Pegelabfall, gefolgt von einer langsamer stattfindenden Pegelabsenkung (Meyer 2015, S. 98). Für den Fall einer kurz angeschlagenen Note, ohne die Betätigung der Anhebung der Dämpfer durch das rechte Pedal, reicht für die Abklingzeit die Betrachtung des Direktklangbereiches aus (Meyer 2015, S. 90).

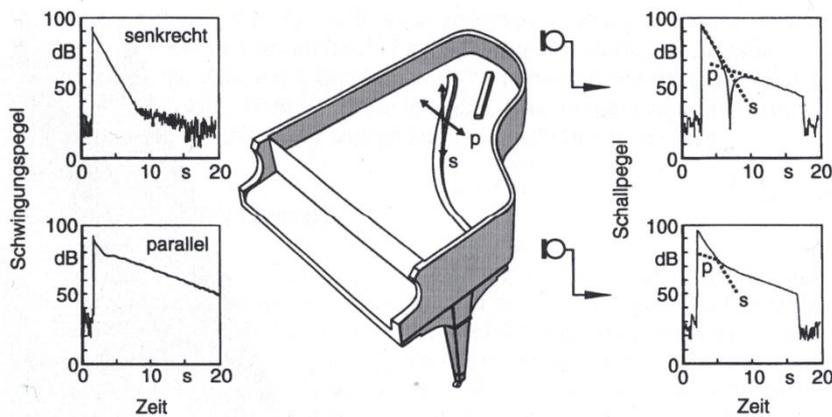


Abbildung 4: Ausschwingverhalten eines Flügels, links: Resonanzbodenschwingung in zwei Ebenen, rechts: abgestrahlter Schall an zwei Mikrofonpositionen (Meyer 2015, S. 44)

Um diesen Zustand zu erklären, betrachtet man die Schwingungsformen der durch den Hammer-Saiten-Kontakt angeregten Saite. Für den ersten Teil, dem „Direktklangbereich“, ist die senkrechte Saitenschwingung verantwortlich. Durch kürzere Abklingzeit prägt sie vor allem den Initialteil und bestimmt den Verlauf der Zeitstruktur im ersten Teil des Klangs (siehe *Abbildung 4* links). Der darauffolgende Resonanzbereich wird dabei vor allem der zum Resonanzboden parallellaufenden horizontalen Schwingung zugeschrieben. (siehe *Abbildung 4* links) (Weinreich 1977, S. 1480) Aufgrund des größeren Widerstands des Resonanzbodens in horizontaler Richtung wird die Energie nur langsam übertragen, was in einer langen Abklingzeit resultiert (Meyer 2015, S. 90). Diese beiden Entwicklungen lassen sich als zwei Linien darstellen, dessen Überschneidungspunkt die Grenze zwischen den beiden Teilbereichen des Klangs zeigt (siehe *Abbildung 4* rechts) (Weinreich 1977, S. 1479).

Besonders interessant für diese Arbeit ist dabei die Positionsabhängigkeit des Übergangspunktes zwischen Direktbereich und Resonanzbereich. Wie man anhand der beiden rechten Teilbilder der *Abbildung 4* erkennen kann, kommt es zum hinteren Ende des Flügels zu einer Verzögerung des Übergangs von Direktklangbereich zu Resonanzbereich. Die Dauer der einzelnen Phasen ist dabei von der Tonhöhe des angeschlagenen Grundtons abhängig. Dabei kommt es mit steigender Tonhöhe zu einer Verkürzung der Abklingzeit. Betrachtet man dabei das Verhalten des Direktklangs genauer, lässt sich eine Verlängerung der Anfangsnachklingzeit von 0,6 – 1,4s in den hohen Lagen zu Werten um 3s in der mittleren Lage erkennen. In den tiefen Lagen gewinnt besonders die Nachklingzeit

an Bedeutung für den Klavierklang. Dabei kann es in den tiefen Lagen im Durchschnitt zu Nachklingzeiten von 20s kommen, während in den hohen Lagen Nachklingzeiten von 2-3s auffindbar sind. (Meyer 2015, S. 90–92)

Aufgrund der Signifikanz der Teiltöne in Bezug auf die Bildung der Klangfarbe lohnt sich an dieser Stelle die Untersuchung der Teiltöne im Kontext der Zeitstruktur des Klavierklangs. Auch hier gilt eine kürzere Abklingzeit der höheren Teiltöne, bedingt durch die stärkere Absorption der hohen Frequenzen in der Luft. Die unteren Teiltöne befinden sich dahingegen fast ausschließlich im Direktklangbereich im hörbaren Bereich. Dies liegt an der höheren Hörschwelle der tiefen Frequenzen, wodurch sich diese zum Zeitpunkt des Resonanzbereiches schon nicht mehr im Bereich der Hörschwelle befinden. Mit steigender Frequenz der Teiltöne wird auch deren Repräsentation im Resonanzklang konkreter, wodurch die mittleren Teiltöne in diesem Bereich deutlich vertreten sind. (J. Burred 2009, S. 30–31)

4 Grundlagen der Schallabstrahlung

4.1 Resonanzboden

Der Resonanzboden hat eine zentrale Rolle in der Klangbildung des Flügels. Er generiert durch seine Eigenschwingung Veränderungen im Luftdruck und wirkt damit wie ein Lautsprecher für die über ihm aufgespannten Saite. (Giordano 2010, S. 363). Dies ist notwendig, um die relativ schwach abgegebenen Wellen der Saiten merklicher hörbar zu machen. Der Resonanzboden ist aus Fichtenholz gefertigt und im Falle des Flügels waagrecht im Korpus verbaut (Giordano 2016, S. 89). Betrachtet man ihn von oben, so lassen sich zwei Stege erkennen, welche die Diskanten Saiten, im Falle des zweiten Stegs die Basssaiten, mit dem Resonanzboden verbinden. Untersucht man den Resonanzboden hingegen von unten, so lassen sich diagonale Streben, welche die Steifigkeit des Resonanzbodens erhöhen sollen und damit die Klangqualität verbessern, auffinden. (Giordano 2016, S. 91)

Durch die Verbindung der Saite zum Resonanzboden werden beim Saitenanschlag dessen Schwingung mithilfe des Stegs auf den Resonanzboden übertragen und dieser dadurch zum Schwingen angeregt. Durch diesen Vorgang transformiert er die mechanische Energie der Saiten über den Steg in die vom Resonanzboden abgegebene akustische Energie. (Fletcher und Rossing 1991, S. 322)

Die Frequenz des Tons, dessen Stärke und die Position der Betrachtung des Resonanzbodens haben Einfluss auf den Grad der Verformung des Bodens. Ähnlich wie die Saite hat der Boden eigene Schwingungsmoden, angefangen mit der sogenannten „Atmungsmode“ der fundamentalen Mode des Resonanzbodens. Bei dieser Mode untergeht die gesamte Oberfläche des Bodens einer einfachen Auf- und Abbewegung. (Giordano 2016, S. 93)

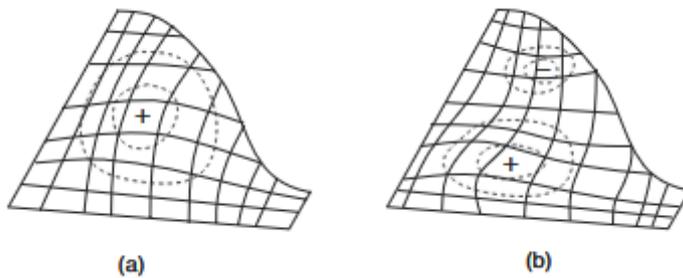


Abbildung 5: Erste und zweite Eigenmode des Resonanzbodens (Giordano 2016, S. 95)

In *Abbildung 5 a)*, ist neben der zentralen Ausbreitung der ersten Mode des Resonanzbodens (der Atmungsmode), die Limitierung dieser Bewegung durch die Aufhängung im Korpus des Flügels sichtbar. Die Frequenz der Atmungsmode ist von der Größe des Instruments abhängig und liegt bei klassischen Flügeln im Bereich um 75 Hz. (Giordano 2016, S. 94). Die zweite Eigenmode wird in *Abbildung 5 b)* dargestellt und weist bereits eine zweite gegenläufige Bewegung auf. Dabei steht der Resonanzboden zwischen den beiden gegensätzlichen Bewegungen still und bildet damit einen sogenannten Knotenpunkt. Das + und - weist in der Abbildung auf die vertikale Ausbreitungsrichtung der Resonanzbodenschwingung hin. (Giordano 2010, S. 364).

Diese Knotenpunkte kommen vor allem unter Bezugnahme der Stege auf, da der Resonanzboden in diesem Bereich sehr steif ist und eine Verformung durch die Struktureigenschaften der Stege schwerfällt. Für die Ausbreitung der sechsten Eigenmode bedeutet das bereits eine Bildung von kleinen Verformungen im Bereich geringerer Steifheit des Resonanzbodens zwischen Steg und Aufhängung am Korpus. (Giordano 2016, S. 95)

Beobachtet man weitere Eigenmoden bei immer höher werdenden Frequenzen, so lässt sich folgende Regelmäßigkeit erkennen: Mit höher werdender Frequenz erhöht sich die Anzahl der positiven und negativen Verformungen im Resonanzboden und damit die Anzahl der präsenten Eigenmoden. (Giordano 2010, S. 365)

Aber wie beeinflusst diese Bewegung des Resonanzbodens den Klang und besonders das Abstrahlverhalten des Flügels?

Dieser Sachverhalt ist äußerst komplex und beruht im Grunde auf zwei Eigenschaften des Resonanzbodens:

- 1) Er schwingt an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich schnell, dabei steht die Geschwindigkeit der Bodenschwingung im direkten Verhältnis zu Stärke des produzierten Klangs. Je schneller also die Bewegung des Resonanzbodens, umso bedeutender fällt die Verstärkung des Klangs aus. (Giordano 2016, S. 99)
- 2) Die Form der Moden ist frequenzabhängig, was den Aspekt der Schallverstärkung und Abstrahlung durch den Resonanzboden in starke Abhängigkeit zur gespielten Frequenz setzt. Durch diese Eigenschaften lässt sich schlussfolgern, dass die Stärke und Art der Verstärkung des Resonanzbodens von der Stärke und Frequenz abhängig ist, welche die Saite über den Steg auf den Boden abgibt. (Giordano 2016, S. 99)

Einen Durchbruch in der Erforschung dieser Eigenmoden des Resonanzbodens hat Hideo Suzuki schon 1986 erreicht. In seiner Veröffentlichung beschreibt er neben den Eigenmoden auch den Einfluss dieser auf das Frequenzspektrum. Er erforschte dazu die Intensität der unterschiedlichen Moden bis zu einer Frequenz von 5 kHz. (Suzuki 1986, S. 1577)

Dabei hat er folgende Muster erkannt:

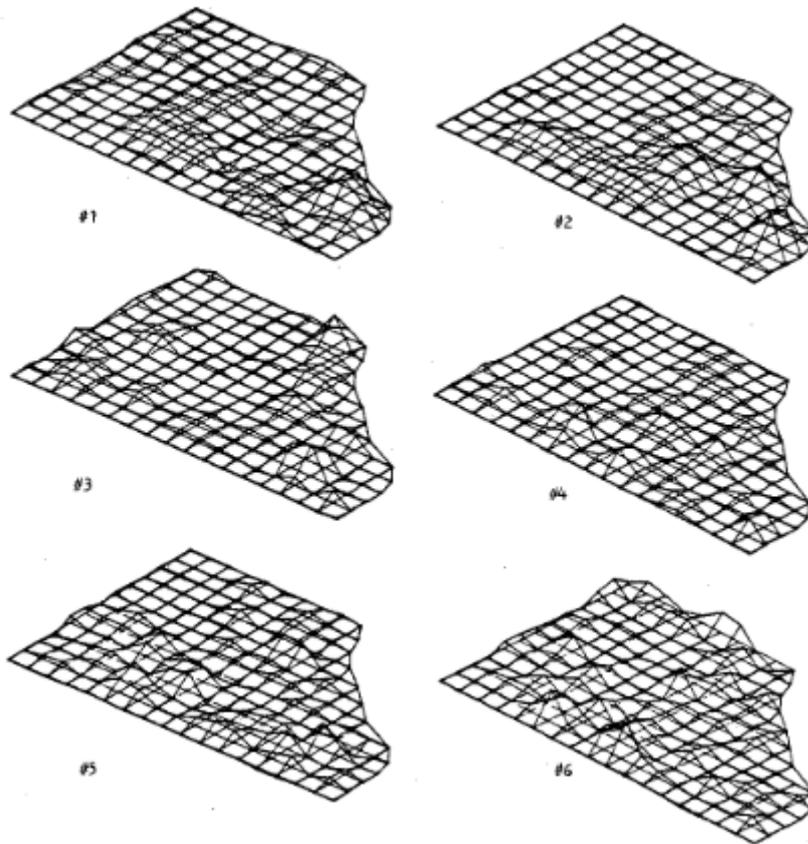


Abbildung 6: relative Intensitätsmuster des Resonanzbodens bei 254 Hz (#1), 307 Hz (#2), 348 Hz (#3), 375 Hz (#4), 412 Hz (#5) und 493 Hz (#6) (Suzuki 1986, S. 1577)

Mithilfe der in *Abbildung 6* dargestellten Intensitätsmuster der Resonanzbodenschwingung stellt Suzuki die mit höher werdender Frequenz komplexer werdenden Schwingungsmuster des Resonanzbodens dar. Für das Abstrahlverhalten des Instruments bedeutet dies mehrere Orte mit unterschiedlicher Abstrahlintensität, wessen Lage und Form in direktem Zusammenhang zur gespielten Frequenz stehen. (Suzuki 1986, S. 1578)

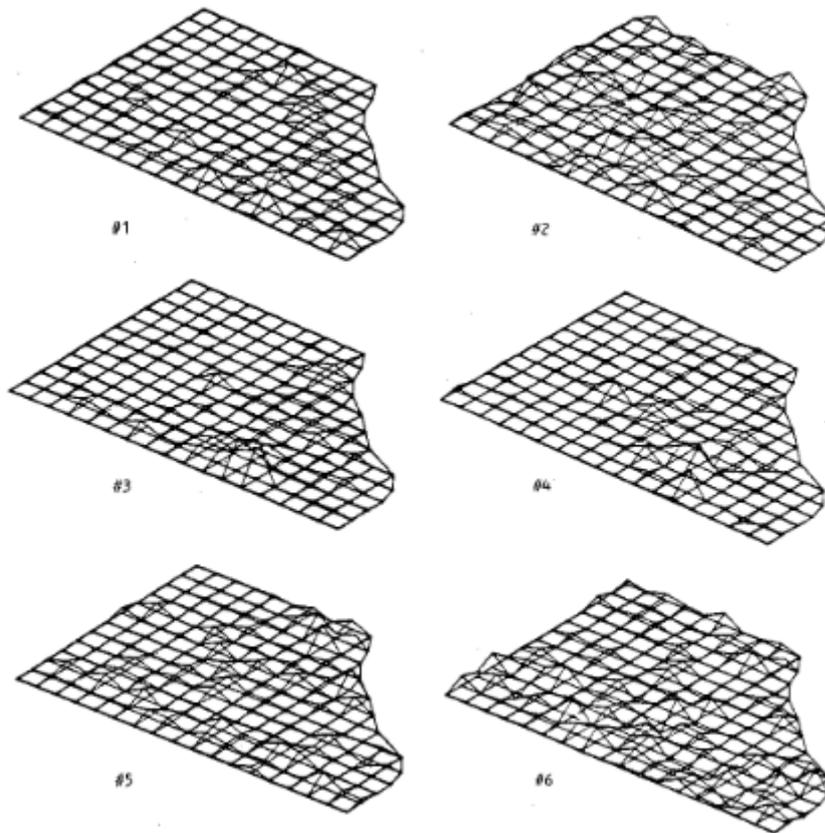


Abbildung 7: relative Intensitätsmuster des Resonanzbodens bei 2.64 kHz (#1), 2.91 kHz (#2), 3.67 kHz (#3), 3.95 kHz (#4), 4.61 kHz (#5) und 4.99 kHz (#6)

Die Bereiche mit negativer Intensität verringern sich mit weiter steigender Frequenz, was eine starke Abstrahleffizienz der höheren Frequenzen zufolge hat. Dies sieht man präzise bei der Betrachtung der Intensitätsmuster in *Abbildung 7*. Für die Frequenzen unterhalb von 80 Hz kann aufgrund der Summierung des durch den Resonanzboden nach oben und unten abgegebenen Schalls, keine Richtwirkung gemessen werden. Im Bereich von 100 – 600 Hz kommt es nach Suzuki zu einer besonders stark ausgeprägten Abhängigkeit von Abstrahleffizienz und Frequenz. (Suzuki 1986, S. 1578–1579)

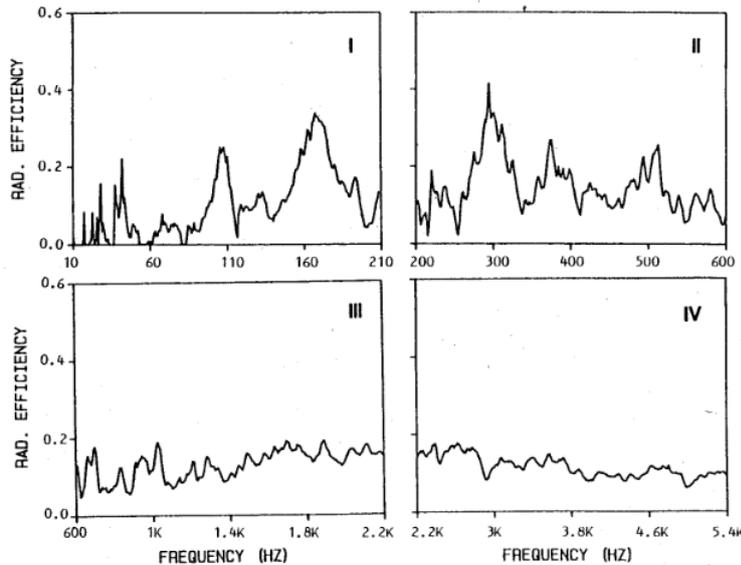


Abbildung 8: Abstrahleffizienz für 4 Frequenzbereiche (Suzuki 1986, S. 1579)

Bewertet man den dritten Graphen der *Abbildung 8* für den Bereich oberhalb von 200 Hz, so lässt sich diese Abhängigkeit der Abstrahleffizienz und Frequenz bis in den Bereich von 1,2 kHz erkennen. Den darauffolgenden Raum von 1 -4 kHz definiert er zusammenfassend als Übergangsbereich von mäßig effizienter zu sehr effizienter Schallabstrahlung. Das Resultat der oben angesprochenen Komplexität der Schwingungen ab 200 Hz, wird hier im Graph 2 in *Abbildung 8* in Form der Ausbildung von mehreren Peaks deutlich. (Suzuki 1986, S. 1581)

4.2 Korpus

Alle bisher beschriebenen Mechaniken und Bauteile eines Flügels befinden sich im sogenannten Korpus samt seinem verstellbaren Deckel. Entgegen der Wichtigkeit des Korpus für die strukturelle Integrität des Instruments besitzt es keine große Bedeutung für die Schallabstrahlung (Richardson 2011, S. 109). Dabei kommt es am Rand des Korpus lediglich für hohe Frequenzen zu einer Abschottung der abgegebenen Schallwellen. Tiefe Frequenzen haben aufgrund ihrer hohen Wellenlänge keine Probleme, sich um dieses Hindernis herumzubiegen (Meyer 2015, S. 132) Der Deckel spielt dagegen eine entscheidendere Rolle für die Schallabstrahlung des Flügels. An ihm werden die von der Oberseite des Resonanzbodens verstärkten Schallwellen in Richtung der Zuhörer*innen reflektiert. (Giordano 2016, S. 103).

Dies ist vor allem bei hohen Frequenzen aufgrund deren kleineren Wellenlänge und der dadurch nicht vorhandenen Fähigkeit sich, um den Deckel herumbeugen zu

können, der Fall (Meyer 2015, S. 132). Zusätzlich übernimmt der Deckel eine entscheidende Funktion in Bezug auf die phasenbedingte Auslöschung tiefer Frequenzen, welche aufgrund der Reflektion der vom Resonanzboden nach unten abgegebenen Schallwellen, auftreten. Durch die Reflektion des nach oben abgegeben Schalls durch den Deckel wird der Auslöschung der tiefen Frequenzen entgegengewirkt. (Giordano 2016, S. 103)

5 Vorbereitung und Methodik der Analyse

Für die Arbeit der Tonschaffenden ist in Bezug auf die Aufnahme vor allem die Position der Mikrofone interessant. Besonders im Bereich der akustischen Klassikproduktion kann der größte Teil der späteren Klangqualität bereits bei der Auswahl der Mikrofone und deren Position festgelegt werden. Beim Klavier, einer der populärsten und bekanntesten Instrumente der akustischen Musik, ist dies nicht anders. So verwundert es nicht, dass es hier schon früh zur Forschung in diesem Bereich kam (siehe Meyer 2015, S. 132–135). Bei der Recherche nach neueren Arbeiten über diese Thematik bin ich lediglich auf vereinzelte wissenschaftliche Arbeiten gestoßen, die sich meist auf die mathematische Modellierung, welche die dem Flügel zugrundeliegenden akustischen Eigenschaften beschreiben, fokussiert haben. Es fehlte eine verständliche, aber trotzdem detaillierte Ausarbeitung, welche den Aspekt der Verwendbarkeit für die Arbeit von Tonschaffenden berücksichtigt.

5.1 Forschungsfrage

Um diese Lücke zu schließen, behandelt der Forschungsteil dieser Arbeit die Beantwortung folgender Forschungsfrage:

„Wie verändert sich der Klang und hierbei besonders die Klangfarbe, eines Konzertflügels in Abhängigkeit zur Position der Mikrofone für das Anwendungsfeld der akustischen Musikproduktion“

Um dies zu beantworten, wird ein Array aus mehreren Mikrofonen, deren Position sich an bisher gängigen Aufnahmebereichen orientiert, ausgewertet und auf ihre Veränderungen in der Klangfarbe und Intensität untersucht. Es sollen Regelmäßigkeiten und Veränderungsmuster herausgearbeitet werden, welche die Auswahl einer geeigneten Mikrofonposition für akustische Flügelaufnahmen unter Bezugnahme der gewünschten Klangfarbe vereinfachen.

5.2 Methodik

Grundlage der Analyse stellt eine Aufnahme eines klassischen Stücks aus 28 verschiedenen Mikrofonpositionen dar. Die für die Aufnahme verwendeten Mikrofone stehen in einem Array mit weitestgehend gleichen Abständen zueinander. Im Original sind diese als AB Paare mit einer Basisbreite von 55 cm konfiguriert. In der horizontalen Ebene stehen diese Paare jeweils in einem Abstand von 50 cm zueinander, was die Anordnung aller Mikrofone in eine Matrix aus verschiedenen Mikrofonpositionen ermöglicht. Dabei beträgt der Abstand der obersten Ebene zum Boden 320 cm. Für jede weitere Ebene darunter verringert sich die Höhe um weitere 40 cm. Die genaue Positionierung der Mikrofone sowie die im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen der Ebenen können der nachstehenden Abbildung entnommen werden:

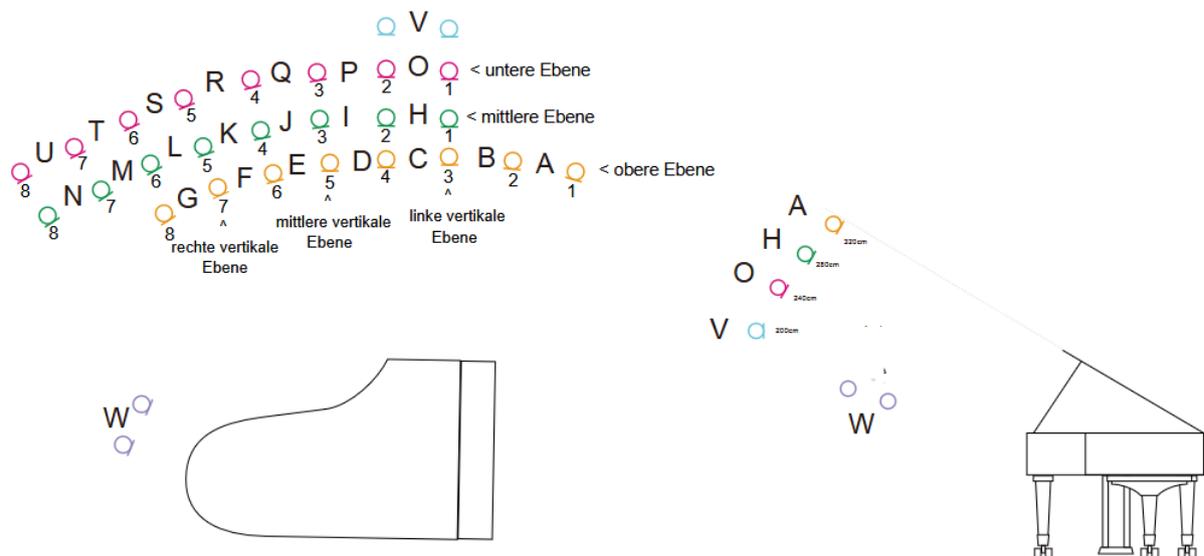


Abbildung 9: Mikrofonpositionen der Aufnahme des Steinway & Sons D247 (Nagae et al. 2022a)

Nach der Entkopplung der Signale aus dem A-B Stereophonie Verbund lagen 28 verschiedene Mono-Audiodateien vor, welche im Anschluss auf ihr jeweiliges Frequenzspektrum analysiert wurden. Dabei wurde für den Ausschnitt des Stücks die Frequenzverteilung für 1024 diskrete FFT-Stellen über die Länge der Aufnahme mithilfe einer Fast Fourier Transformation berechnet und in Form einer Tabelle mit den Werten für jedes Band gespeichert.

Bei einer subjektiven Hörprobe ausgewählter Mikrofonposition wurden die wahrgenommenen Klangfarbenveränderungen beschrieben und in einer Tabelle

festgehalten. Diese Höranalyse wurde ebenfalls von einer kleinen Auswahl von musikalischen und tontechnischen Fachleuten durchgeführt und mit den Höreindrücken des Autors verglichen, um einen allgemeingültigeren Konsens zu bilden. Diese Nutzung einer Probandengruppe soll nicht den Eindruck einer wissenschaftlichen Studie erzeugen, sondern gilt in diesem Fall mehr als Mittel der Konsensfindung für die subjektive Beschreibung der Höreindrücke.

Für die Aufnahme jeder Mikrofonposition wurde das Frequenzspektrum unter Bezugnahme der sogenannte „Bark-Skala“ untersucht. Dabei handelt es sich um eine psychoakustische Skala welche den Frequenzbereich von 20 Hz – 15 kHz in 24 kritische Frequenzbänder einteilt. Die Bandbreite der Bänder orientiert sich dabei am frequenzabhängigen Auflösungsvermögen von Lautstärkeunterschieden des menschlichen Gehörs. Im unteren Frequenzbereich ist sie zu großen Teilen linear, da wir hier große Lautstärkeunterschiede zwischen den Frequenzen wahrnehmen können. Sie entwickelt sich mit steigender Frequenz aufgrund einer kleiner werdenden Unterscheidbarkeit verschiedener Lautstärken im hochfrequenten Bereich zu einer logarithmischen Skala. (Fastl und Zwicker 2007, S. 158–159)

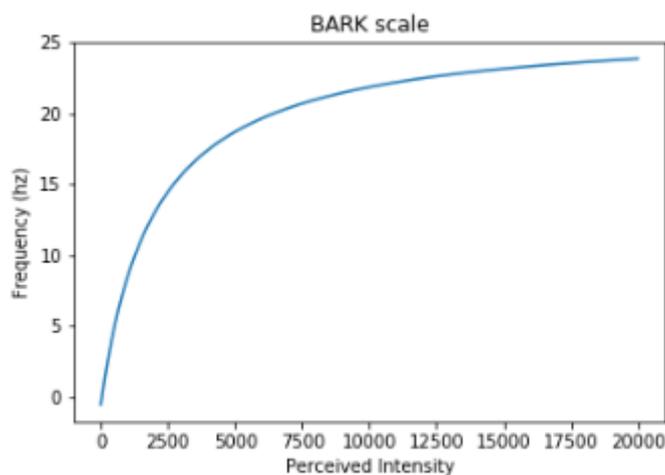


Abbildung 10: Verhältnis der wahrgenommenen Lautstärke in Abhängigkeit der Bark-Bänder (Abdullah et al. 2021)

Der Graph in *Abbildung 9* zeigt die Unterschiede der Lautheitswahrnehmung in Abhängigkeit zur Frequenz (hier hin Form der Bark-Bänder), welche die Grundlage der Bark-Skala darstellt. In der folgenden Tabelle werden die 24 Bänder mit ihrer zentralen Frequenz, der oberen und unteren Grenze sowie der daraus resultierenden Bandbreite angegeben:

Number	Center frequencies Hz	Cut-off frequencies Hz	Bandwidth Hz
1	50	100	80
2	150	200	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8500	9500	1800
23	10 500	12 000	2500
24	13 500	15 500	3500

Tabelle 2: Werte der Bark-Skala (Zwicker 1961, S. 248)

Bei der in dieser Arbeit durchgeführte Messung wurde die mittlere Frequenz des 1. Bandes von 50 Hz auf 60 Hz angepasst, damit liegt sie genau in der Mitte des 1. Bark-Bandes. Da die Bandbreite der Bark-Bänder die entscheidende Größe ist, verfälscht diese Anpassung das Ergebnis nicht (Zwicker 1961, S. 248). Durch die genannten Beobachtungen konnten die Veränderung der allgemeinen Klangfarbe für jede der 3 Ebenen bestimmt und aufgetretene Regelmäßigkeiten innerhalb der Ebenen visuell und numerisch dargestellt werden.

Nach der Analyse der horizontalen Ebene wurde dieselbe Methodik für die Erforschung der Unterschiede in drei ausgewählten vertikalen Ebenen angewandt.

5.3 Informationen zum Ausgangsmaterial

Die Gegenstände dieser Analyse, die Aufnahmen des Flügels, stammen aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Nagoyaj University of the Arts, der Universität der Künste Berlin und der Tokyo University of the Arts mit dem Titel „Research on microphone arrangement in the grand piano recording: In search of a musical suitable timbre“ (Nagae et al. 2023). Im Rahmen dieses Projekts wurden mehrere Stücke sowie eine chromatische Skala, gespielt und auf sechs verschiedenen Flügeln aus mehreren Positionen aufgenommen. Bei der in dieser Arbeit benutzten Aufnahme handelt es sich um die 5. Klaviersonate von Alexander Nikolajewitsch Skrjabin (Op. 53) gespielt auf einem Steinway & Sons D274 (Nagae et al. 2022b). Bei der Produktion kamen 25 Schoeps MK 2H zum Einsatz, bei denen

es sich um Kleinmembran Kondensatormikrofonen mit Kugelcharakteristik handelt (Nagae et al. 2022b). In Bezug auf den Frequenzgang des Mikrofons lässt sich bis auf eine Anhebung ab 7 kHz ein linearer Frequenzgang erkennen (MK 2H | Microphone capsule | SCHOEPS Microphones 2025). Diese Anhebung der hohen Frequenzen sollte bei der Betrachtung der folgenden Auswertung beachtet werden.

Auch die Wahl des Flügels spielt für die Auswertung eine Rolle, da selbst innerhalb desselben Herstellers klangliche Unterschiede aufgrund verschiedener baulicher Begebenheiten, bestehen können. Diese Unterschiede haben, wie im Grundlagenteil dieser Arbeit bereits beschrieben, starken Einfluss auf die klanglichen Eigenschaften des Flügels.

6 Auswertung und Analyse der Messungen

6.1 Subjektive Höreindrücke

Bei der Auswertung fielen an manchen Stellen deutlich unterschiedliche Beschreibungen der einzelnen Mikrofonpositionen auf, welche die Bildung eines Konsenses bei der Klangfarbenbeschreibung erschwert haben. Die hier folgende Tabelle stellt daher lediglich die überschneidenden Eindrücke der befragten Personen dar:

A helle Klangfarbe, wenig Wärme höhenbetont, wenig Bässe,	B wärmerer Klang, überbetonte Mitten, definierte Tiefen	C heller Klang, mittlenbetont, unpräzise tiefen	D dezent höhen	E dunkler Klang, wenig Brillanz,	F spitzer drahtiger Klang, viel Brillanz, starker Höhenanteil	G blecherner Klang, mittlen- und höhenbetont,		
		H ausgewogener Klang, leicht mittlenbetont,	I präzise Höhen, mittlen und tiefen fallen ab	J Tiefen fehlen, matschige Mitten, spitzere Höhen	K brillanter Klang, Betonung der oberen Mitten und Höhen,	L mittlenbetont, Räumlichkeit nimmt ab	M Warmer Klang, satter Bass,	N drahtiger Klang, Tiefen dezenter
		O Heller Klang, präzenter Bass,	P indirekter Klang, mittlenbetont, satter Bass,	Q warmer Klang, geringe Höhen, satter Bass	R drahtiger Klang, starke Mitten, wenig Tiefen	S dunkle Klangfarbe, mittlenbetont, präzise Tiefen,	T ausgewogener Klang, präzise Tiefen	U dunkler Klang, wenig Höhen, starke Tiefen

Tabelle 3: Auswertung der Höreindrücke

Bei erster genereller Betrachtung fällt die Unterschiedlichkeit der wahrgenommenen klangfarblichen Eigenschaften zwischen benachbarten Mikrofonen auf. Dabei kommt es zwischen einzelnen Mikrofonen zu deutlich hörbaren Veränderungen. Trotz dieser hohen Varianz lassen sich einige

Regelmäßigkeiten herausarbeiten, welche die Höreindrücke dominiert haben. An dieser Stelle sollte jedoch hinzugefügt werden, dass bei der Höranalyse vor allem dominante Klänge herausstechen. Wird ein Frequenzbereich nicht explizit genannt stellt dies in diesem Fall keine absolute Abwesenheit dieses Bereiches dar.

In Bezug auf die Beschreibung der Höhen lässt sich ein genereller Abfall der gehörten Intensität zur Mitte hin erkennen. Dabei kommt es lediglich im Falle der obersten Ebene zu einem erneuten Anstieg zum rechten Rand hin. In der mittleren Ebene wird eine deutliche Präsenz der Höhen nur noch in der linken Hälfte des Arrays wahrgenommen. Dieser Trend verschärft sich in Bezug auf die unterste Ebene, in der Bereits an 3. linksseitiger Position eine deutlich verringerte Intensität der hohen Frequenzen zu hören ist. Die vertikale Entwicklung des Höhenbereichs lässt sich daher vor allem durch einen zum rechten Rand hin stärker werdenden Abfall bei geringer werdender Höhe charakterisieren.

Der Mittenbereich unterliegt deutlichen Schwankungen, was eine Aussage über die übergeordnete Entwicklung sehr schwer macht. Für die oberste Ebene lässt sich trotzdem eine zunehmende Abnahme der Intensität zur Mitte hin erkennen. Für die beiden unteren Ebenen herrscht eine durchgehende Präsenz des Mittenbereichs mit wechselnder Intensität zwischen benachbarten Mikrofonpositionen. Diese hier hörbare große Varianz auf einem kleinen Raum lässt die Vermutung einer hohen Positionsabhängigkeit des Mittenbereichs aufkommen. Für die vertikale Ebene lässt sich eine meist gleichbleibende Intensität aufzeigen.

In der obersten Ebene gleicht sich der Bass in der rechten Hälfte des Arrays der Entwicklung des Mittenbereichs an, was eine Intensitätszunahme zum rechten Rand hin bedeutet. Dies resultiert für den mittleren Bereich der oberen Ebene aufgrund der fehlenden Höhen in einem dunklen Klang. Für die mittlere Ebene lässt sich ein Abfall zur Mitte hin erkennen, was eine höhere Präsenz der tiefen Frequenzen zu den Rändern hin schlussfolgern lässt. In der untersten Ebene kommt es bis auf eine kleine Ausnahme in der Mitte des Arrays zu einer durchweg präsenten Bassabbildung. Als zusätzlich nennenswerte Entwicklung sollte an dieser Stelle der starke Unterschied der obersten beiden Ebenen in vertikaler Richtung erwähnt werden

Höreindrücke sind äußerst subjektiv und werden unter anderem von Abhörsystem und -situation beeinflusst. Um die hier erkannten positionsabhängigen Muster zu

überprüfen, kommt es im Anschluss zu einer visuellen und numerischen Auswertung der Messwerte der einzelnen Mikrofonpositionen

6.2 Horizontale Ebenen

Zur besseren Veranschaulichung wurden die 24 Bänder erneut in sieben Frequenzbereiche eingeteilt, welche sich an der im tontechnischen Arbeitsalltag gebräuchlichen Einteilung orientieren (Jeff Smoot, VP für Apps Engineering und Motion Control bei Same Sky 2021). Jedes Diagramm zeigt dabei die Werte der dem Frequenzbereich zuordbaren Bark-Bänder von der 1. Mikrofonposition links bis zur 8. Mikrofonposition rechts auf (siehe *Abbildung 10* in Kapitel 5.2). Da sich diese Arbeit hauptsächlich an Fachleute der Tonproduktion wendet, wird hier die Position der Zuschauer*innen, wie bei klassischen Aufnahmen üblich, zur Beschreibung des Arrays eingenommen. Für den Fall des Flügels bedeutet dies eine Positionierung der Klaviatur zum linken Rand des Arrays.

Dabei soll ebenfalls beachtet werden, dass zur besseren Lesbarkeit und Vergleichbarkeit der Graphen innerhalb eines Frequenzbereichs die Skalierung der y-Achse an die Werte des Bereichs angepasst wurden. Kommt es dadurch zu einer Verzerrung der Ergebnisse beim Vergleich zwischen verschiedenen Frequenzbereichen, so wird dies in der schriftlichen Auswertung unter den Abbildungen benannt.

6.2.1 Auswertung der oberen Ebene

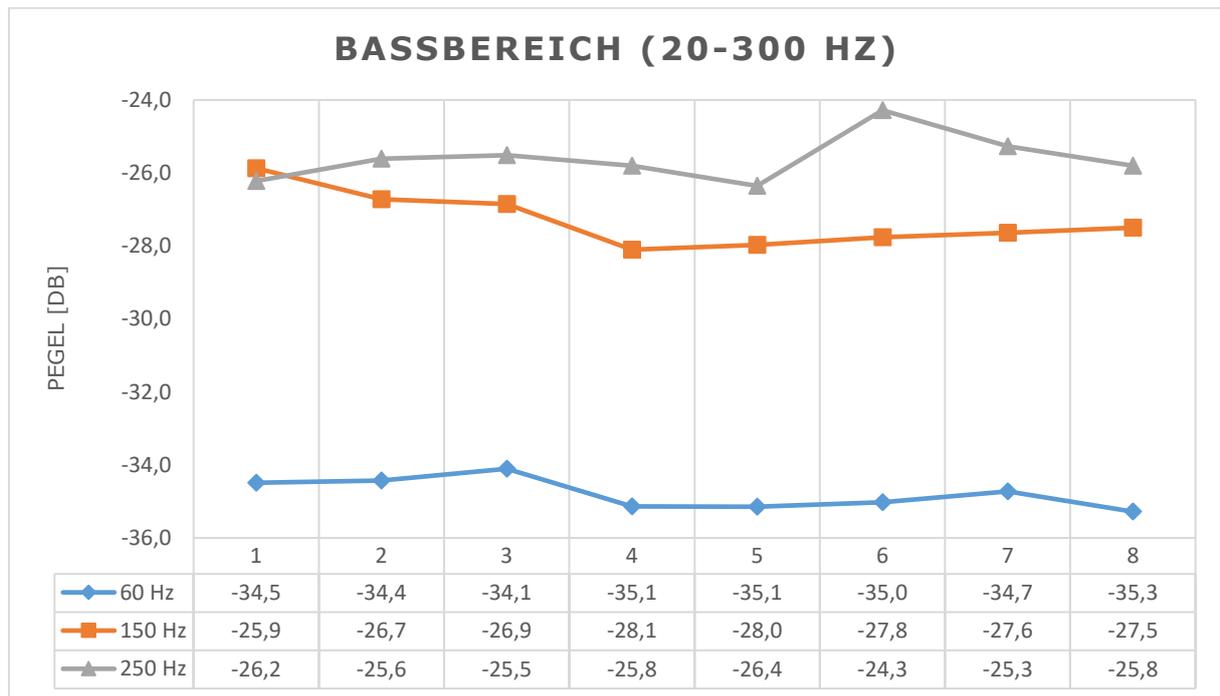


Abbildung 11: obere Ebene – Bassbereich (20-300 Hz)

Im Bassbereich von 20 – 300 Hz (siehe *Abbildung 11*) geben die ersten drei Bark-Bänder über die Stärke der Positionen in diesem Bereich Auskunft. Betrachtet man dabei die übergeordnete Entwicklung über die Breite der oberen Ebene des Mikrofonarrays, so lässt sich zunächst ein deutlicher Unterschied in der Grundlautstärke zwischen den Bändern bei 150 Hz bzw. 250 Hz und dem tiefsten Band bei 60 Hz erkennen. Dabei liegen die Werte für das 60 Hz-Band bis zu 11 dB unter dem der anderen Bänder dieses Frequenzbereichs. In Bezug auf die generelle Form der Entwicklung lässt sich eine Ähnlichkeit zwischen dem 60 Hz und 150 Hz Band erkennen. Beide haben ihr Minimum bei Position 4 und verhalten sich um diesen Minimalwert herum relativ linear. Lediglich ein sich von Position 1 bis 4 erstreckender Pegelabfall von 2,2 dB im 150 Hz Band bricht aus dieser Regelmäßigkeit aus. Im 250 Hz Band sticht vor allem ein Anstieg des Pegels von 2,1 dB beim Übergang von Mikrofonposition 5 zu 6 heraus. Nach dieser Maximalstelle erholt sich die Kurve wieder zum äußeren rechten Rand des Arrays und damit auch die Stärke dieser Frequenz für die Mikrofonpositionen.

Zusammenfassend gilt daher ein grundsätzlicher Pegelabfall des Bassbereichs vom linken Ende zur Mitte hin. Ab diesem Punkt kommt es in Richtung des rechten Randes des Arrays zu einem flachen Anstieg in allen Bändern sowie einem Peak im 250 Hz Band.

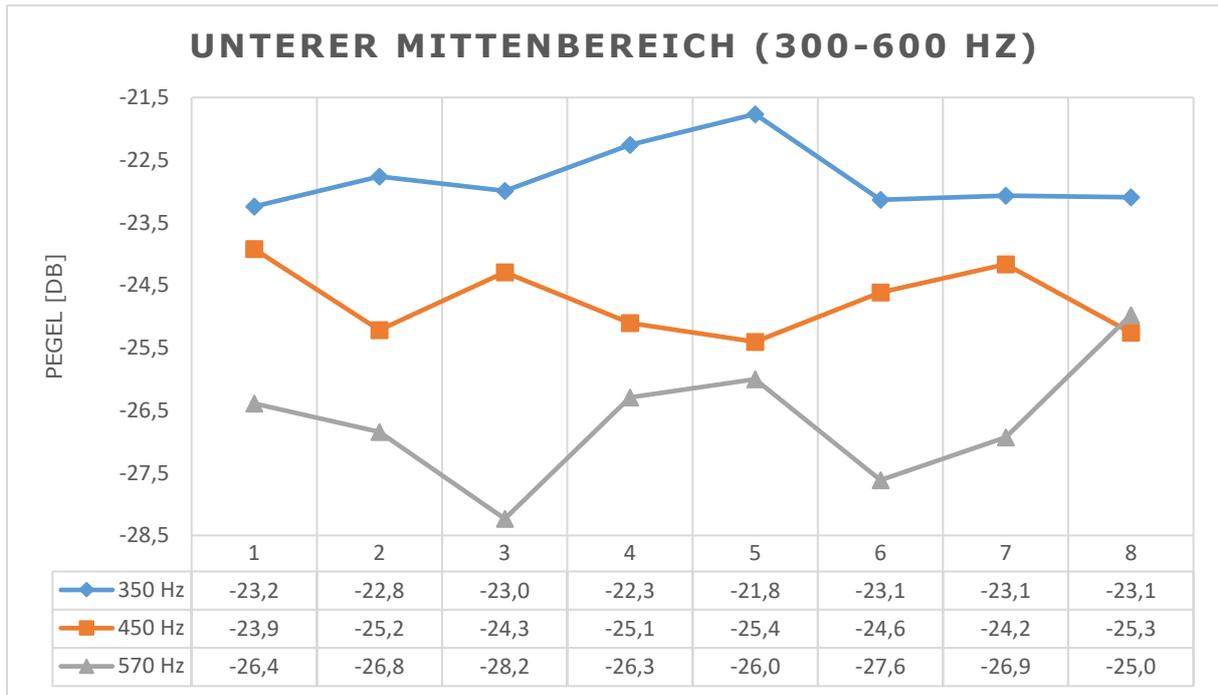


Abbildung 12: obere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Auf den ersten Blick wirken die Veränderungen im unteren Mittenbereich deutlich stärker als noch im Bassbereich zuvor (siehe *Abbildung 12*). Betrachtet man jedoch die Werte der Anstiege und Abfälle, stellt man fest, dass es zwar zu mehr Bewegung zwischen den Mikrofonpositionen kommt, diese aber durchschnittlich geringer ausfallen als noch im Bassbereich zuvor. Nichtsdestotrotz zeugt die Komplexität der Kurven von einer erhöhten Positionsabhängigkeit der Stärke der verschiedenen Bark-Bänder in diesem Bereich. Betrachtet man die Entwicklung der verschiedenen Bänder genau, so fällt im Falle des 350 Hz-Bandes ein Maximum bei Position 5 auf. Dabei kommt es zu einem stetigen Anstieg von 1,2 dB ab Position 3 bis zum Maximum, bevor sich der Pegel zur 6. Position hin wieder zum ursprünglichen Level normalisiert. Betrachtet man die Verläufe des 450 Hz und 570 Hz Bandes ab der 2. Mikrofonposition, so lässt sich eine kontrastierende Bewegung zwischen den beiden Bändern bis zum rechten Rand erkennen. Besonders sichtbar wird dies an Position 3 bei der wir im 450 Hz Band einen Anstieg von 0,9 dB erkennen können, während das 570 Hz Band einen sogar noch deutlicheren Pegelabfall von 1,3 dB aufweist. Nach einer Annäherung der beiden Bänder zur Mitte hin, können wir eine ähnliche Entwicklung ab der 6. Mikrofonposition erkennen. Hier ist lediglich der Minimalwert des Pegelabfalls um eine Stelle im Vergleich zum Maximalwert des 450 Hz Bandes verschoben.

Für den unteren Mittenbereich lässt sich aufgrund der sehr unterschiedlichen Entwicklungen in den korrespondierenden Bark Bändern eine erhöhte Positionsabhängigkeit feststellen. Dass die Entwicklungen der 450 Hz und 570 Hz Bänder nahezu gespiegelt verlaufen, deutet auf eine „Umkehrfrequenz“ im Bereich um 500 Hz hin, bei der die Unterschiede der Mikrofonpositionen zueinander sehr gering sein müssen.

Dem Mittenbereich lassen sich in der Bark-Skala sieben Bänder zuordnen, welche in dieser Arbeit auf zwei Abbildungen aufgeteilt wurden. Die erste deckt dabei den Bereich von 600 Hz – 1200 Hz ab.

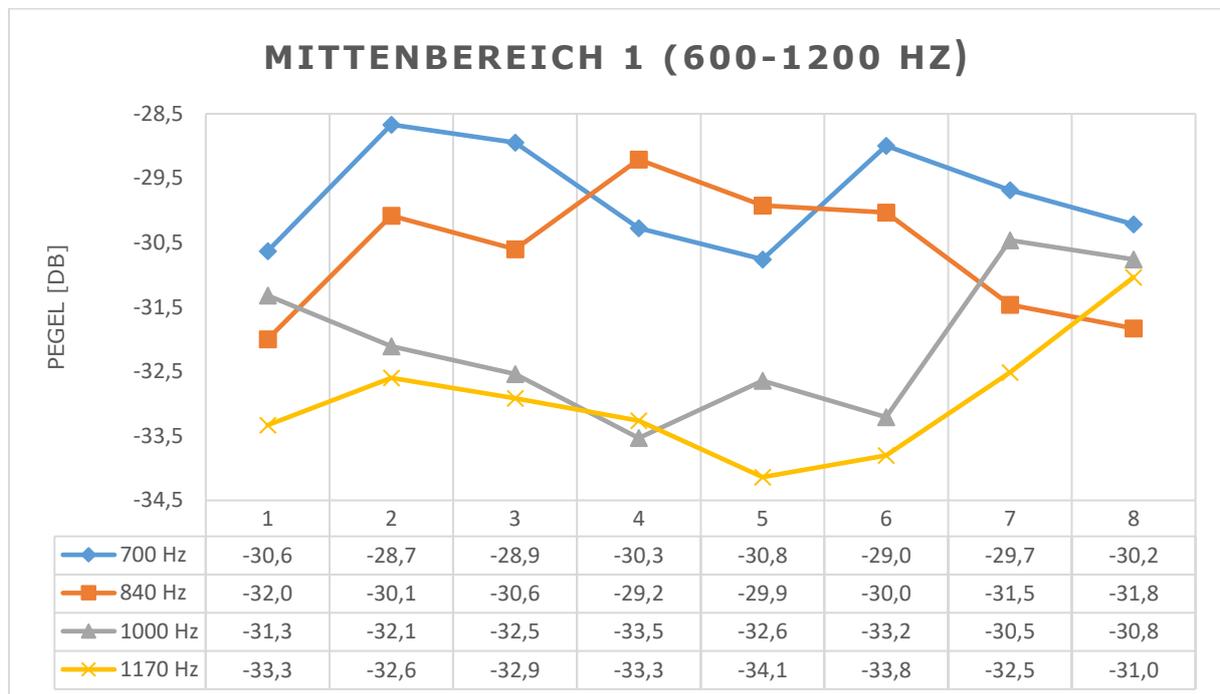


Abbildung 13: obere Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)

Auch in *Abbildung 13* lässt sich auf den ersten Blick eine weitestgehend kontrastierende Entwicklung zwischen dem 840 Hz Band und den höheren Bändern bei 1000 Hz bzw. 1170 Hz erkennen. Dabei kommt es an mehreren Orten zu Kontaktpunkten der verschiedenen Bänder, was auf eine deutlich engere Lage der Bänder in Bezug auf deren Energie schließen lässt. Der Verlauf des 700 Hz Bandes ähnelt bis auf den deutlichen Abfall von 1,9 dB ab Position 3 bis 5 dem nächstliegenden 840 Hz Band sehr. Betrachtet man das 840 Hz Band genauer, so lässt sich dessen Entwicklung gut mit der Form einer Glocke beschreiben. Vom linken bzw. rechten Rand zur Mitte beträgt die Anhebung des Pegels 2,8 dB und lässt damit auf eine deutliche Präsenz dieses Frequenzbandes in der Mitte des Arrays schlussfolgern. Bewegt man sich in Richtung des nächsthöheren

Frequenzbandes, so wird der bereits beschriebene kontrastierende Charakter im Bereich von 600 – 1200 Hz deutlich. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Kurven gleichen die Entwicklungen der 1000 Hz bzw. 1170 Hz Bänder mehr einer Wanne, was durch einen Pegelabfall zur Mitte hin erkennbar wird. Besonders zu nennen sei hier allerdings der deutlich stärkere Anstieg ab der Mitte zum rechten Rand. Dieser fällt besonders im 1170 Hz Band mit einer Steigung von 3 dB ab Position 5 im Vergleich zum 1,5 dB Pegelabfall ab Position 2 auf. Die Abweichungen dieses Trends bei Position 1 für das 1170 Hz Band und bei Position 5 im 1000 Hz Band sind aufgrund ihres vergleichsweise geringen Ausmaßes von durchschnittlich 0,8 dB zu vernachlässigen, da die allgemeine Entwicklung in diesem Band durch die oben beschriebenen Eigenschaften überwiegen.

Auch in diesem Band lässt sich eine *Umkehrfrequenz* bei 900 Hz erkennen. Oberhalb dieser kann der Bereich von 600 – 1200 Hz durch ein Pegelanstieg zur Mitte, gefolgt von einer Rückbewegung zum Ausgangspegel beschrieben werden. Dabei sollte jedoch das Minimum im 700 Hz Band nicht vernachlässigt werden. Für den Bereich oberhalb von 900 Hz lässt sich ein Pegelabfall im mittleren Bereich des Arrays aufzeigen. Bei weiterer Bewegung zum rechten Rand kommt es allerdings zu einer deutlichen Steigerung der Repräsentation dieses Frequenzbereiches im Gesamtklang.

Die zweite Abbildung für den Mittenbereich deckt den Bereich von 1200 – 2000 Hz ab

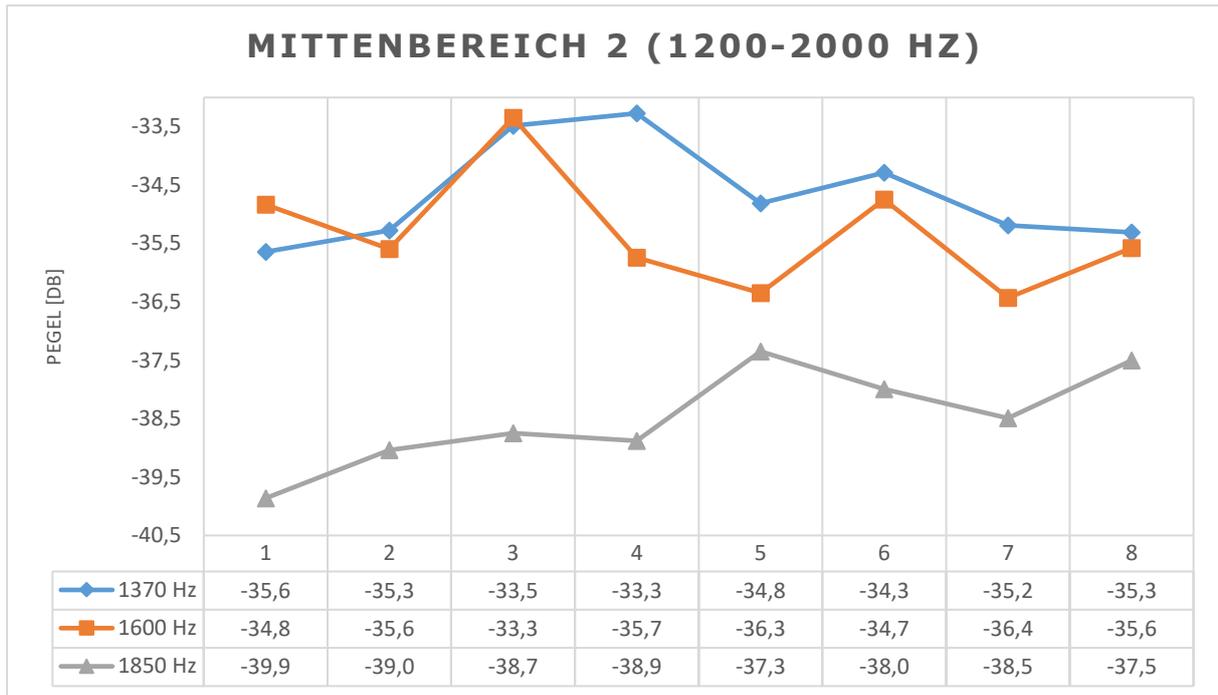


Abbildung 14: obere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)

In diesem Frequenzbereich (siehe Abbildung 14) ist vor allem die energetische Nähe des 1370 Hz und 1600 Hz Bandes in den Randbereichen des Mikrofonarrays auffällig. Im Vergleich zum bisher beobachteten generellen Abstieg des grundlegenden Pegels des Bark-Bandes deutet dieser Zustand auf eine starke Repräsentation des 1600 Hz Bandes im linken Bereich des Mikrofonarrays hin. Besonders sind in diesem Band die Maximalstellen bei 3, mit einem vorherigen Anstieg von 2,3 dB sowie bei 6, mit einer Erhöhung um 1,6 dB, zu nennen. Im Bark-Band mit der zentralen Frequenz von 1370 Herz lässt sich eine ähnliche Entwicklung erkennen, dabei hat es im Vergleich zum 1600 Hz Band im mittleren Bereich aufgrund des leicht versetzten Maximalwerts einen deutlich weniger ausgeprägten Pegelabfall von 1,5 dB zwischen Position 4 und 5. Das Bark-Band um 1850 Hz lässt sich generell als konstante Steigerung des Pegels von links nach rechts beschreiben, lediglich ein Peak bei der 5. Mikrofonposition mit einem vorherigen Anstieg um 1,5 dB ist in diesem Band nennenswert.

Im Bereich von 1200 – 2000 Hz lässt sich mit steigender Frequenz eine Bewegung des Schwerpunkts zur rechten Hälfte des Arrays aufzeigen, wobei hier vor allem das 1850 Hz Band beteiligt ist. Für die tieferen Frequenzen gilt eine gute Repräsentation in der linken Hälfte des Arrays, welche vor allem durch den Peak im 1600 Hz Band und dem bauchigen Verlauf um 1370 Hz entsteht.

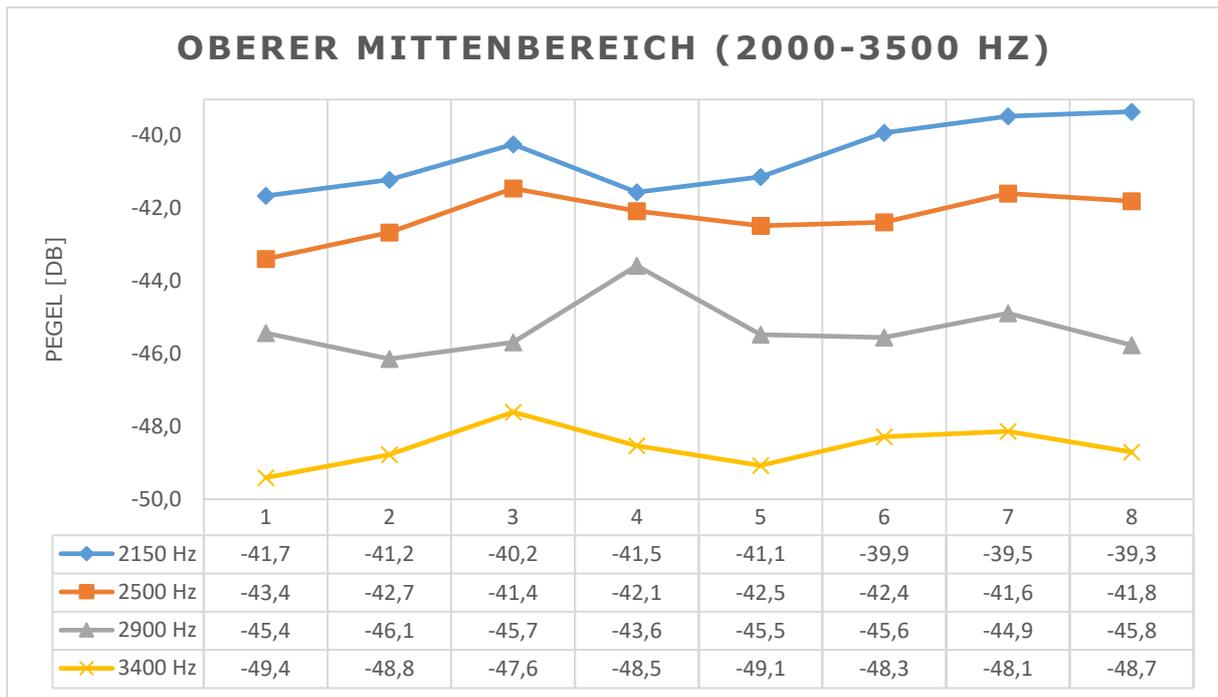


Abbildung 15: obere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Der bereits im Bassbereich erkannte lineare Abfall zwischen den Grundpegeln der einzelnen Bark-Bänder kommt ab 2000 Hz wieder deutlicher hervor (siehe Abbildung 15). Auch die Komplexität der einzelnen Kurven geht im Vergleich zum Mittenbereich deutlich zurück, was auf eine geringere Positionsabhängigkeit im oberen Mittenbereich schließen lässt. Dabei ähneln sich die Verläufe der 2150 Hz, 2500 Hz sowie 3400 Hz Bark-Bänder deutlich. Alle drei besitzen ihren ersten Maximalwert an 3. Mikrofonposition, welchem ein durchschnittlicher Anstieg von 1,8 dB ($\pm 0,2$ dB) vorangeht. Während im 2500 Hz und 3400 Hz Band ein gemeinsamer stetiger Pegelabfall über zwei Mikrofonposition (3-5) hinweg erkennbar wird, weist der Graph im 2150 Hz Band auf eine deutlich schnellere negative Bewegung innerhalb einer Mikrofonposition (3-4) hin. Auch der erneute Anstieg des Pegels zum äußeren rechten Rand verläuft im tiefsten Band dieser Frequenzgruppe deutlich steiler und verzichtet gänzlich auf den bei den restlichen Vertretern dieser Gruppe sichtbaren leichten Abfall zur letzten Mikrofonposition. Die Entwicklung im 2900 Hz Band sticht unter der ansonsten ähnlichen Bewegung der anderen Bänder im oberen Mittenbereich mit seinem markanten Peak bei der 4. Mikrofonposition deutlich heraus. Umgeben wird dieser Peak von einer linksseitigen kurvenartigen Zunahme von 2,5 dB ab Mikrofonposition 2 und einer anschließenden Pegelabnahme um 2 dB bis Mikrofonposition 6.

Für den Bereich von 2000 Hz – 3500 Hz lässt sich eine durch fast alle Bark-Bänder gleichmäßiges Bewegungsmuster erkennen. Besonders ist dabei der Schwerpunkt an der 3. Position sowie ein vorangehender Anstieg und anschließender Abfall zu beachten. Ebenso bedeutsam für die klangfarbliche Entwicklung in der oberen Ebene ist der in der Mitte beginnende und sich bis zum rechten äußeren Rand ausstreckende Anstieg des hohen Mitteltonbereichs. Es kann jedoch aufgrund des Peaks im 2900 Hz Band an Position 3 zu Resonanzen für einige Frequenzen in diesem Bereich kommen.

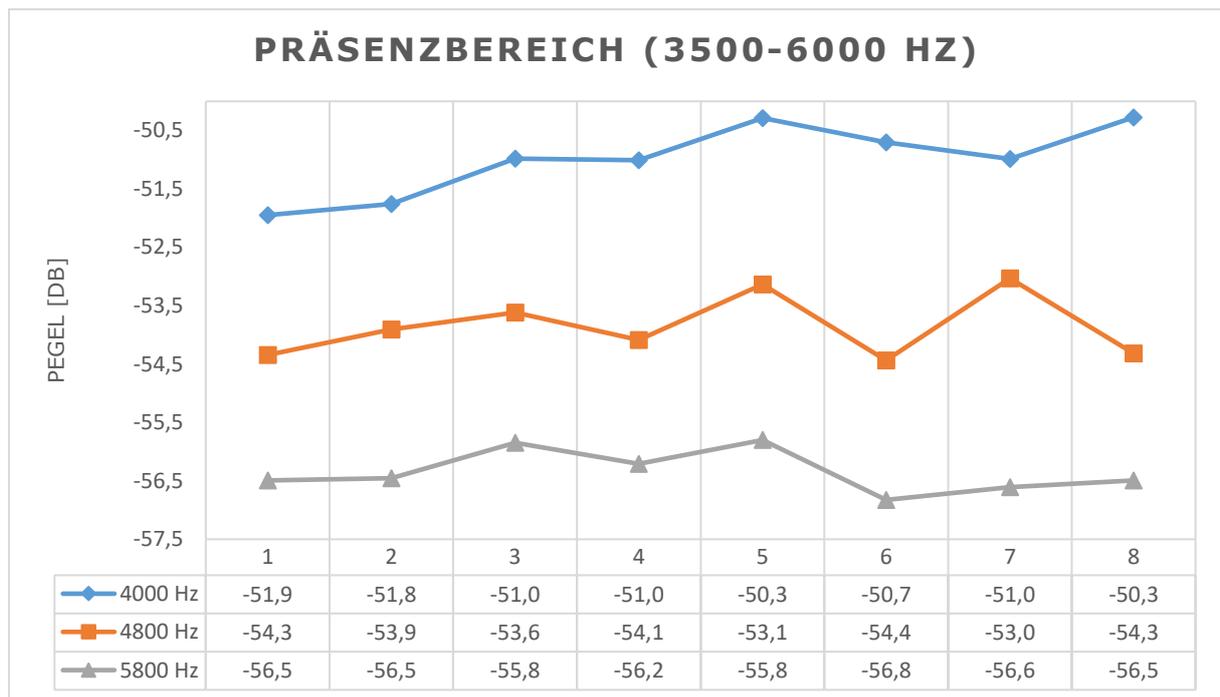


Abbildung 16: obere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Die Bark-Bänder mit der zentralen Frequenz von 4000 Hz, 4800 Hz sowie 5800 Hz, zu sehen in *Abbildung 16* lassen sich in den sogenannten Präsenzbereich von 3500 Hz bis 6000 Hz einordnen. Bei einer ersten Betrachtung wirken die Entwicklungen des 4000 Hz und 5800 Hz Bandes sehr ähnlich und bilden zusammen einen Rahmen für das zwischen beiden eingeschlossene 4800 Hz Band. Vor allem in der linken Hälfte des Mikrofonarrays unterscheiden diese sich bis auf den Grad ihrer Steigung nur gering. Untersucht man den weiteren Verlauf der beiden Bänder von der Mitte zum rechten Rand, fällt ein plötzlicher Pegelabfall von 1 dB im 5800 Hz Band bei der Bewegung von 5. zu 6. Mikrofonposition auf. Eine sich zum rechten Randbereich hin entwickelnde Spreizung der beiden ansonsten ähnlich verlaufenden Frequenzbänder, welche damit das mittlere Band um 4800 Hz zwischen sich einschließen, stellt das Resultat dar. Die Entwicklung dieses

Bandes ist ebenfalls durch eine markante Veränderung ab der Mitte des Arrays charakterisiert. Besonders die 2 Peaks bei den Mikrofonpositionen 5, mit einem Anstieg von 1 dB sowie an Mikrofonposition 7, mit einem um 1,3 dB angehobenen Pegel, stechen in dessen Verlauf heraus.

Die erhöhte Komplexität des 4800 Hz Bandes im rechten Bereich des Arrays weist auf eine erhöhte Positionsabhängigkeit für dieses Band im aufgenommenen Mikrofonbereich dar. Interessant ist hier auch, dass sich alle drei Bänder zum selben Zeitpunkt, ab Position 5, aus einer vorherrschend uniformen Bewegung in eine sich voneinander stark unterscheidenden Bewegung entwickelt. Der von zwei Peaks charakterisierte Bereich im 4800 Hz Band wirkt dabei wie eine Reaktion auf die Spreizung der ihn umschließenden Bänder. Für den Verlauf vom linken Rand zur Mitte lässt sich jedoch ein genereller Anstieg des Präsenzbereiches für den Gesamtklang in der oberen Ebene zusammenfassen.

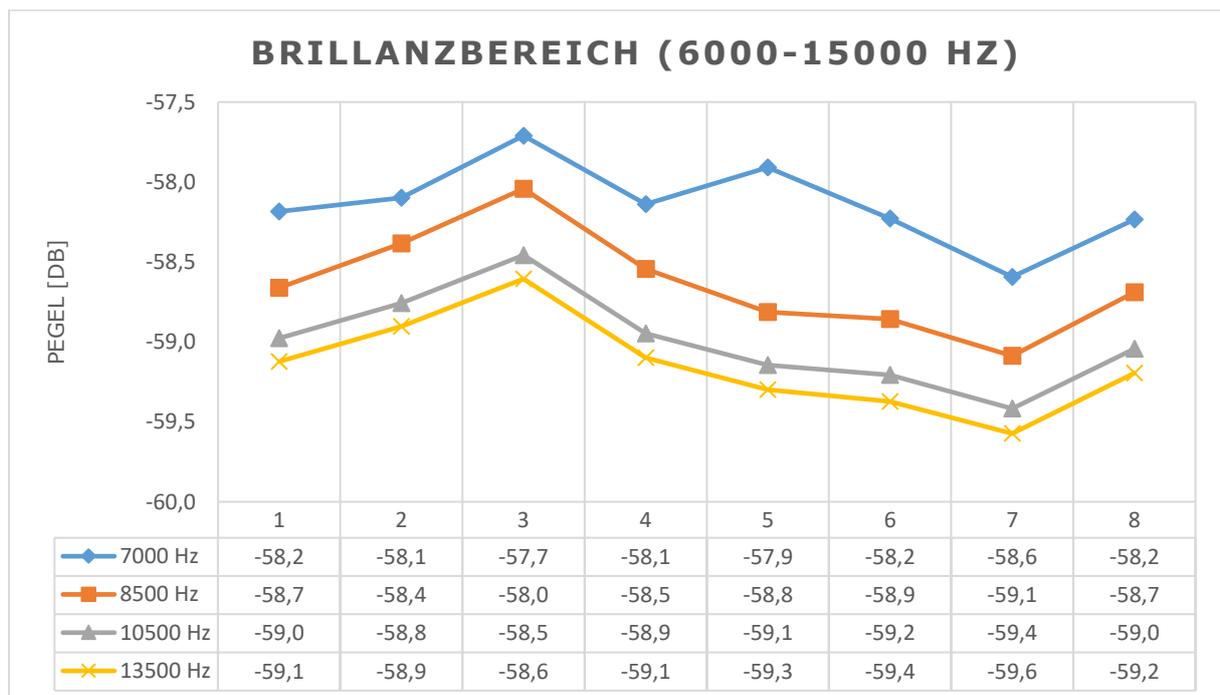


Abbildung 17: obere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Der bisherige Trend, dass mit höher werdender Frequenz die Komplexität der Bänder innerhalb einer Frequenzgruppe abnimmt, lässt sich auch im Brillanzbereich von 6000 Hz - 15000 Hz erkennen (siehe *Abbildung 17*). Dies liegt unter anderem an der immer größer werdenden Bandbreite der Bark-Bänder bei steigender Frequenz, was unserer Messung jedoch zugutekommt, da diese Dimensionierung der Bark-Bänder der Auflösung unseres Gehörs entspricht.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Bark-Skala den Bereich über 15000 Hz nicht mehr abdeckt. Dies ist für die Analyse des Klaviertons jedoch kein Problem, da sowohl die Entwicklung der Graphen in Abhängigkeit zu ihrer Frequenz als auch die Analyse der Werte von 15000 Hz – 20000 Herz nur geringfügige Unterschiede in diesem Bereich aufwiesen.

Die gerade genannte Regelmäßigkeit bezüglich der Graphen bei höher werdenden Frequenzen lässt sich hier bei der gemeinsamen Betrachtung aller vier Bark Bänder (7000Hz, 8500 Hz, 10500Hz und 13500 Hz) aufgrund ihrer Ähnlichkeit zueinander gut beobachten. Bänderübergreifend kann zu Beginn eine Maximalstelle bei der 3. Mikrofonposition mit einer vorangehenden durchschnittlichen Steigung von 0,6dB (+-0,1dB) über 2 Mikrofonpositionen erkannt werden. Ab diesem Punkt kommt es zu einem stetigen Pegelabfall von 1 dB, welcher sich über 4 Positionen bis zur 7. Position entwickelt. Dabei gilt die Eigenschaft der Stetigkeit dieser Entwicklung nicht für das Bark-Band bei 7000 Hz. Ab der Mitte des Mikrofonarrays kommt es im Brillanzbereich zu einem leichten Pegelanstieg von 0,2 dB und zu einem erneuten Peak bei der 5. Mikrofonposition. Dieser stellt die einzige Stelle dar, an der es zu einer Abweichung von der in diesem Bereich allgemein geltenden uniformen Bewegung kommt. Betrachtet man die restliche Entwicklung, so treffen sich die Bänder am Punkt 7 in ihrer ursprünglichen Konstellation und steigen gemeinsam zum rechten Rand hin um durchschnittlich 0,5 dB (+- 0,1dB) an.

Allgemein lässt sich der Brillanzbereich mit einer verstärkten Präsenz zur 3. Mikrofonposition hin charakterisieren. Ab diesem Punkt fällt die Stärke dieser Frequenzgruppe bei linksgerichteter Bewegung auf der oberen Ebene des Mikrofonarrays stetig ab und weist lediglich im letzten Schritt eine leichte Anhebung auf. Es sollte jedoch auf die Resonanz an 5. Mikrofonposition um 7000 Hz geachtet werden.

6.2.2 Auswertung der mittleren Ebene

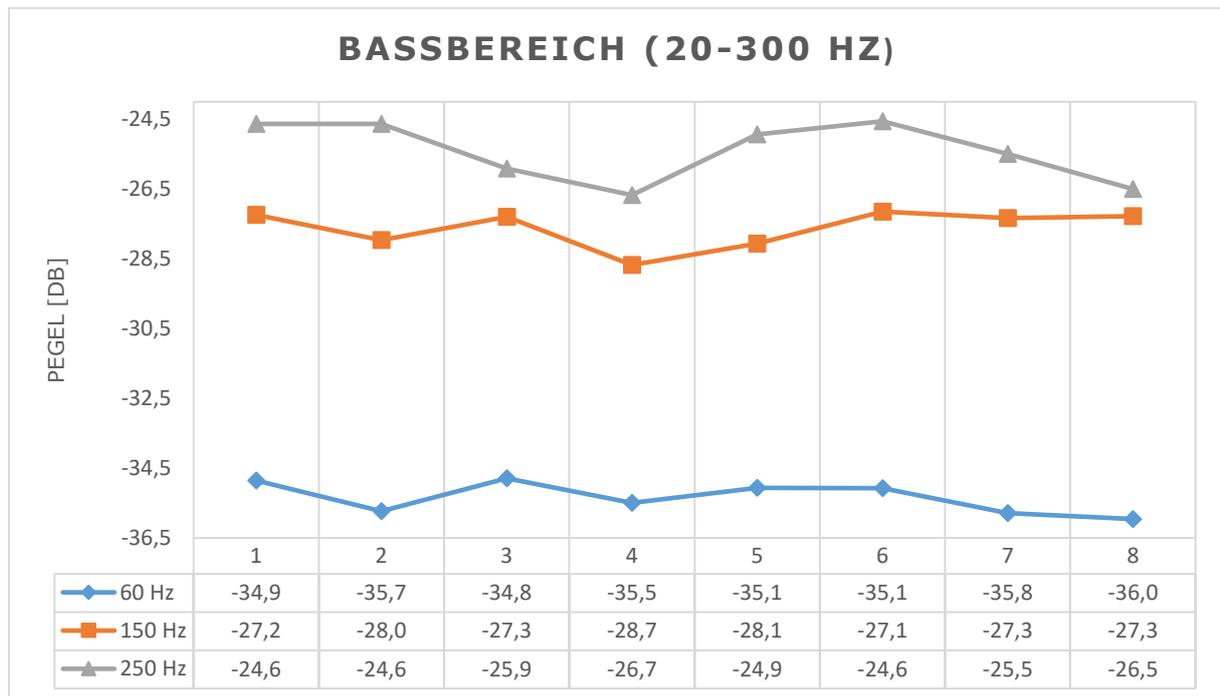


Abbildung 18: mittlere Ebene - Bassbereich (0-300 Hz)

Der bereits in der oberen Ebene aufgetretene geringe Grundpegel des 60 Hz Bandes wird auch hier deutlich sichtbar (siehe *Abbildung 18*). Er liegt im Durchschnitt 6,6 dB unter dem Minimum des 150 Hz Bandes. Neben den beiden Maximalwerten an 1. und 3. Position wird das 60 Hz Band vor allem durch einen Pegelabfall von 0,9 dB ab der 6. Position zum rechten Rand charakterisiert. Den Peak an 3. Position teilt es sich dabei mit dem nächsthöheren Bark-Band bei 150 Hz. Hier wirkt der Maximalwert mit einem Anstieg von 0,7 dB, bei einem sonstigen stetigen Pegelabfall, eher nebensächlich. Das 150 Hz Band lässt sich über die Breite des Arrays mit einer deutlichen Absenkung zur Mitte und stärkerer Repräsentation an den Seiten charakterisieren. Dies wird vor allem durch das Ausmaß des Pegelabfalls von 2,1 dB im Bereich der 2. bis 4. Mikrofonposition deutlich. Auch der darauffolgende Anstieg mit gleicher Steigung weist im Vergleich zum 150 Hz Band auf eine deutlichere Ausprägung des Pegelabfalls zur Mitte hin. Etwas unerwartet kommt bei dem Vergleich die abfallende Entwicklung des 250 Hz Bandes zum rechten Rand. Durch den Pegelabfall von 2,1 dB kommen sich die beiden hochfrequenten Bänder in diesem Bereich energetisch näher.

Für den Bereich von 20 – 300 Hz lässt sich für die mittlere Ebene eine deutliche Entwicklung im mittleren Bereich des Arrays erkennen. Dabei wird die Bildung

einer Senke um die 4. Mikrofonposition herum mit steigender Frequenz immer deutlicher.

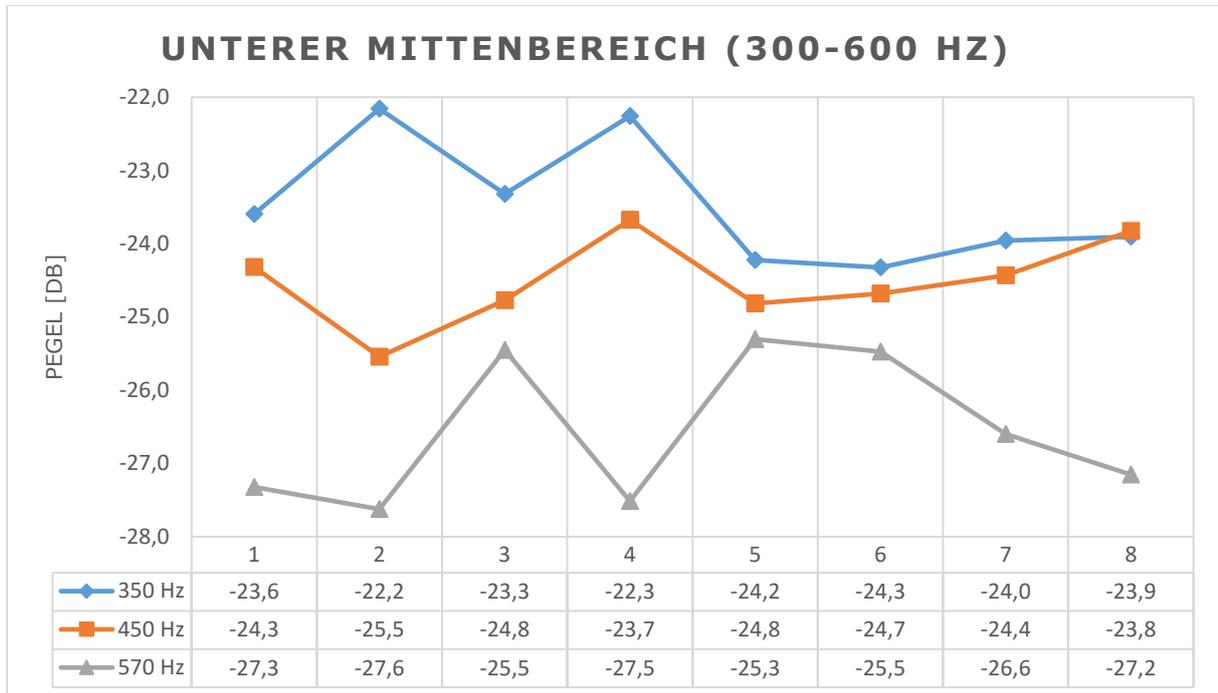


Abbildung 19: mittlere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Auch in der mittleren Ebene, dargestellt in *Abbildung 19*, lässt sich der Trend des Anstiegs der Komplexität mit steigender Frequenz erkennen. Auch wenn die hier angepasste Skalierung der y-Achse den Vergleich zum Bassbereich etwas verfälscht, wird eine stärkere Pegelbewegungen zwischen benachbarten Positionen deutlich. Die Entwicklung des 350 Hz und 570 Hz Bandes wirken dabei konträr zueinander. Während das 350 Hz Band Peaks bei der 2. und 4. Position aufzeigt, weist der Graph des 570 Hz Bandes an denselben Stellen auf einen Minimalwert hin. Im 570 Hz Band bricht lediglich der erste Mikrofonschritt aus der ansonsten starken Bewegung von durchschnittlichen 2,1 dB Abfällen bzw. Anhebungen heraus. Ab der 5. Mikrofonposition kommt es zu einem deutlichen Wechsel in Bezug auf die Komplexität der Entwicklungen der beiden Bänder. Sie nähern sich an, nur um sich dann wieder in zwei entgegengesetzte Richtungen voneinander zu entfernen. Das 450 Hz Band ist von dieser gerade beschriebenen konträren Bewegung eingeschlossen und wirkt wie eine *Umkehrfrequenz* des unteren Mittenbereiches. Für die ersten drei Positionen gleicht es sich der Entwicklung des Minimalwerts im 570 Hz Band an. Ab der 3. Position übernimmt es die Stelle des Maximalwertes des 350 Hz Bandes. Die geradlinige Steigung von 1,8 dB von Position 2 – 4 wirkt dabei wie der Übergang zwischen diesen Angleichungen. Ab

der Mitte verringert sich auch in diesem Band die Komplexität und es lässt sich ein zum rechten Rand entwickelnder kurvenartiger Pegelanstieg von 1 dB erkennen.

Im Bereich von 300 – 600 Hz deuten vor allem die linkseitige starke Komplexität der Graphen auf eine stärkere Positionsabhängigkeit hin. Dabei lässt durch die konträre Bewegung der äußeren Bänder die Existenz einer *Umkehrfrequenz* mit minimaler Positionsabhängigkeit um das 450 Hz Band herum vermuten.

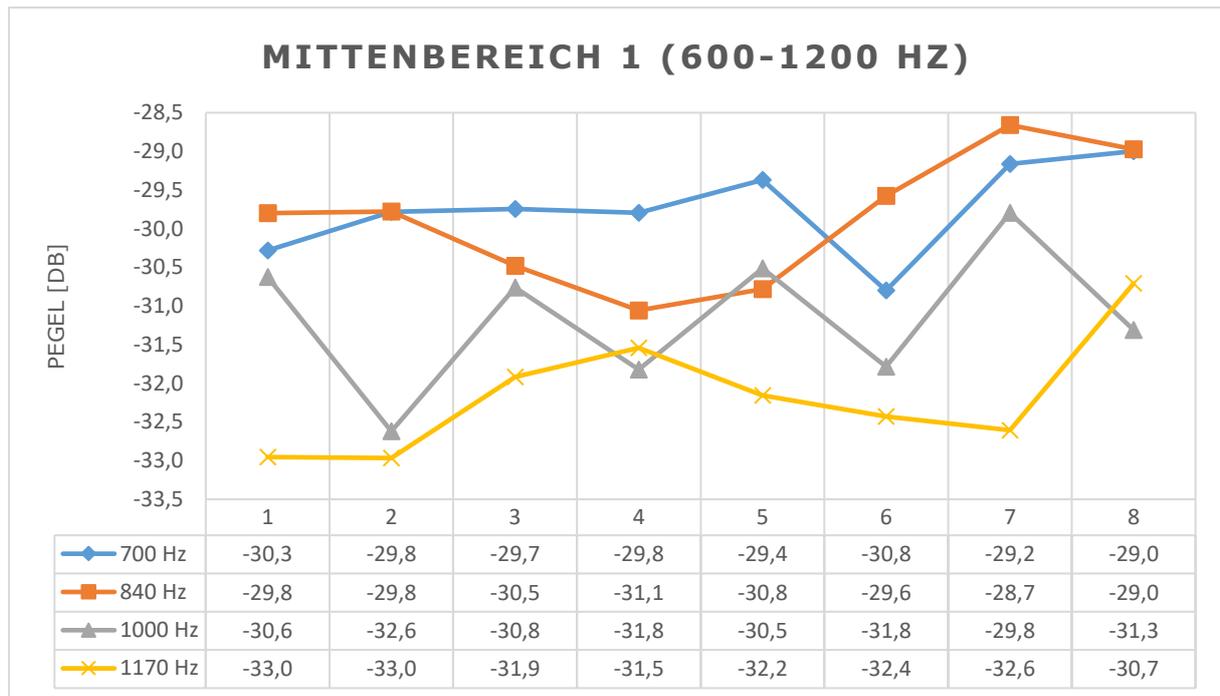


Abbildung 20: mittlere Ebene - Mittenbereich 1 (600 - 1200 Hz)

Der Frequenzbereich von 600 1200 Hz fällt zu Beginn durch eine enge energetische Lage zwischen den Bark-Bändern auf (siehe *Abbildung 20*). Dies wird vor allem durch die kontrastierenden Bewegungen im 840Hz und 1170Hz Band deutlich. Durch den Pegelabfall von 1,3 dB im 840 Hz Band und der dabei entstehenden Senke vom linken Rand zur Mitte hin sowie der Bildung eines Bauchs mit einer vorangehenden Steigung von 1,5 dB im 1170 Hz Band, nähern sich die beiden Bänder zur Mitte hin an. Nach diesem Punkt sticht vor allem ein starker Anstieg von 2,4 dB im 840 Hz Band zum rechten Rand heraus. Auch das Bark-Band um 1170 Hz weist nach einem leichten stetigen Abfall einen plötzlichen starken Anstieg um 1,9 dB zur letzten Mikrofonposition auf. Diese beiden gerade betrachteten Bänder schließen das 1000 Hz Band zwischen sich ein, was vor allem durch seine starken Pegelunterschiede zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen charakterisiert werden kann. Interessant ist dabei jedoch, dass der Grad der Pegelunterschiede zwischen den Peaks zur Mitte hin geringer und an Rändern

stärker wird. Die bisherigen Vertreter in diesem Bereich wiesen stets deutliche Veränderungen zwischen benachbarten Mikrofonpositionen auf. Für das 700 Hz Bark-Band trifft dies jedoch nur für einen plötzlichen Pegelabfall von 1,4 dB zur 6. Mikrofonposition zu. Die restliche Entwicklung in diesem Band weist auf eine weitestgehend konstante Pegelzunahme vom linken zum rechten Rand des Arrays hin.

Durch den hohen Grad an Komplexität der Entwicklungen in diesem Frequenzbereich fällt es schwer, einen übergeordneten Trend für den Bereich von 600 – 1200 Hz herauszuarbeiten. Nimmt man jedoch das 700 Hz Band aus der Betrachtung raus, so lässt sich eine interessante Entwicklung zur Mitte des Arrays erkennen. Ob es sich dabei um eine Zunahme oder Abnahme des Pegels handelt, ist dabei stark frequenzabhängig. Für den Fall, dass der Ort der Betrachtung unter ca. 1000 Hz liegt, kommt es zu einer Anhebung im mittleren Bereich. Liegt die betrachtete Frequenz dagegen über der Umkehrfrequenz von ca. 1000 Hz, so ist eine Pegelzunahme zur Mitte hin zu erwarten.

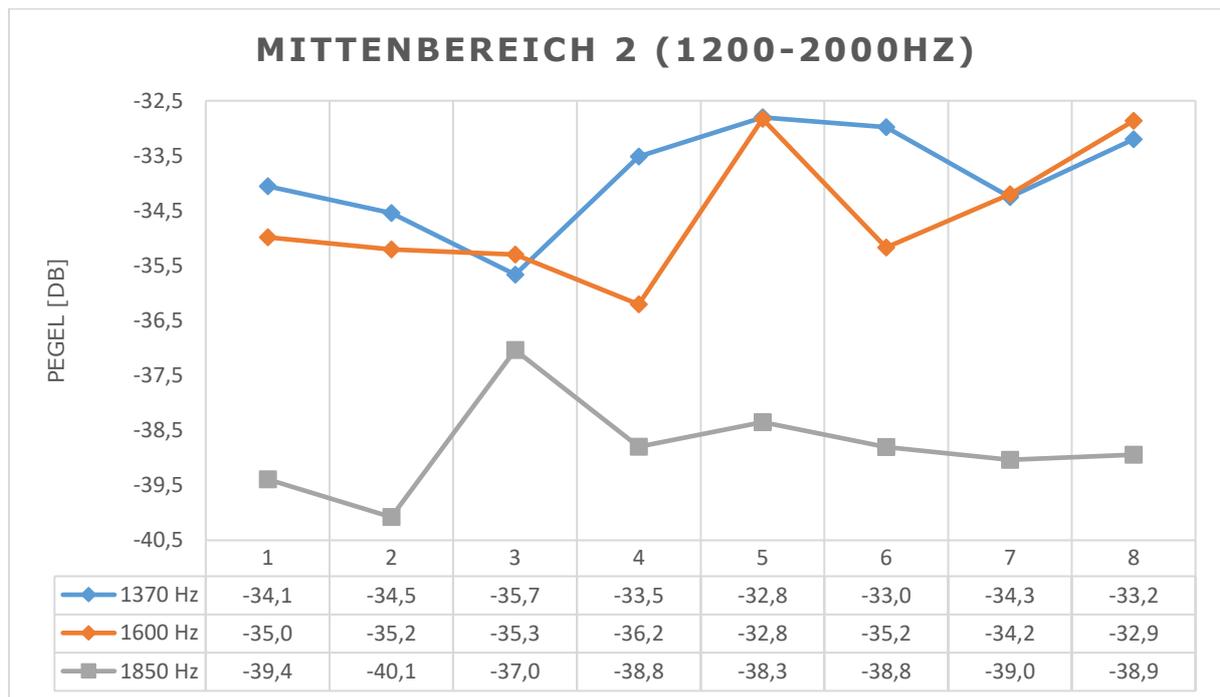


Abbildung 21: mittlere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000Hz)

In den Frequenzbereich von 1200 Hz – 2000 Hz lassen sich die Bark-Bänder mit den Mittelfrequenzen 1370 Hz, 1600 Hz und 1850 Hz einordnen (siehe *Abbildung 21*). Dabei bewegen sich die ersten beiden Bänder in ähnlichen Pegelbereichen. Betrachtet man diese Beobachtung unter der bereits aufgezeigten Regelmäßigkeit, dass mit steigender Frequenz der Grundpegel der Bark Bänder sinkt, bedeutet das

in diesem Fall eine hohe Repräsentation der Frequenzen im Bereich um 1600 Hz. Für die positionsabhängige Entwicklung innerhalb des Bandes lässt sich besonders die Maximalstelle an der 5. Position hervorheben. Mit einem plötzlich auftretenden Pegelanstieg von 3,4 dB, unterbricht es eine sonst von beiden Seiten zulaufende Absenkung des Pegels zur Mitte hin. Dabei fällt der Pegelanstieg zum rechten Rand des Arrays hin mit 2,3 dB, deutlich schwächer aus. Diese Entwicklung am rechten Rand lässt sich neben dem gemeinsamen Peak an 5. Mikrofonposition auch im 1370 Hz Band erkennen. Um diese Maximalstelle herum bildet das Band einen bauchigen Charakter. Dadurch werden vor allem für die Mikrofone an 4., 5. und 6. Position die Frequenzen um 1370 Hz deutlich präsenter. Vor diesem bauchartigen Anstieg weist das Band einen Pegelabfall von 1,6 dB am linken Rand beginnend auf. Der Bereich um 1850 Hz wird besonders durch einen Peak an 3. Mikrofonposition charakterisiert. Dabei steigt der Pegel innerhalb der Bewegung zwischen 2 Mikrofonen um 3,1 dB an. Dieser fällt allerdings zur Mitte hin wieder ab und entwickelt sich zu einem leichten, aber stetigen Pegelabfall in Richtung des rechten Randes.

In diesem Bereich liegt ein Großteil der Präsenz in der rechten Hälfte des Arrays. Dabei bildet besonders der Bauch des 1370 Herz Band einen Ort hoher Energie. Trotz des Schwerpunktes sollte man in den Peak im 1850 Hz Band nicht unbeachtet lassen.

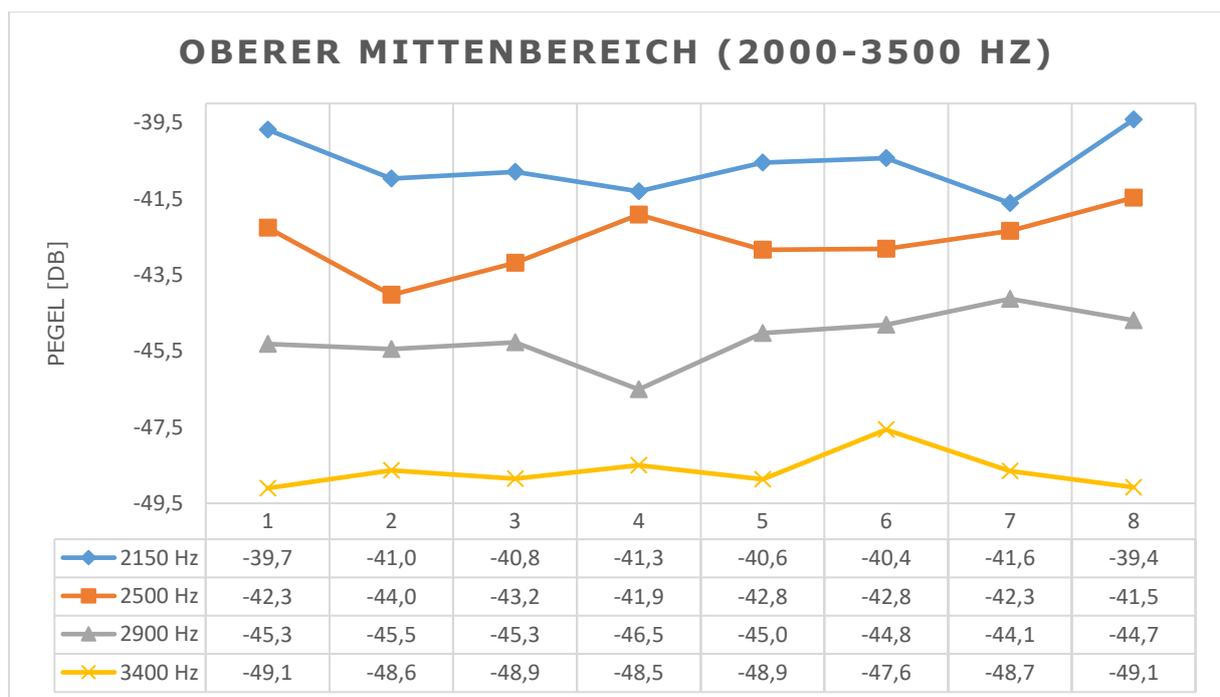


Abbildung 22: mittlere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Die Komplexität der Entwicklungen geht, wie für diesen Frequenzbereich bereits erwartet, weiter zurück. Für die in *Abbildung 22* dargestellten Frequenzen zwischen 2000 Hz und 3500 Hz lassen sich daher nur noch vereinzelte Ausbrüche aus einer sonst weitestgehend stetigen Entwicklung erkennen. Für das erste Bark-Band, welches eine Mittelfrequenz von 2150 Hz besitzt, kann eine Minimalstelle an 7. Mikrofonposition aufgeführt werden. An diesem Punkt kommt es zu einem Pegelabfall von 1,2 dB, worauf jedoch ein Anstieg von 1,8 dB folgt. Eine solche Entwicklung lässt sich sowohl im selben Band als auch im nächsten Bark-Band um 2500 Hz in Richtung des linken Rands auffinden. Dabei fällt der Pegelabfall zwischen der 1. und 2. Position in letzterem Band mit 1,7 dB stärker aus. Dominiert wird das 2500 Hz Band durch eine Anhebung um 2,1 dB zur Mitte des Arrays. An 4. Mikrofonposition weist der Bereich um 2900 Hz, im Gegensatz zum 2500 Hz Band, eine Minimalstelle mit einem vorangehenden Pegelabfall von 1,2 dB auf. Der restliche Verlauf ist, bis auf einen minimalen Anstieg in der rechten Hälfte des Arrays, allerdings gleichbleibend. Eine ähnliche Aussage lässt sich auch über das 3400 Hz Band tätigen. Bei einer Bewegung von links nach rechts lässt sich bis auf eine Anhebung des Pegels um 1,3 dB bei der 6. Mikrofonposition keine nennenswerten Veränderungen hervorheben.

Wie zu erwarten, kommt es im Frequenzbereich von 2000 – 3500 Hz zu weniger ausgeprägten Schwankungen innerhalb der Bark-Bänder. Bei genaueren Betrachtungen stellt die 4. Mikrofonposition eine interessante Stelle dar. Mit einer Platzierung eines Mikrofons in diesem Bereich sollte man aufgrund der Gegensätzlichkeit des 2500 Hz und 2900 Hz Bandes mit möglichen ungewollten Resonanzen rechnen, sobald sich die Frequenz dem Bereich zwischen diesen Bändern nähert.

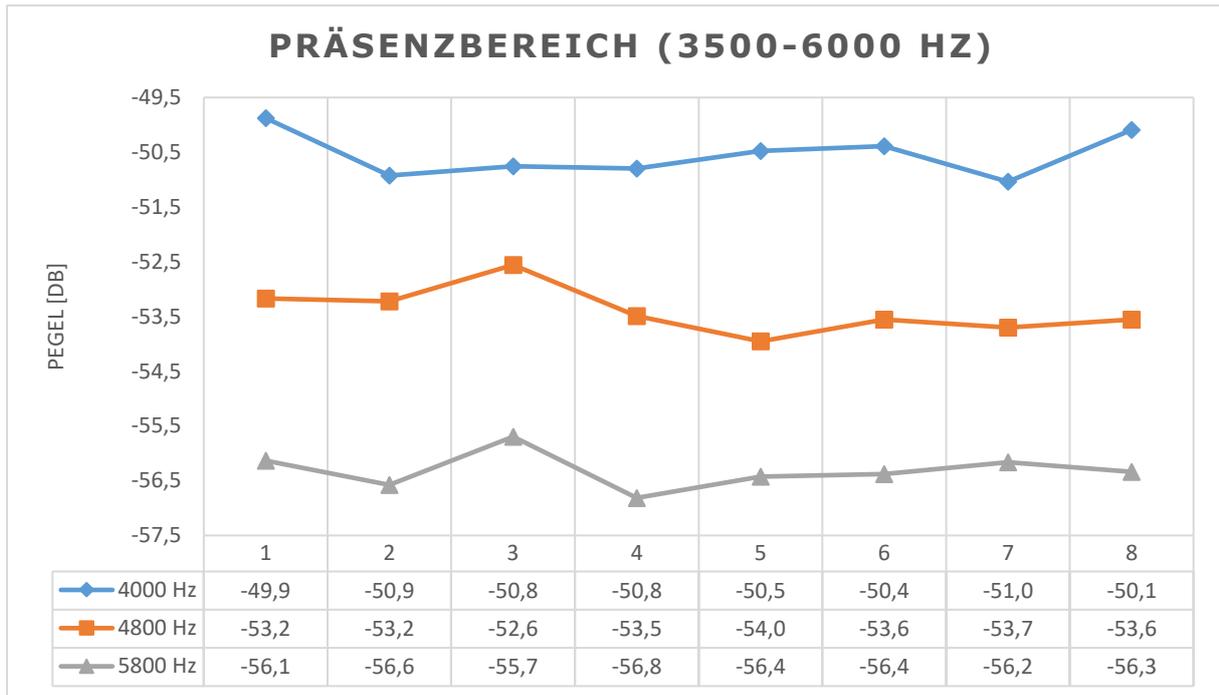


Abbildung 23: mittlere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Auf den ersten Blick fällt die Ähnlichkeit der Verläufe der beiden höheren Bark-Bänder mit einem gemeinsamen Maximalwert an 3. Mikrofonposition auf (siehe *Abbildung 23*). Sie unterscheiden sich lediglich in Bezug auf die jeweiligen Rückbewegungen nach der Maximalstelle, bei der das 4800 Hz Band für diese Bewegung deutlich länger braucht. Der restliche Verlauf der Bänder weist aufgrund minimaler Änderungen auf einen stabilen Verlauf hin. Eine Ausnahme stellen hier die jeweiligen Randgebiete des 4000 Hz Bandes dar, welche mit einer durchschnittlichen Steigung von 1 dB zum Rand lauter werden.

Allgemein kommt es im Präsenzbereich nur zu leichten positionsabhängigen Veränderungen. Lediglich zu den Rändern und an 3. Mikrofonposition kann es zu verstärkter Präsenz dieses Frequenzraumes kommen.

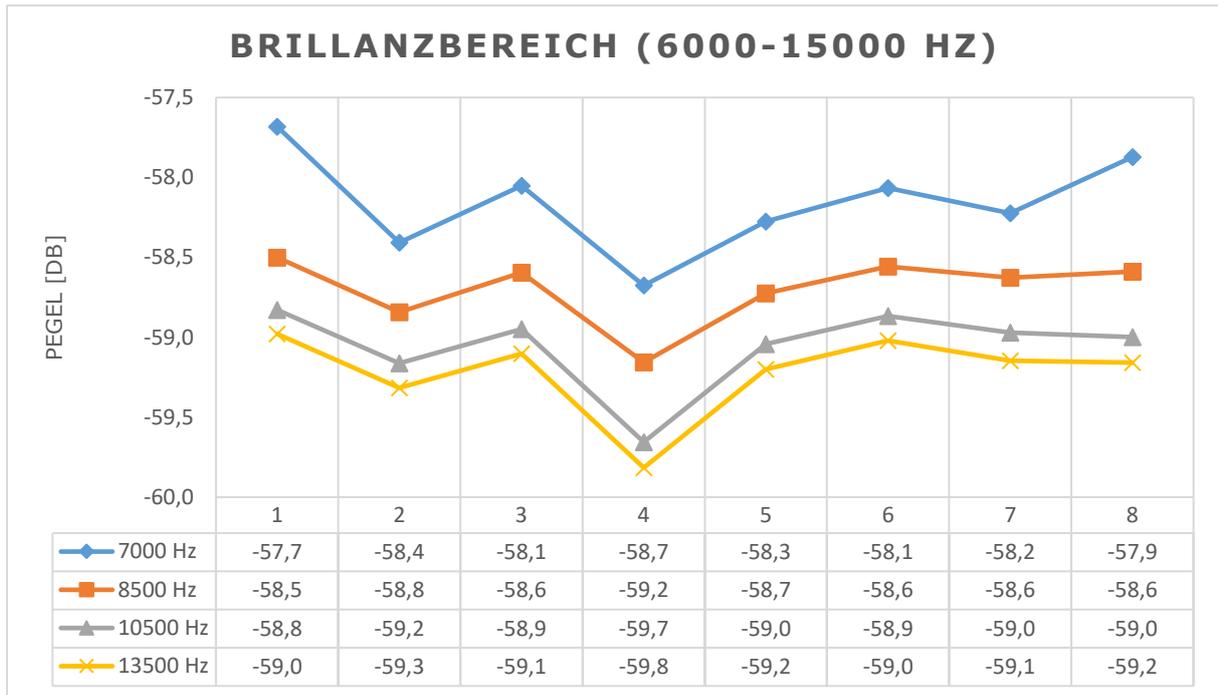


Abbildung 24: mittlere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Wie im Brillanzbereich der oberen Ebene bereits gesehen, kommt es auch hier zu einer gleichförmigen Bewegung der Bark-Bänder im Bereich von 6000 Hz – 15000 Hz. Dabei lässt sich eine generell beidseitige Pegelabnahme zur Mitte hin erkennen. Deutlich wird dies durch den gemeinsamen Minimalwert aller Bänder an 4. Mikrofonposition, welcher von einem im Durchschnitt 7 dB (+-1db) starkem Pegelabfall eingeleitet werden. Um diesen Peak herum kommt es in den Bändern um 8500Hz, 10500 Hz sowie 13500 Hz zu einer weitestgehend linearen Entwicklung. Bis auf einen kleinen Pegelabfall vom linken Rand aus sind im restlichen Verlauf keine positionsabhängigen Veränderungen der Pegel aufzuführen. Dieser Trend trifft vor allem in den Randbereichen des 7000 Hz Bandes nicht zu, dort lassen sich sowohl am linken Rand als auch am rechten Rand leichte Pegelabfälle bzw. -zunahmen erkennen.

Allgemein gilt für den Bereich von 6000 Hz – 15000 Hz ein uniformer Pegelabfall zur Mitte. Für den restlichen Verlauf lässt sich bis auf im 7000 Hz Band eine stabile Entwicklung der Pegel festhalten. Es sollte jedoch trotzdem auf die leichte Anhebung bzw. Absenkung im 7000 Hz Band geachtet werden, da es sonst zu ungewollt starken Ausprägung in diesem Frequenzbereich kommen kann.

6.2.3 Messungen der unteren Ebene

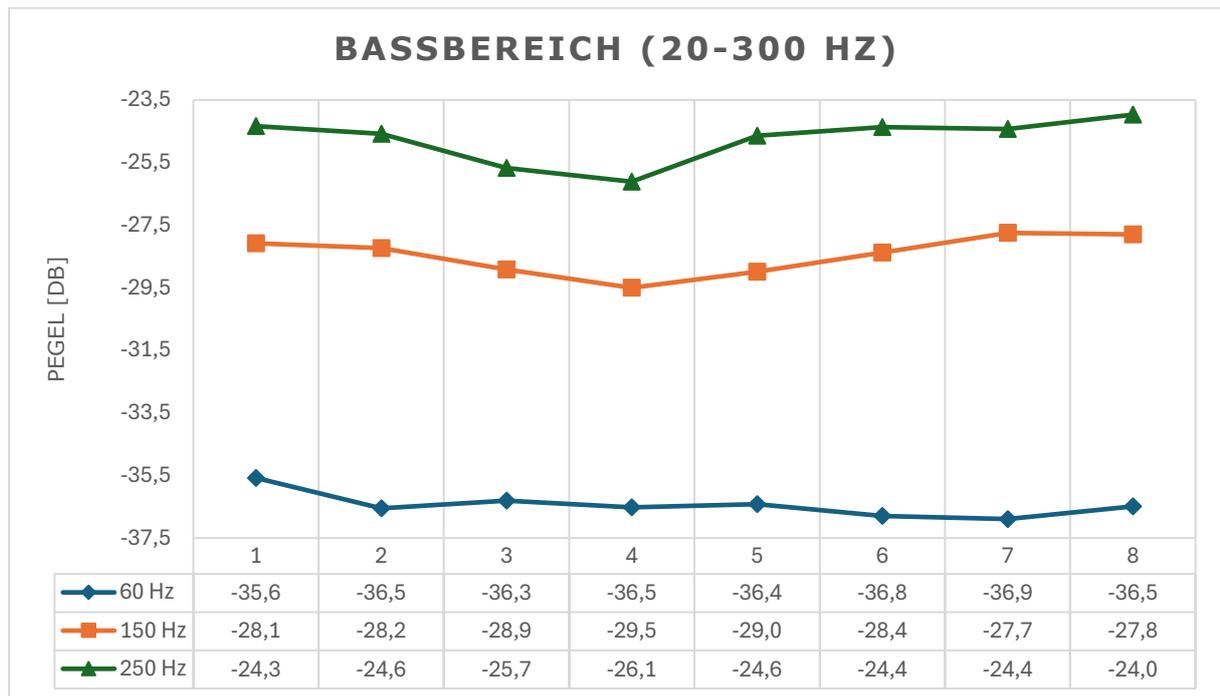


Abbildung 25: untere Ebene - Bassbereich (20-300 Hz)

Der Trend des deutlich tieferen Grundpegels des 60 Hz Bandes, abgebildet unter den restlichen Bändern dieses Frequenzbereiches in *Abbildung 25*, scheint durch die Sichtbarkeit in allen 3 Ebenen des Arrays bestätigt zu sein. Denn auch hier liegt der Grundpegel im Durchschnitt 5,4 dB unter dem Minimalwert des nächsthöheren Bandes bei 150 Hz. Über die Breite des Arrays ändert sich aufgrund des linearen Verlaufs des 60 Hz Bandes, bis auf einen kleinen Pegelabfall von 0,9 dB vom linken Rand aus, an diesem Trend nicht viel. Eine höhere aber immer noch stabile positionsabhängige Entwicklung lässt sich dagegen in den beiden tieferen Bändern auffinden. Dabei lassen sich beide durch einen Pegelabfall zur Mitte charakterisieren, welcher sich im Falle des 150 Hz im Vergleich zum 250 Hz Band deutlich langsamer entwickelt. Trotz der schnelleren Rückbewegung des Pegels von Position 4 nach 5 im 250 Hz Band unterscheiden sie sich in Bezug auf das Ausmaß des Pegelabfalls mit durchschnittlich 1,5 dB (± 1 dB) kaum. Auch die restliche Entwicklung verläuft für beide Bänder ähnlich stabil.

Der Bassbereich wird einerseits durch den Grundpegelunterschied des 60 Hz Bandes als auch durch eine Absenkung der Intensität der beiden höheren Bänder zur Mitte hin dominiert. Davon abgesehen gilt für den Bassbereich eine geringe Positionsabhängigkeit in Bezug auf dessen Repräsentation im Gesamtklang.

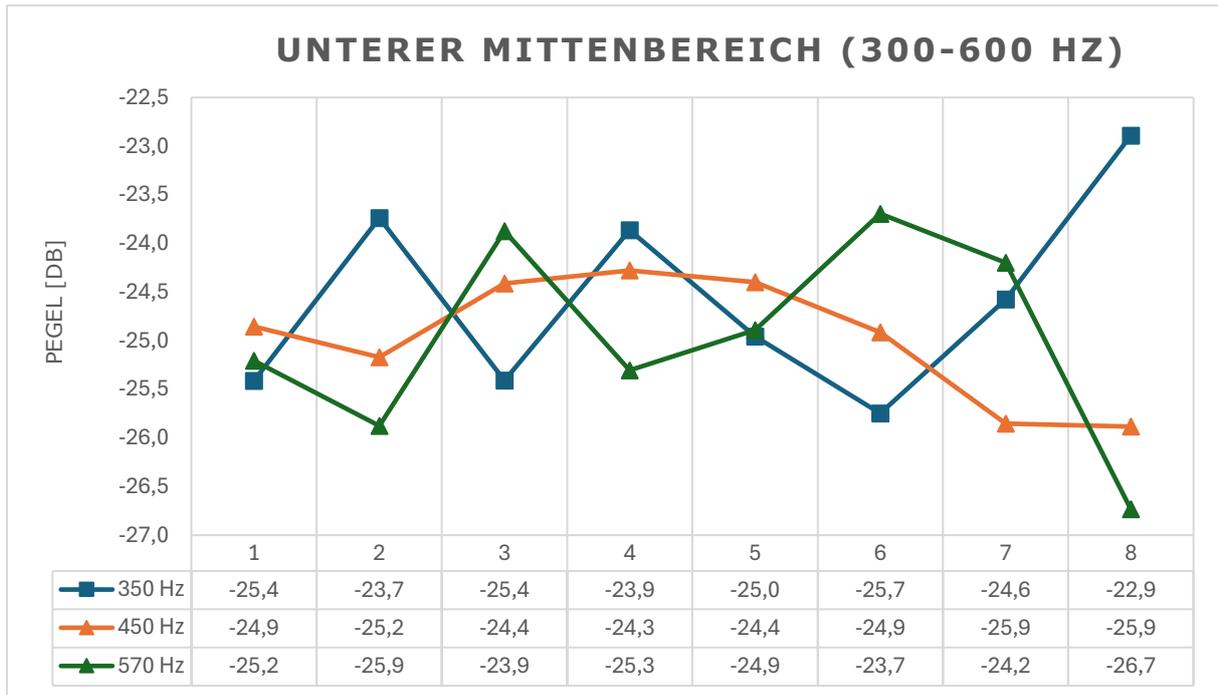


Abbildung 26: untere Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Vergleichen wir die Entwicklung der Komplexität der Graphen über die Frequenzbereiche in den verschiedenen Ebenen, so sticht der in *Abbildung 26* zu sehender Unterschied zwischen dem Bassbereich und dem unteren Mittenbereich besonders heraus. Auffällig ist dabei nicht nur die energetische enge Lage der drei hier vertretenen Bark-Bänder, sondern auch die Anzahl der deutlichen Pegelunterschiede zwischen benachbarten Mikrofonpositionen im 350 Hz und 570 Hz Band. Sie besitzen, wie schon in den anderen Ebenen aufgetreten, eine konträre Stellung zueinander. Dabei wechseln sich die Maximal- und Minimalwerte der beiden Graphen von Mikrofonposition zu Mikrofonposition ab. Für die linke Hälfte des Arrays beträgt dabei der jeweilige Anstieg bzw. Abfall im 350 Hz Band durchschnittlich 1,8 dB (+-1dB). Das 570 Hz Band weist aufgrund seiner unterschiedlich starken Pegelentwicklungen mehr Varianz in diesem Punkt auf. Ab der Mitte erstrecken sich die Anstiege bzw. Abfälle über 2 Positionen und verringern damit den Grad der Positionsabhängigkeit für diese Hälfte des Arrays. Die Werte der Minimal- bzw. Maximalstellen werden dabei stetig größer bzw. kleiner, was in einem deutlichen Anstieg von 3 dB im 350 Hz Band und Pegelabfall von 2,5 dB im 570 Hz Band zum rechten Rand deutlich wird. Entgegen dem Trend der gerade betrachteten Bark-Bänder lässt sich die Entwicklung des 450 Hz Bandes als weitestgehend stetig beschreiben. Über die Breite der unteren Ebene des Arrays kommt es hier zu einem generellen Abfall des Pegels von links nach rechts, welcher allerdings durch die Existenz eines bauchförmigen Pegelanstieges zur Mitte

hin dominiert wird. Dabei kommt es zur Mikrofonposition zu einem Anstieg des Pegels um 0,9 dB, gefolgt von einem deutlicheren Abfall von 1,6 dB zur 7. Mikrofonposition.

Vor allem für die beiden äußeren Bänder herrscht besonders in der linken Hälfte eine hohe Positionsabhängigkeit, deren Intensität in Bezug auf die erreichten Pegelwerte zum rechten Rand ansteigt. Aufgrund der kontrastären Bewegung des 350 Hz und 570 Hz Bandes kommt die Vermutung einer *Umkehrfrequenz* im Bereich des 450 Hz Bandes nahe. Dieser Vermutung wird durch die vergleichsweise stabile Entwicklung des 450 Hz Bandes verstärkt. Außerdem ist bei der Betrachtung des unteren Mittenbereichs auf den bauchartigen Anstieg zur Mitte hin achtzugeben.

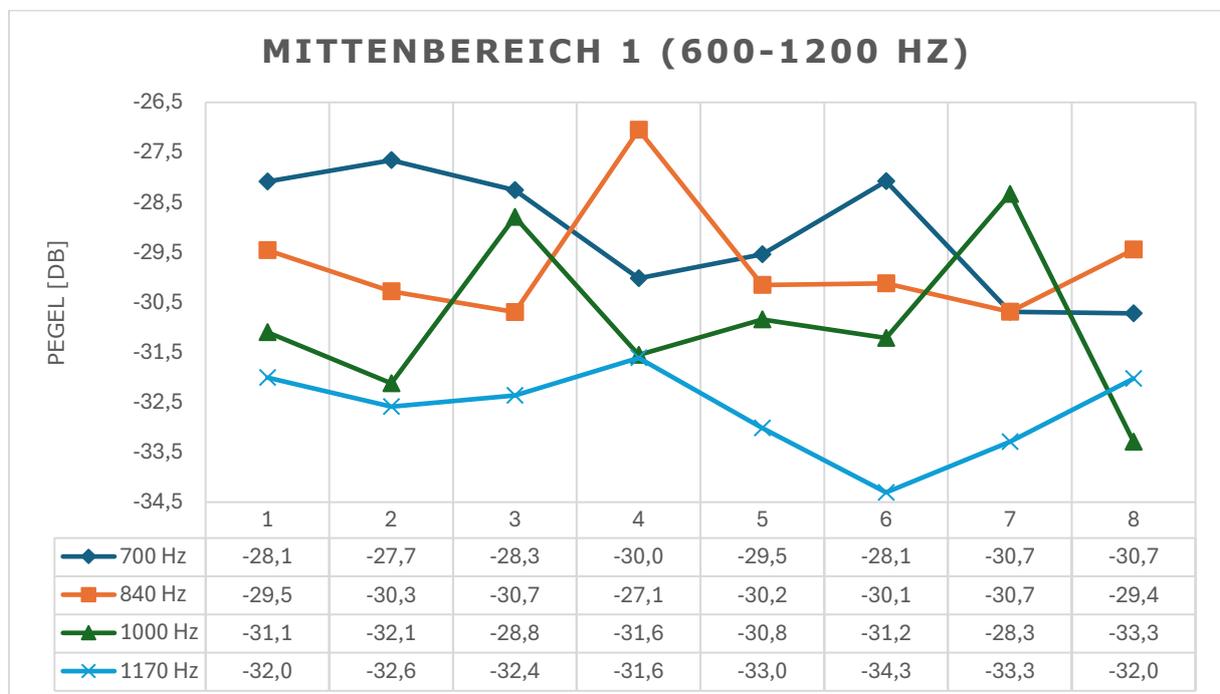


Abbildung 27: untere Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)

Die Entwicklungen im Bereich von 600 Hz – 1200 Hz wirken bei erster Betrachtung sehr komplex (siehe *Abbildung 27*), was besonders an der engen Lage der Grundpegel der Bark-Bänder liegt. Analysiert man die einzelnen Bänder genau, bemerkt man schnell, dass es sich hier meist um stetige Bänder mit 1-2 interessanten Maximal bzw. Minimalwerten handelt. Im Falle des tiefsten Bandes um 700 Hz liegen diese Stellen um die 2. Mikrofonposition sowie an Position 6. Bei ersterem handelt es sich um eine bauchartige leichte Anhebung des Pegels in der linken Hälfte des Arrays. Der ansonsten negativ verlaufende Trend wird erneut an besagter 6. Mikrofonposition in Form eines Peaks mit einem Anstieg von 1,9 dB ab

der Mitte kurz unterbrochen. Im nächsthöheren Band lässt sich eine ähnlich gleichbleibende Entwicklung erkennen, welche durch einen deutlichen Pegelanstieg von 3,6 dB an 4. Mikrofonposition mit anschließendem Abfall zum Ausgangspegel unterbrochen wird. Um diesen Maximalwert herum zeichnet sich für die Frequenzen um 840 Herz eine wannenartige Entwicklung mit leichten Anstiegen zu den jeweiligen Rändern ab. Bewegt man sich im Frequenzbereich weiter nach oben, so trifft man auf 2 interessante Peaks im 1000 Hz Band. Dabei liegt der Maximalwert mit einem Pegelanstieg von 3,3 dB an 3. Mikrofonposition, gefolgt von einem weiteren deutlichen Anstieg um 2,9 dB zur 7. Mikrofonposition. Anders als beim ersten Peak kommt es hier jedoch zu einem deutlich stärkerem Pegelabfall von 5 dB zum rechten Rand. Anders als die anderen Vertreter dieses Frequenzbereichs sticht das höchste der 4 Bänder, um die Mittelfrequenz von 1170 Hz, durch einen deutlichen Pegelabfall in der rechten Hälfte des Arrays hervor. Dabei kommt es ab der 4. Mikrofonposition über die Spanne von 2 Positionen zu einer Pegelreduktion von 2,7 dB. Zum rechten Rand hin lässt sich eine gleichförmige Rückbewegung erkennen.

Der Bereich von 600Hz – 1200 Hz ist vor allem durch vereinzelte Peaks, einer leichten Anhebung in der linken Hälfte sowie einem deutlichen Abfall zur rechten Hälfte des Arrays charakterisiert. Durch die vielen Peaks kann es daher zu ungewollten Verstärkungen einzelner Frequenzen in Abhängigkeit der Mikrofonposition kommen.

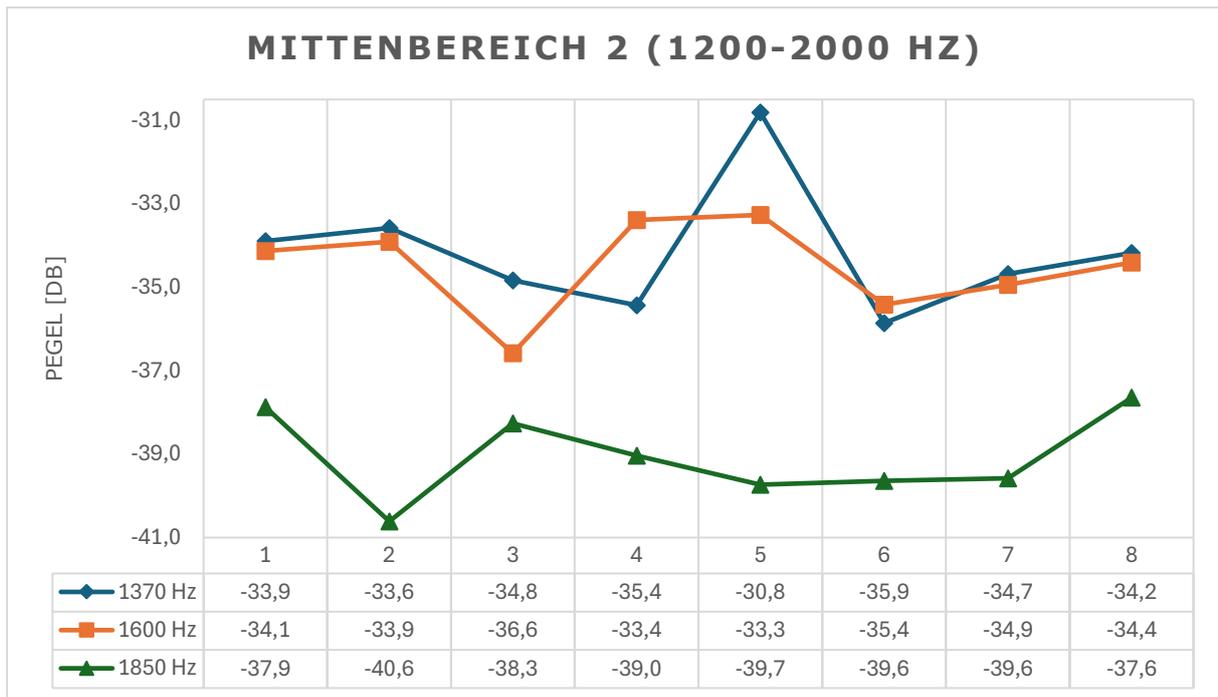


Abbildung 28: untere Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)

Eine auffallende Besonderheit im Mittenbereich der unteren Ebene besteht in der engen Lage des 1370 Hz und 1600 Hz Bandes (siehe *Abbildung 28*). Sie teilen sich besonders in den Randbereichen ähnliche bis gleiche Werte. Beide lassen sich dabei mit einem generellen Trend zur Pegelabnahme bei zunehmender Bewegung zur Mitte charakterisieren, welche in beiden Fällen durch Peaks unterbrochen werden. Im Falle des 1370 Hz Bandes geschieht dies durch einen Pegelanstieg von 4,6 dB in Form eines Peaks an 5. Mikrofonposition. Die Entwicklung im 1600 Hz Band weist eine höhere Komplexität auf. Nach einer deutlichen Pegelreduktion um 2,7 dB steigt der Graph auf einen Maximalwert mit einer Steigung von 3,2 dB an. Dieser Anstieg des Pegelwertes hält im Gegensatz zum 1370 Hz Band für 2 Mikrofonpositionen an, ehe es zur 7. Position hin wieder auf den gemeinsamen Wert der beiden Bänder zurückfällt. Bei der Betrachtung des 1850 Hz Bandes sticht vor allem der deutliche Minimalwert mit einem vorangehenden Pegelabfall von 2,8 dB an Mikrofonposition 2 heraus. Für die rechte Hälfte des Arrays weist das Band einen leichten, aber stetigen Pegelabfall zum rechten Rand auf. Beim Erreichen des Randes kommt es allerdings zu einem kurzen Pegelanstieg von 2 dB.

Dieser Frequenzbereich wird vor allem durch die Peaks an 4. und 5. Mikrofonposition dominiert. Mikrofonbewegungen auf der unteren Ebene können daher zu einer plötzlichen Verstärkung in den Bereichen der 1370 Hz und 1600 Hz

Bark-Bänder führen. Unterstützt wird diese Entwicklung durch den Minimalwert an 2 Positionen im höchsten Band des Mittenbereichs.

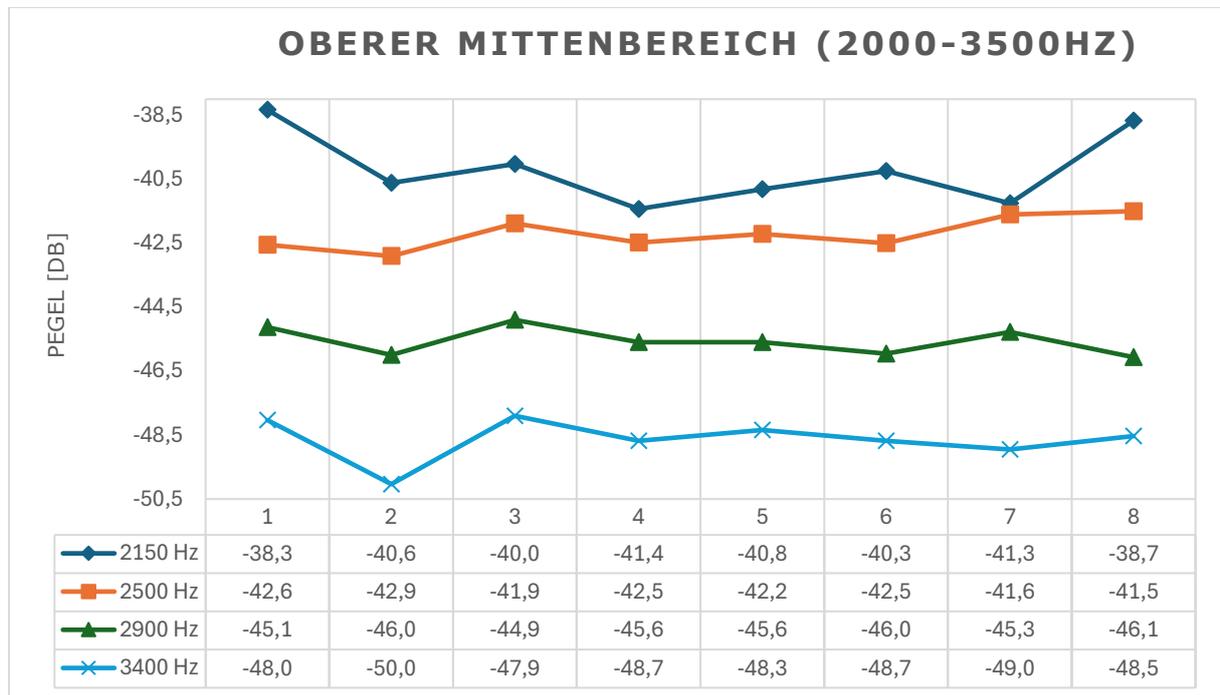


Abbildung 29: untere Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Der obere Mittenbereich von 2000 – 3500 Hz zeigt bei Betrachtung der *Abbildung 29*, wie in den horizontalen Ebenen zuvor, ein hohes Maß an Ähnlichkeiten zwischen den Bändern. Vor allem die Bänder um 2500 Hz und 2900 Hz besitzen dabei eine durchweg gleiche Entwicklung. Dabei kommt es lediglich zu leichten Pegelschwankungen zwischen Mikrofonpositionen, was unter Bezugnahme der psychoakustischen Bewertung durch die Bark-Skala zu vernachlässigen ist. (Siehe Kapitel 5.1). In den anderen beiden Bändern dieses Frequenzbereichs kommt es allerdings zu stärkeren Bewegungen, welche die Positionsabhängigkeit ihrer Frequenzen hervorhebt. Im Bereich um 2150 Hz lässt sich besonders eine Anhebung von durchschnittlich 2,4 dB zu den jeweiligen Seiten erwähnen. Eine ebenso markante Stelle im oberen Mittenbereich stellt der an 2. Position auffindbarer Minimalwert mit einem Pegelabfall von 2 dB im 3400 Hz Band dar.

Durch die generell stabile Entwicklung der hier aufgezeigten Frequenzbänder werden die vereinzelt auftretenden Extremstellen deutlich wahrnehmbar. Kommt es in diesen Frequenzen zu einer Überrepräsentation, so lässt sich dem durch eine Bewegung des Mikrofons in einen Bereich mit weniger Pegelunterschieden entgegenwirken.

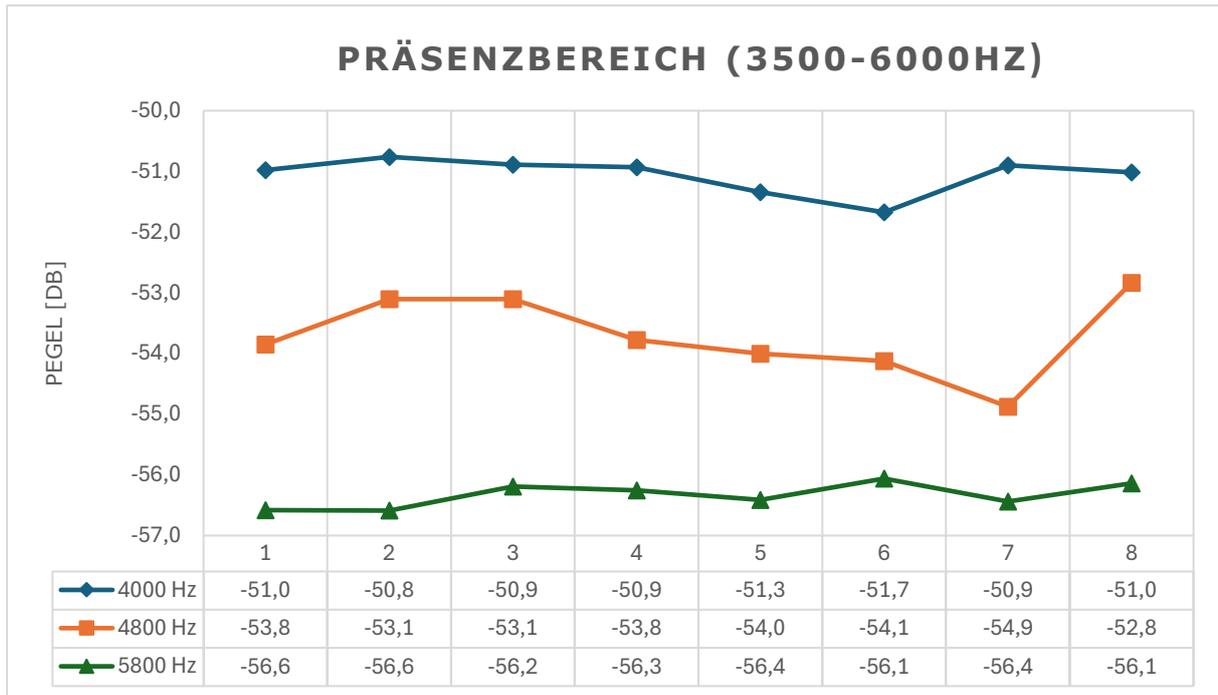


Abbildung 30: untere Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Ähnlich wie im oberen Mittenbereich kommt es für die Bark-Bänder im Präsenzbereich von 3500 – 6000 Hz zu weitestgehend stabilen Verläufen (siehe Abbildung 30), welche lediglich an wenigen Punkten durch Extremwerte unterbrochen werden. Für das 4000 Hz Band findet man diesbezüglich einen Minimalwert an 6. Mikrofonposition. Dabei stellt sich die vorangehende Pegelabsenkung aufgrund ihrer längeren Dauer von 2 Mikrofonposition mit 0,8 dB als relativ schwach heraus. Durch diese langsame Absenkung des Pegels würde der Abfall im Falle einer Bewegung der Abhörposition erst durch den folgenden schnellen Anstieg hörbar werden. Für das nächsthöhere Bark-Band bei 4800 Hz lassen sich dagegen deutlichere positionsabhängige Veränderungen erkennen. Betrachtet man diese Entwicklung ab dem linken Rand, so fällt eine leichte bauchförmige Pegelanhebung für die linke Hälfte des Arrays auf. Dabei kommt es jedoch nur zu einem leichten Pegelanstieg von 0,7 dB. Im rechten Randgebiet des Arrays sticht das 4800 Hz Band erneut durch einen deutlichen Anstieg von 1,9 dB heraus, welchem ein langsamer, aber stetiger Pegelabfall ab der Mitte vorausgeht. Für die Frequenzen um 5800 Hz gilt aufgrund eines leichten, aber weitestgehend stetigem Anstieg des Pegels eine geringe Positionsabhängigkeit.

Der Präsenzbereich in der unteren Ebene des Arrays lässt sich zusammenfassend als eine weitestgehend stabile Entwicklung charakterisieren, welche lediglich an einzelnen Stellen lokale Extremwerte aufweist. Dominiert wird der allgemeine

Pegelverlauf des Frequenzbereichs durch eine leichte, aber stetige Pegelabnahme der ersten beiden Bänder.

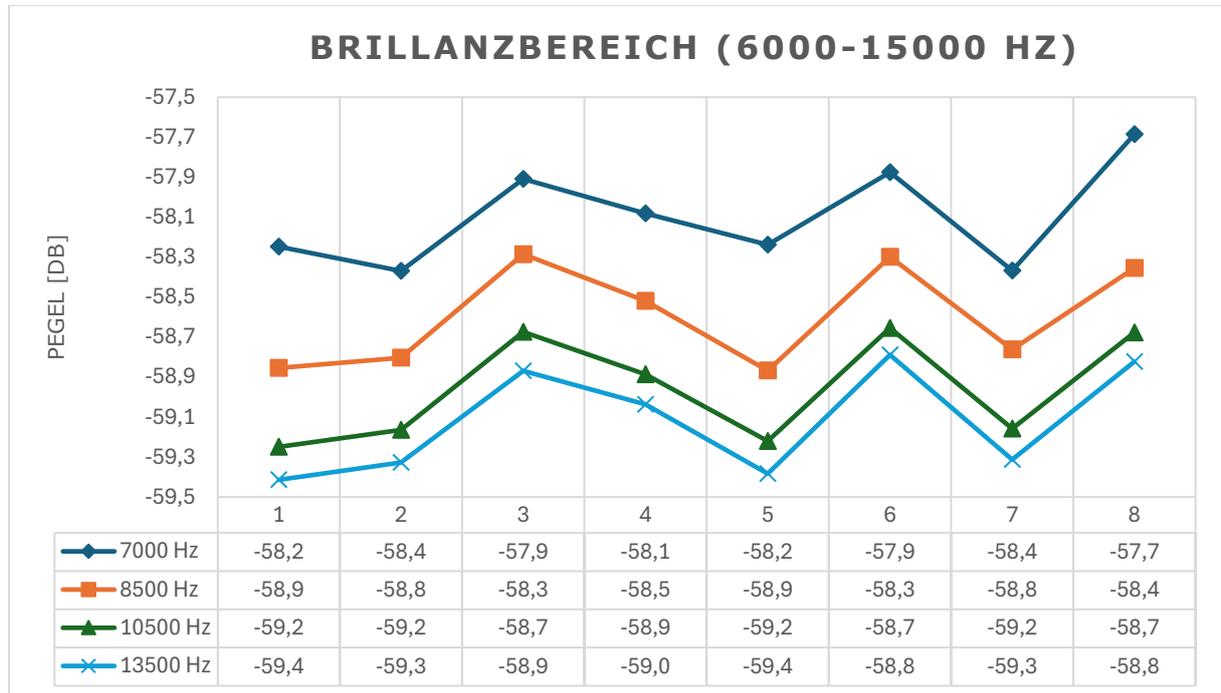


Abbildung 31: untere Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Wie aufgrund der Auswertung der oberen Ebenen bereits zu erwarten, kommt es auch hier zu einer sehr uniformen Bewegung zwischen den Bändern im Bereich von 6000 – 15000 Hz, was mithilfe der Graphen in *Abbildung 31* dargestellt wird. Markant sind dabei vor allem die Peaks an 3. und 6. Mikrofonposition. Diese allen entgegen dem ersten Eindruck mit einer Steigung von durchschnittlich 0,5 dB zur ersten Extremstelle deutlich kleiner aus. Die selbe Beobachtung lässt sich auch an der 2. Extremstelle machen, wobei hier das 7000 Hz Band aufgrund eines vorangehenden langsameren Pegelabfalls aus der uniformen Bewegung der restlichen Bänder ausbricht. Dieser Ausbruch wird auch beim Vergleich der letzten gemeinsamen Pegelanhebung zum rechten Rand des Arrays in allen Bändern sichtbar. Während es im 7000 Hz Band zu einem Anstieg von 0,7 dB kommt, wird in den höheren Bändern der Pegel lediglich um durchschnittlich 0,5 dB angehoben.

Auch wenn der Graph aufgrund seiner angepassten y-Achse eine starke Positionsabhängigkeit im Brillanzbereich aufweist, fallen die auftretenden Veränderungen bei Betrachtung der numerischen Werte schwach aus. Der Frequenzbereich lässt sich daher allgemein mit einem weitestgehend stabilen Verlauf charakterisieren, welcher lediglich an 3 Stellen zu einer Betonung der in diesem Bereich beschriebenen Frequenzen führt. Es sollte jedoch beachtet werden,

dass es im Falle der tieferen Frequenzen im Brillanzbereich zu stärkeren Veränderungen kommen kann.

6.3 Zugrundeliegende Mechanismen der Horizontalebene

Wie bereits im Kapitel über den Resonanzboden (siehe Kapitel 4.1) aufgezeigt, stellt dieser den Hauptort der Schallabstrahlung dar. Durch die verschiedenen Formen und Ausprägungen der Eigenmoden ist er zusammen mit dem Deckel und Gehäuse (siehe Kapitel 4.2) des Flügels maßgeblich für die Ausprägung verschiedener positionsabhängiger spektraler Schwerpunkte verantwortlich. Dabei werden an verschiedenen Punkten am Resonanzboden unterschiedlich Frequenzen in verstärkter bzw. abgeschwächter Form an den umliegenden Raum abgegeben. Dieser Zustand macht den Vorgang der Schallabstrahlung durch den Resonanzboden zusätzlich frequenzabhängig. Versucht man mit diesem Wissen den einzelnen Peaks der Bark Bänder verschiedene Moden des Resonanzbodens zuzuordnen, so gelingt dies spätestens ab dem unteren Mittenbereich nur noch schwer. Der Grund dafür liegt in der in Kapitel 4.1 beschriebenen steigenden Komplexität der Schwingungen des Resonanzbodens. Während die Resonanzbodenschwingungen unterhalb von 250 Hz keine bis maximale eine Knotenlinie besitzen, lassen sich hier noch vereinzelt Vergleiche zwischen den in der Literatur angegebenen Eigenmoden und den Messungen der Aufnahmen dieser Arbeit ziehen. Zusätzlich muss man an dieser Stelle die raumakustischen Begebenheiten des zur Aufnahme gewählten Konzertsaaes der Universität der Künste Berlin einbeziehen. Anders als in bereits veröffentlichten Studien wurden die Aufnahmen statt in einem reflexionsarmen Raum in einem Konzertsaal mit dementsprechender Raumakustik aufgenommen. Durch die Reflexionen von Schallwellen im Raum kommt es zu frequenzabhängiger Absorption von Teilen des Klangs, was beim Auftreffen dieser reflektierten Schallwellen an den omnidirektionalen Mikrofonen zu einer Verfälschung des Klangs führt.

Trotz dieser schwierigen Umstände lassen sich einige Besonderheiten der obigen Messungen erklären. Eine der ersten aufgetretenen Regelmäßigkeiten liegt im verringerten Grundpegel des 1. und 2. Bark-Bandes bei 60Hz und 150 Hz. Dies liegt hauptsächlich an der in Kapitel 3.2 bereits beschriebenen Verlagerung des Maximums auf die höher liegenden Teiltöne. Durch den geringen Pegel des Grundtons und die vergleichsweise starke Ausprägung der Teiltöne kommt es zu der beobachteten Ausnahme des ansonsten vorherrschenden Trends des Abfalls

des Grundpegels bei steigender Frequenz. Die Bereiche der oberen und zentralen Mitten weisen durch alle Ebenen eine erhöhte Komplexität der positionsabhängigen Veränderungen auf. Dieser Zustand lässt sich durch die ansteigende Komplexität der Form und Stärke der Eigenmoden erläutern. Betrachtet man die von Suzuki aufgezeigten Eigenmoden in *Abbildung 6* in Kapitel 4.1, so kommt es zu vielen kleineren Schwingungen an mehreren Stellen des Resonanzbodens. Es kommt daher im Umkehrschluss in Bezug auf die Abstrahlung des Resonanzbodens zu vielen verschiedenen *Hot Spots*, welche aufgrund ihrer unterschiedlichen Lage auf dem Resonanzboden in Richtung verschiedener Mikrofonpositionen des Arrays abgestrahlt werden. Dies wird im Fall der Graphen durch die Peaks an verschiedenen Positionen im Array deutlich. Für den Fall der auftretenden Minimalwerte in diesem Bereich lässt sich die von Giordano beschriebenen destruktiven Interferenzen benachbarter Eigenmoden einbringen. Dieser beschreibt, dass zwei benachbarte Moden sich in unterschiedlicher Phasenlage zueinander bewegen, womit die von ihnen abgestrahlten Schallwellen ebenfalls in unterschiedlicher Phasenlage zueinander liegen. Treffen diese Schallwellen nun am Ort des Zuhörers, in unserem Fall an einer bestimmten Mikrofonposition, zusammen, so resultiert die dortige Summierung der Signale in einer Auslöschung der gegenphasigen Schallanteile (Giordano 2016, S. 101). Überträgt man dieses Phänomen auf die Schallwellenausbreitung der vielen verschiedenen Resonanzbodenmoden bei den Frequenzen des unteren und zentralen Mittenbereichs, so kommt es auf die Breite des Arrays gesehen zu einer Auslöschung unterschiedlicher Frequenzanteile an verschiedenen Positionen im Mikrofonarray. Untersucht man unter demselben Aspekt die Entwicklung der Bark-Bänder im Bassbereich, so wird der Einfluss der einfachen Form der Resonanzbodenschwingungen erkennbar. In den unteren Frequenzen besitzt der Resonanzboden großflächige Schwingungen, welche ihre Schallwellen dementsprechend in Richtung von mehreren Mikrofonen abgeben. Auch in Bezug auf die destruktive Interferenz bedeutet eine geringere Komplexität der Resonanzbodenmoden geringere Unterschiede im Grad der Auslöschung bestimmter Frequenzen bei benachbarten Mikrofonpositionen, was in den Messungen in Form der stabil verlaufenden Graphen zusehen ist. Oberhalb des Mittenbereichs werden die Resonanzmoden immer kleiner und mehr in der Anzahl, was zu vielen verschiedenen Schallabstrahlungen führt. Das räumliche Auflösungsvermögen reicht für diese Dichte der an den Mikrofonen eintreffenden

Schallemissionen nicht mehr aus, was sich in den Graphen durch die Stetigkeit der Bewegungen entlang des Mikrofonarrays deutlich macht. Es lassen sich daher nur noch vereinzelt Auslöschungen von Frequenzen aufgrund von destruktiven Interferenzen auffinden (Giordano 2016, S. 102).

6.4 Vertikale Ebenen

Für die Untersuchung der spektralen Veränderungen in der vertikalen Ebene des Mikrofonarrays wurden 3 senkrechte Ebenen exemplarisch auf Besonderheiten und mögliche Regelmäßigkeiten untersucht. Um die Messungen strukturierter zu gestalten, folgt auch hier die Einteilung der Messbereiche in sieben praxisnahen Frequenzbereichen

6.4.1 Messungen der linken Ebene

Für die erste betrachtete Ebene am linken Rand des Arrays gibt es im Vergleich zu den anderen vertikalen Ebenen eine nennenswerte Besonderheit. Anstatt von drei Mikrofonen befinden sich in dieser Ebene vier, was uns einen Einblick in eine weitere tiefere Ebene ermöglicht.

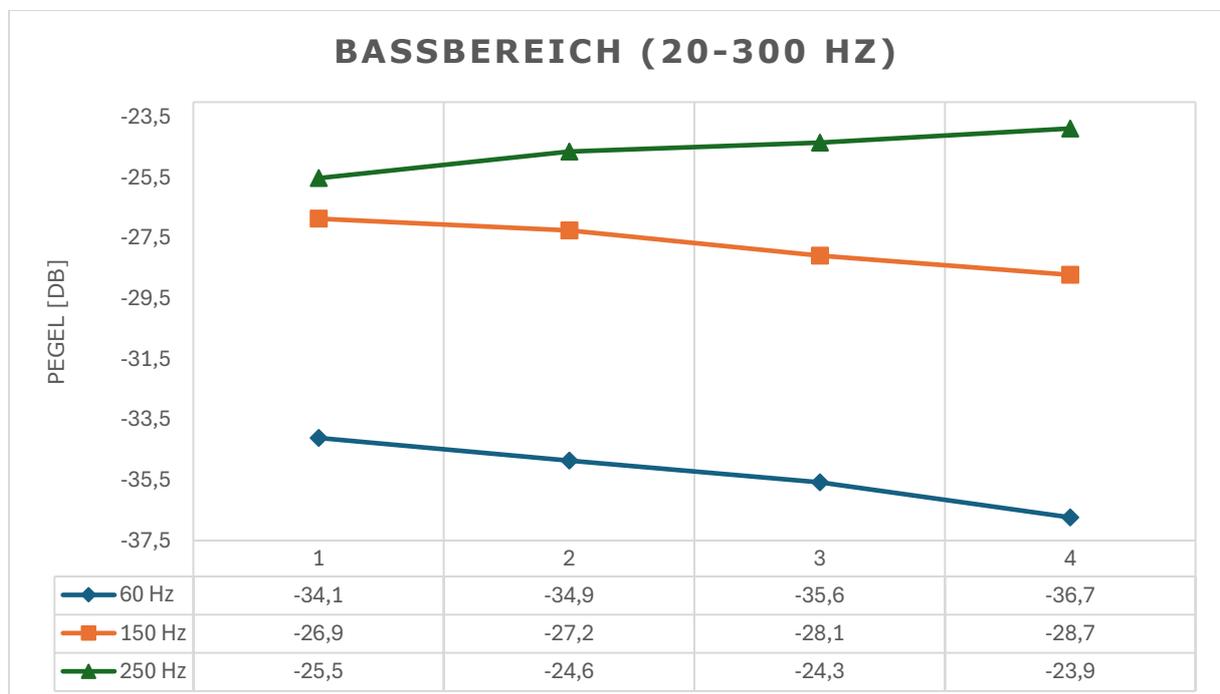


Abbildung 32: linke vertikale Ebene - Bassbereich (20-300 Hz)

Bei einer ersten Betrachtung des Bassbereiches von 20 – 300 Hz der linken vertikalen Ebene (siehe *Abbildung 32*) fallen die durchweg konstanten Veränderungen der Bark-Bänder auf. Es lassen sich keine deutlichen Extremwerte

erkennen, was auf eine weniger ausgeprägte Positionsabhängigkeit zwischen den einzelnen Mikrofonen schließen lässt. Nichtsdestotrotz sollten die übergeordneten stetigen Veränderungen in diesem Bereich nicht missachtet werden. Das tiefste Band bei 60 Hz sticht dabei mit einem deutlichen Pegelabfall von 2,6 dB zwischen der höchsten und tiefsten Mikrofonposition heraus. Mit steigender Frequenz wird dieser Abfall schwächer, wie sich im nächsthöheren 150 Hz Band erkennen lässt. Mit einer Pegelabsenkung von 1,8 dB fällt der Pegelunterschied zwischen dem oberen und unteren Ende des Arrays schon deutlich geringer aus. Bei weiterer Betrachtung des Bassbereichs kommt es im Bereich zwischen 150 Hz und 250 Hz zu einer Umkehr der Verlaufsrichtung, was in einem Pegelanstieg von 1,6 dB im 250 Hz deutlich wird.

Der Bassbereich der linken vertikalen Ebene wird besonders durch den abfallenden Charakter der beiden tieferen Bänder dominiert. Im Bereich von 20 – 300 Hz lässt sich trotz des entgegenwirkenden Verlaufs der höheren Frequenz ein übergeordneter stetiger Abfall in Richtung des Bodens aufzeigen.

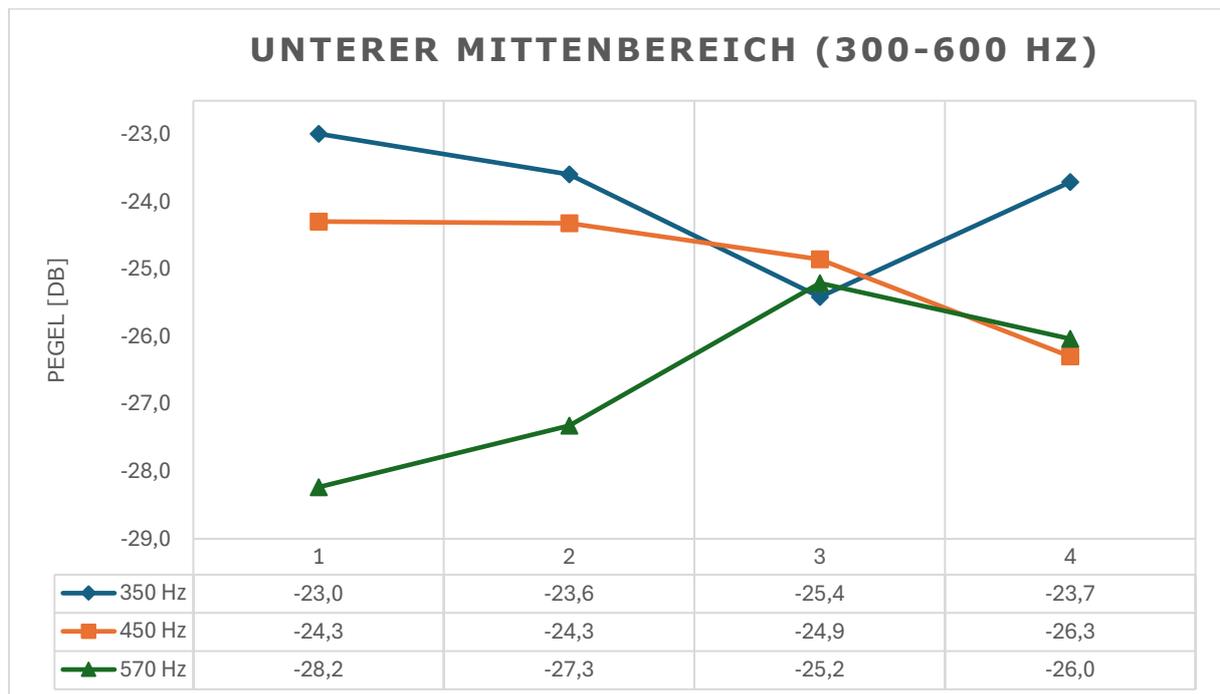


Abbildung 33: linke vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Für den Bereich von 300 – 600 Hz, dargestellt in *Abbildung 33*, lässt sich die Bildung eines Kontaktpunktes an 3. Mikrofonposition hervorheben. Während in den obersten Positionen noch eine deutliche energetische Trennung zwischen den Bändern herrscht, entwickeln sich diese zum unteren Ende hin zu einem gemeinsamen Kontaktpunkt an besagter 3. Mikrofonposition. Dabei fällt der Pegel

des 350 Hz Bandes mit 2,4 dB deutlich schneller als das 450 Hz Band ab. Im Fall des 570 Hz Bandes kommt es aufgrund des deutlich niedrigeren Grundpegels zu einem Anstieg von 3 dB in Richtung des gemeinsamen Kontaktpunktes. Nach Erreichen dieses Punktes kommt es besonders im 350 Hz und 570Hz Band zu einer Umkehr der vorherigen Verlaufsrichtung. Während es bei letzterem Band zu einem Pegelabfall von 0,8 dB kommt, steigt der Pegel des 350 Hz Bandes um 1,7 dB. Für das 450 Hz Band kommt es zu keiner Abweichung seines stetigen Abfalls. Lediglich der Grad der Pegelabsenkung nimmt mit 1,4 dB zu.

Für den Bereich von 300 – 600 Hz lässt sich aufgrund des Knotenpunktes eine Stelle in der unteren Hälfte des Arrays aufzeigen, bei der es zu einem Gleichgewicht aller im unteren Mittenbereich liegenden Frequenzen kommt. Entfernt man sich von diesem Punkt, kommt es zu deutlichen Anstiegen und Abfällen bestimmter Frequenzen.

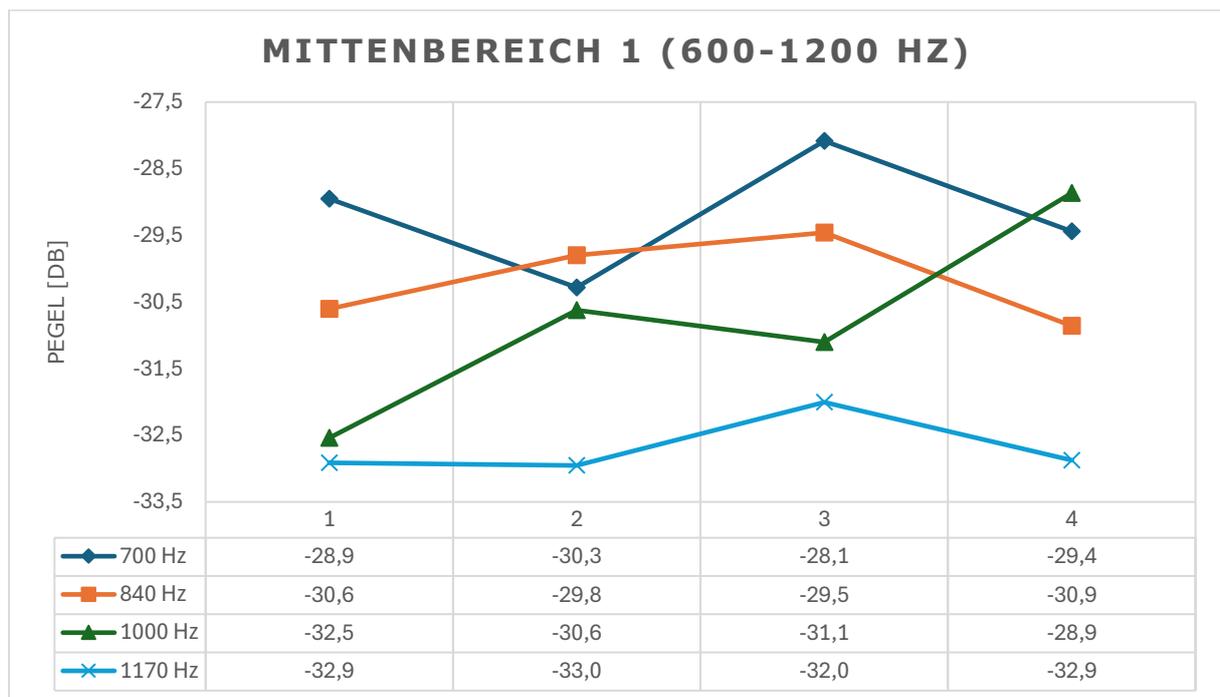


Abbildung 34: linke vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)

Betrachtet man den Mittenbereich von 600 – 1200Hz, so lässt sich auch für die vertikale Ebene eine Zunahme der Komplexität der Bark-Bänder erkennen (siehe *Abbildung 34*). Das tiefste der 4 Bänder, bei 700 Hz, wird dabei vornehmlich durch einen 2,2 dB starken Pegelanstieg zwischen der 2. und 3. Mikrofonposition charakterisiert. Umgeben wird diese Maximalstelle von zwei Pegelabfällen mit einer durchschnittlichen Absenkung von 1,3 dB, was für den generellen Verlauf des 700 Hz Bandes eine hohe Positionsabhängigkeit der Vertikalebene bedeutet. Eine

deutlich geringere Komplexität weist der Mittenbereich um die Frequenz von 840 Hz auf. Dabei kommt es mit Abnahme der Höhe zu einer Verstärkung dieser Frequenzen um durchschnittlich 1,1 dB. Lediglich zur untersten Position fällt der Pegel plötzlich um 1,4 dB ab. Das 1000 Hz Band wirkt auf den ersten Blick kontrastierend zum 700 Hz Band, hat aber bei genauerer Betrachtung einen generell steigenden Charakter. Aufgrund dessen wird das 1000 Hz Band nicht durch den mittleren Verlauf, sondern durch die beiden Anstiege zu Beginn und zum Ende der Entwicklung dominiert. In ersterem Fall steigt dabei der Pegel um 1,9 dB an, während er zur untersten Mikrofonposition mit 2,1 noch deutlicher anwächst. Der hochfrequenteste Vertreter dieses Bereiches, bei 1170 Hz, deutet bis auf einen Peak an 3. Mikrofonposition mit einem Anstieg und Abfall des Pegels von durchschnittlich 1dB auf eine ansonsten gleichbleibende Entwicklung hin.

Der spektrale Schwerpunkt lässt sich für den Frequenzbereich von 600 – 1200 Hz als stark frequenz- und positionsabhängig beschreiben, wobei sich eine generelle leichte Pegelzunahme von oben nach unten erkennen lässt.

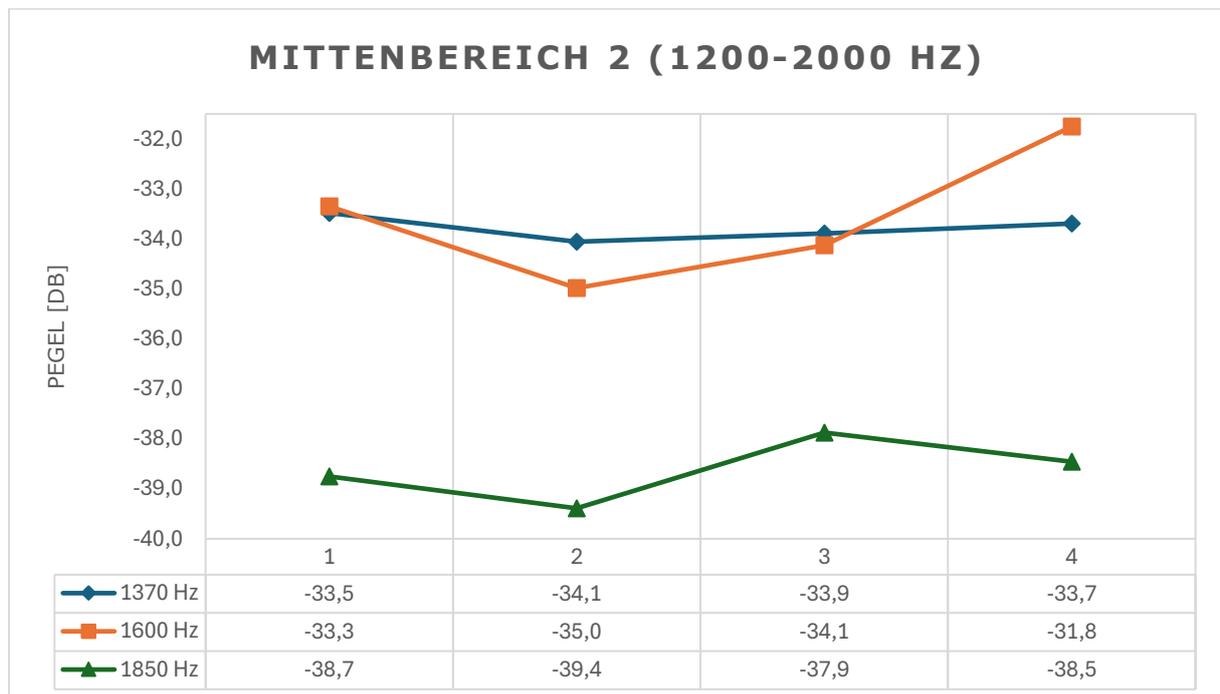


Abbildung 35: linke vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)

Entgegen der Erwartung geht für den höheren Bereich der zentralen Mitten die Komplexität etwas zurück (siehe *Abbildung 35*). Deutlich wird dies bereits bei der Betrachtung der vertikalen Entwicklung im 1370 Hz Band, bei der ein allgemeiner Dynamikraum von 0,6 dB mit einer minimalen Absenkung zu den mittleren Mikrofonpositionen besteht. Eine deutlich stärkere positionsabhängige Entwicklung

lässt sich dabei im nächsthöheren Band für die Frequenzen um 1600 Hz erkennen. Nach einem verhältnismäßig kleinen Pegelabfall von 0,9 dB zur 2. Position kommt es hier zu einem mit niedriger werdender Höhe stärker werdenden Pegelanstieg von insgesamt 3,2 dB. Diese Entwicklung lässt die beiden tieferen Bänder in einer engen energetischen Lage zueinander stehen. Das höchste Band des Mittenbereichs wird hauptsächlich durch einen Pegelanstieg von 1,5 dB zwischen den mittleren Mikrofonpaaren definiert. Die beiden leichten Absenkungen zu Beginn und am Ende des Verlaufs lassen sich aufgrund ihrer geringen Ausprägung vernachlässigen.

Aufgrund der weitestgehend stabilen Entwicklung der beiden äußeren Bänder kann der Bereich von 1200-2000 Hz vor allem mithilfe des bei tiefer werdender Position stärker werdendem allgemeinen Pegelanstieg beschrieben werden.

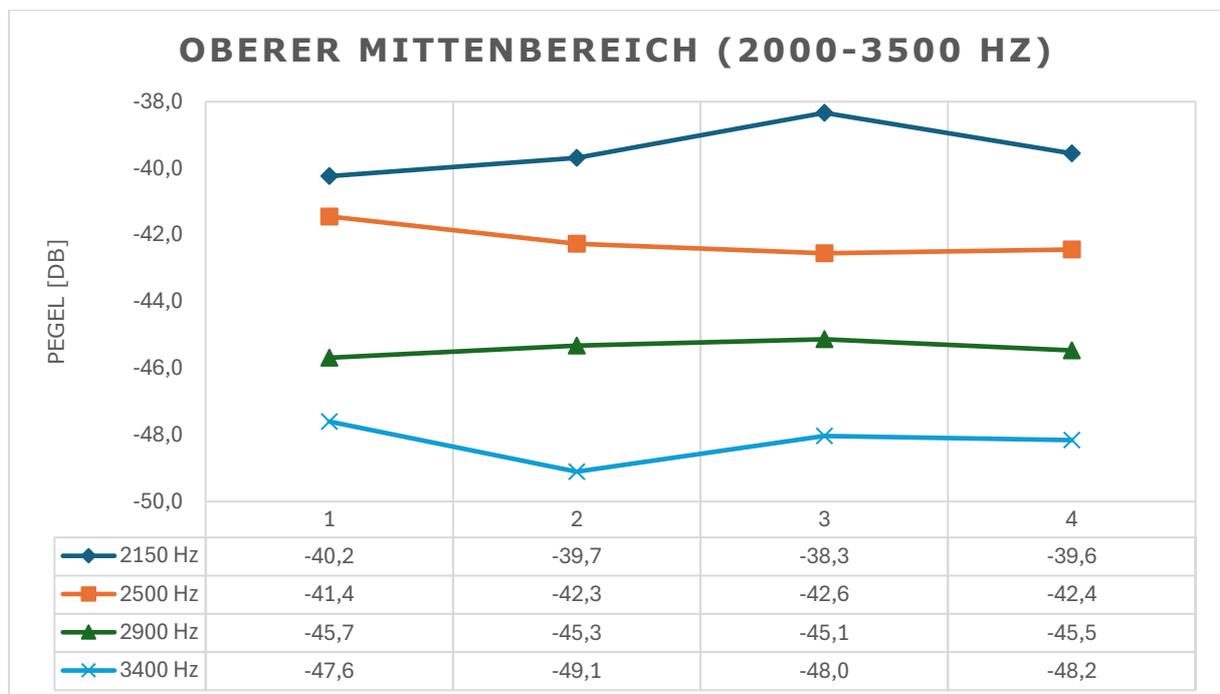


Abbildung 36: linke vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Bei erster Betrachtung des oberen Mittenbereichs in *Abbildung 36* lassen sich die sowohl zwischen den beiden mittleren Bändern als auch zwischen den äußeren Bändern vorherrschenden kontrastierenden Entwicklungen erkennen. Diese weisen im Falle der mittleren Bänder jedoch nur eine geringe Ausprägung auf. Während sich für einen Großteil der mittleren Bänder gleichbleibender Pegel abzeichnet, kommt es zum oberen Ende des Arrays zu einer entgegengesetzten Bewegung dieser beiden Bänder. Die Werte im tieferen 2500 Hz Band weisen dabei, im Gegensatz zum Pegelanstieg von 0,9 dB im 2900Hz Band, mit 0,4 nur

einen leichten Pegelanstieg auf. Der Zusammenhang der beiden äußeren Bark-Bänder besteht in der Art der Extremstelle und dessen Mikrofonposition. Dabei kommt es im 2150 Hz Band zu einer Maximalstelle an 2. Mikrofonposition mit einem sich über 2 Positionen erstreckenden Pegelanstieg von 1,9 dB. Im Gegensatz dazu liegt im 3400 Hz Band an 2. Position ein Minimalwert mit einem vorangehenden Pegelabfall von 1,5 dB vor.

Trotz des weitestgehend gleichbleibenden Pegels der beiden inneren Bänder, kann es im übergeordneten Verlauf zu einem Pegelabfall bei abnehmender Höhe kommen. Dies wird vorrangig durch die gegensätzliche Ausprägung der Extremwerte der äußeren Bänder hervorgerufen.

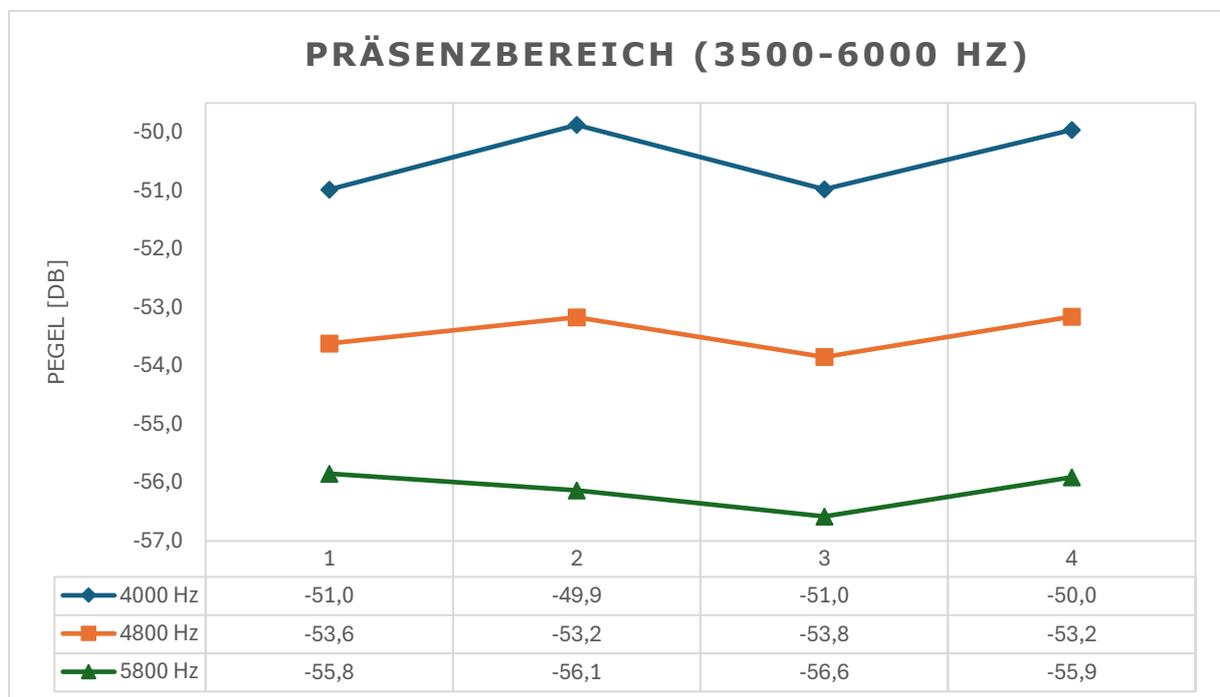


Abbildung 37: linke vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Besonders auffällig wirkt bei der Betrachtung von *Abbildung 37* die Ähnlichkeit der Verläufe der 3 Bark-Bänder des Bereichs zwischen 3500 Hz und 6000 Hz. Dabei teilen sowohl das 4000 Hz, 4800 Hz als auch das 5800 Hz einen Minimalwert an 3. Mikrofonposition. Im Falle der ersten beiden Bänder gibt es ebenfalls an 2. Position einen gemeinsamen Maximalwert, welcher jedoch mit steigender Frequenz immer kleiner ausfällt. Während es im 4000 Hz Band an 2. Mikrofonposition zu einem Pegelanstieg von 1,1 dB kommt, weist die Steigung im 4800Hz Band nur eine Stärke von 0,4 dB auf. Diese Entwicklung endet in einem gänzlichen Verschwinden dieses Extremwertes im 5800 Hz Bark-Band. Es lässt sich daher auf eine deutliche Frequenzabhängigkeit der 3. Mikrofonposition in Bezug auf dessen Stärke

schlussfolgern. Die Entwicklung zur untersten Position lässt sich entgegen der gerade behandelten oberen Hälfte des Arrays durch eine uniforme Pegelanhebung von durchschnittlich 0,7 dB definieren.

Übergeordnet wird der Präsenzbereich durch eine frequenzabhängige Betonung an 2. und 4. Position charakterisiert. Für ersteres gilt dabei eine Abschwächung der Betonung bei steigender Frequenz.

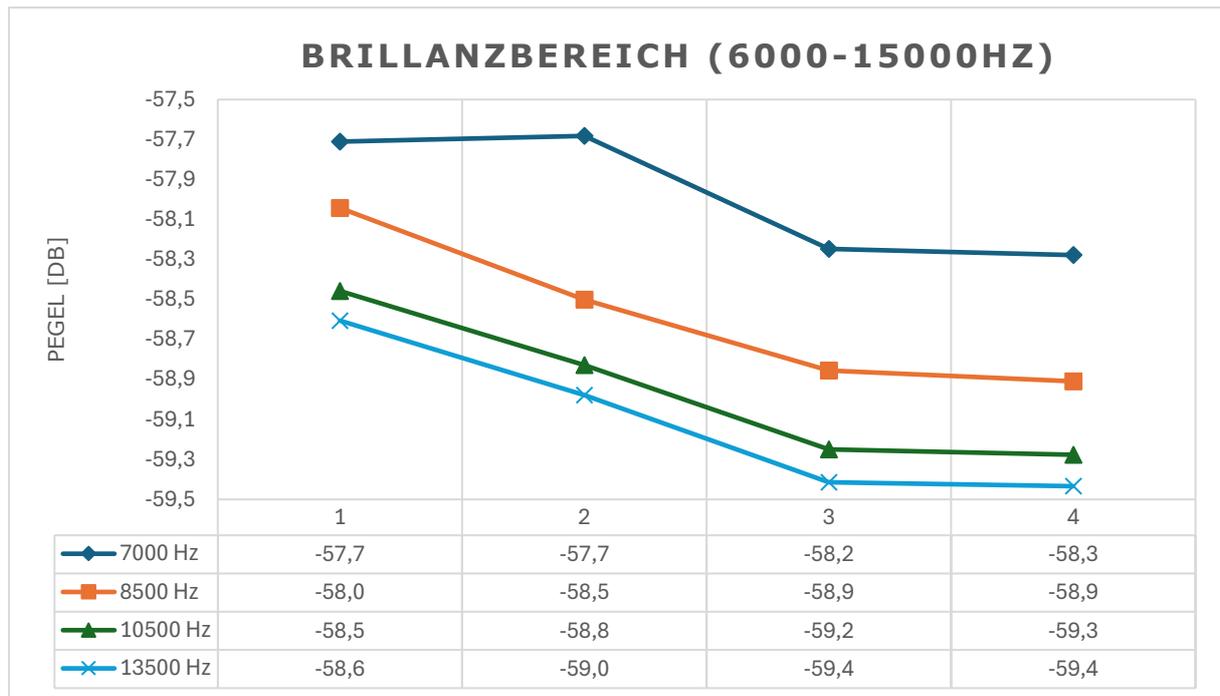


Abbildung 38: linke vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Im hochfrequenten Bereich von 6000 – 1500 Hz kommt es besonders in den Bändern um 8500Hz, 10500Hz sowie um 13500 Hz zu einem uniformen Pegelabfall von durchschnittlich 0,8 dB (+/- 1dB) von oberster zur 3. Mikrofonposition (siehe *Abbildung 38*). Zum unteren Rand hin flachen diese in eine Entwicklung mit keiner bis minimale Veränderung ab. Lediglich im 7700 Hz Band lässt sich eine Abweichung dieser uniformen Bewegung erkennen. Für diesen Fall kommt es erst ab der 2. Position zum Pegelabfall, welcher mit 0,5 dB zusätzlich kleiner ausfällt.

Die dominierende Entwicklung dieses Bereichs stellt der uniforme Abfall des Pegels bei kleiner werdender Höhe dar. Dabei kann es gerade in den hohen Mikrofonpositionen zu leichten Abweichungen aufgrund des späteren Abfalls im 7000 Hz Band kommen.

6.4.2 Messungen der mittleren Ebene

Für die Darstellung der vertikalen Entwicklung in der Mitte unseres Arrays wurden die Werte der 5. vertikalen Mikrofonebene von links ausgewertet. Für diesen Bereich gibt es anders als zuvor, nur 3 Mikrofone in der vertikalen Ebene.

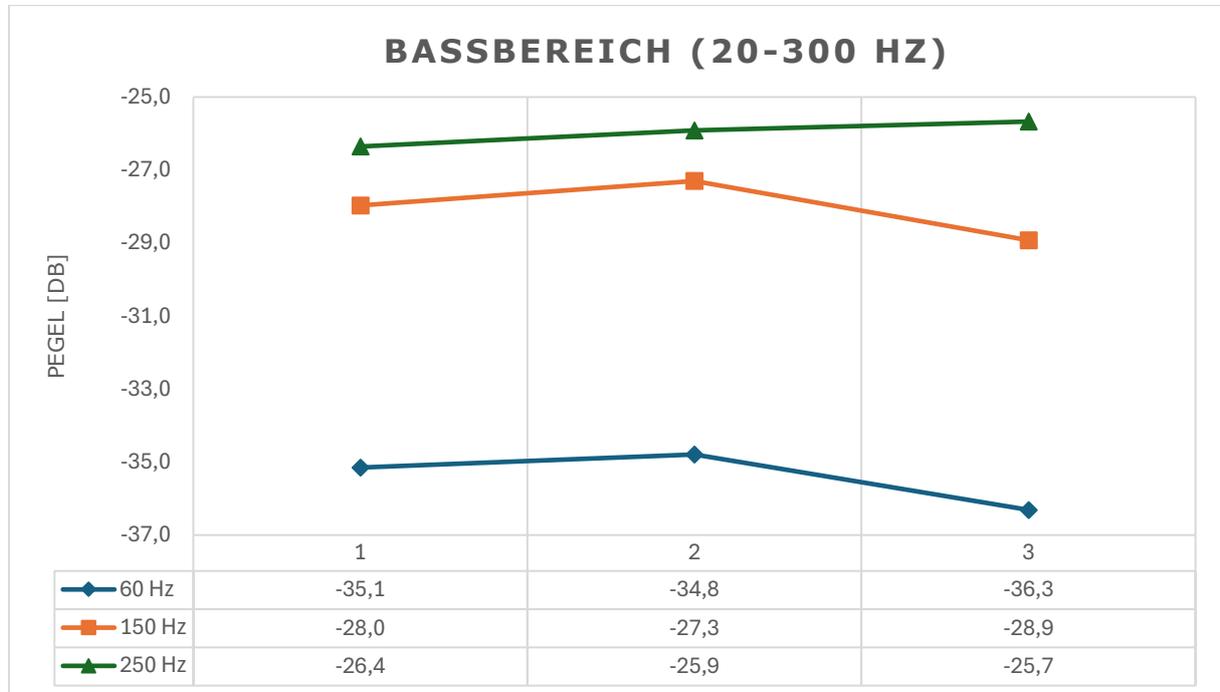


Abbildung 39: mittlere vertikale Ebene - Bassbereich (20-300 Hz)

Für den Bassbereich lassen sich zwei sehr einfache Verläufe erkennen (siehe *Abbildung 39*). Die tieferen Frequenzen um 60 und 140 Hz werden beide durch einen Pegelabfall von durchschnittlich 1,6 dB zum unteren Ende der Ebene dominiert. Der in beiden Fällen vorangehende leichte Anstieg lässt sich aufgrund des geringen Steigungswertes vernachlässigen. Mit steigender Frequenz verschwindet diese Absenkung zum Boden hin, was man eindeutig an der stetigen Steigung von 1,2 dB vom obersten zum untersten Mikrofon des 250 Hz Bandes erkennen kann.

Der Bereich von 20–300 Hz wird vornehmlich durch einen Pegelabfall ab der vertikalen Mitte des Arrays definiert.

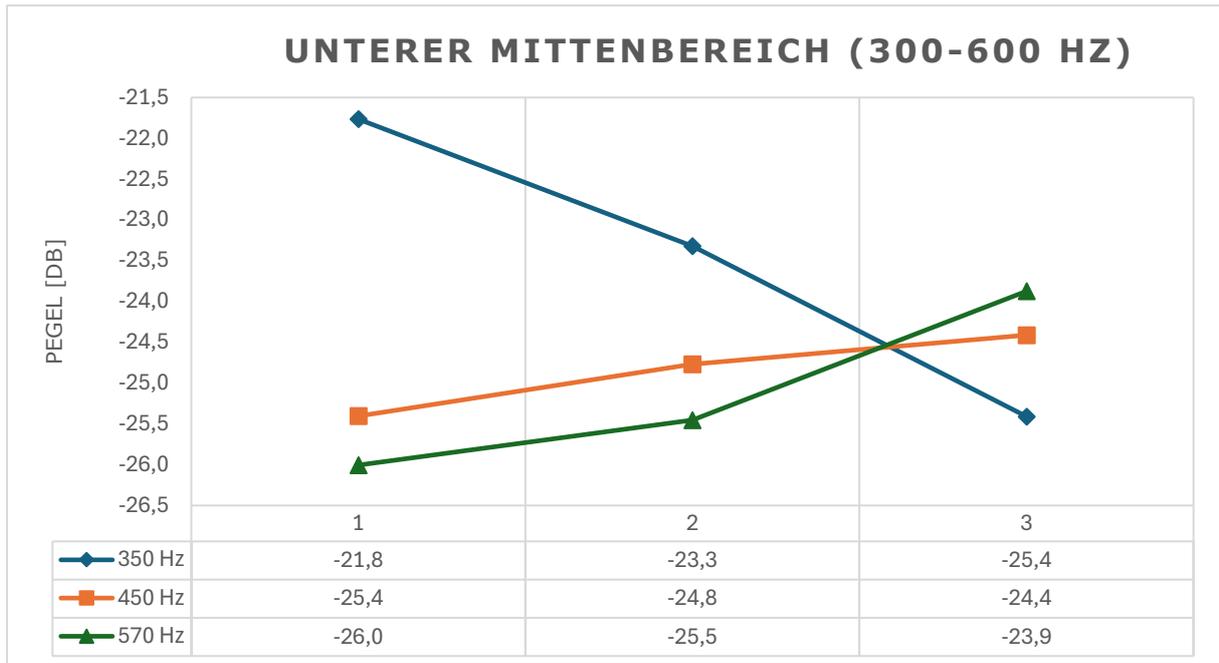


Abbildung 40: mittlere vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Wie auch in der Ebene zuvor fällt für die Betrachtung des unteren Mittenbereichs in *Abbildung 40* ein Kontaktpunkt aller Bänder an 3. Mikrofonposition auf. Dabei lässt sich in diesem Fall ein Pegelabfall nur im 350 Hz Band auffinden. Damit steht das tiefste Band mit einem Pegelabfall von insgesamt 3,6 dB bei kleiner werdender Höhe im starken Kontrast zu der Entwicklung der restlichen Bänder in diesem Bereich. Für das 450 Hz Band lässt sich ein Pegelanstieg von 1 dB und für die Frequenzen um 570 Hz ein mit der abnehmenden Höhe stärker werdenden Pegelzunahme um 2,1 dB erkennen.

Die Entstehung eines Knotenpunkts scheint in dieser Frequenz eine Regelmäßigkeit darzustellen. Um dies zu bestätigen, bedarf es allerdings der Betrachtung einer 3. vertikalen Ebene. Der übergeordnete Verlauf des unteren Mittenbereichs wird vor allem durch den steigenden Charakter der beiden höheren Bänder dominiert. Aufgrund der größeren negativen Steigung im 350 Hz Bande sollte dieser Trend bei der Gesamtbetrachtung jedoch nicht vernachlässigt werden.

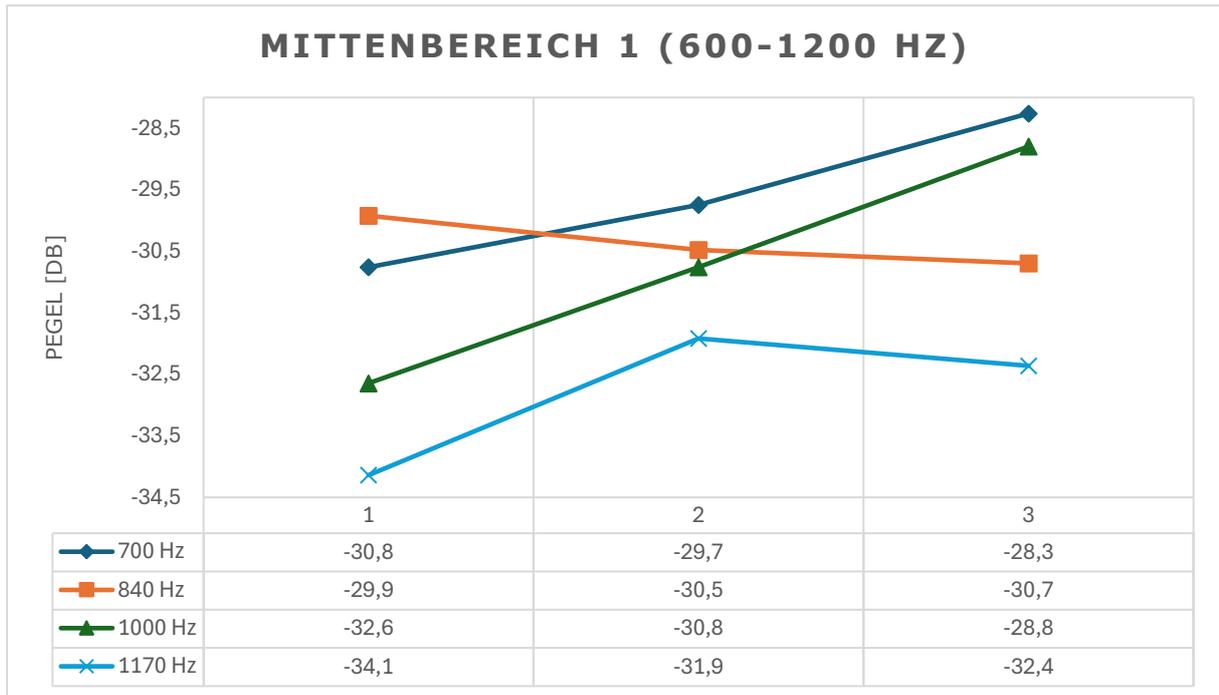


Abbildung 41: mittlere vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)

Entgegen der Erwartung von bei steigender Frequenz höher werdender Komplexität der Bänder kommt es hier zu weitestgehend stetigen Veränderung in der vertikalen Ebene (siehe *Abbildung 41*). Dabei verbindet das 700 Hz und 1000 Hz Band einen gemeinsamen Pegelanstieg bei gleichzeitig sinkender Höhe. Mit einer Steigung von 2,5 dB bei ersterem und einem Pegelanstieg von 3,8 bei zweiterem, unterscheiden sich zwar, weisen aber beide auf einen deutlichen Anstieg im Mittenbereich hin. Der absteigende Charakter des dazwischenliegenden 840 Hz Band kann aufgrund seines vergleichsweise schwachen Pegelabfalls von 0,8 dB in selbiger Richtung dieser Entwicklung nicht viel entgegenbringen. Bei der Betrachtung des höchsten Bandes im Mittenbereichs, bei 1170 Hz, fällt eine interessante Entwicklung auf. Zu Beginn orientiert sich dieses Band am steigenden Charakter des 700 Hz und 1000 Hz Bandes, nimmt aber ab der Mitte den Verlauf des 840 Hz Bandes an. Dabei stimmen die jeweilige positive und negative Steigung weitestgehend mit denen der Bezugsbänder überein.

Der Verlauf im Bereich von 600 – 1200 Hz wird besonders im oberen Teil von der Steigung in drei Bändern dominiert. Für den zweiten Teil kommt es zwar zu einer leichten Absenkung des Pegels bei 2 Frequenzen, bei dem aber aufgrund der bestehenden leichten negativen Steigung ein Überwiegen des pegelansteigenden Charakters in Richtung des Bodens zu erwarten ist.

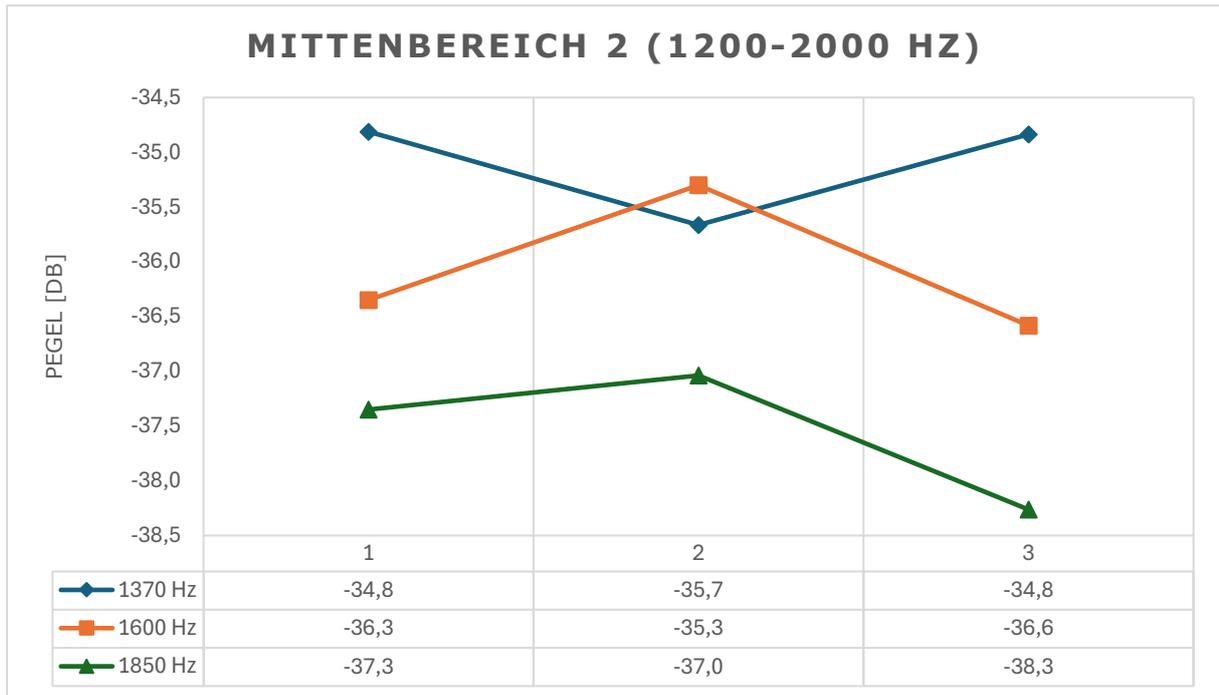


Abbildung 42: mittlere vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)

Bei erster Betrachtung der Graphen der *Abbildung 42* wird die konträre Bewegung der beiden unteren Bänder um 1370 Hz und 1600 Hz deutlich. Wegen ihrer engen energetischen Lage kommt es an 2. Position zu einer Kreuzung der beiden Bänder. Dabei entwickeln sich beide mit ungefähr gleicher Steigung in entgegengesetzte Richtungen fort. Während das 1370 Hz Band zur Mitte hin ein Pegelabfall von 0,9 dB aufweist, steigt im selben Abschnitt der Pegel des 1600 Hz um einen dazu sehr ähnlichen Wert von 1 dB. Im darauffolgenden Pegelanstieg bzw. -abfall besitzt der Verlauf des 1600 Hz Bandes eine etwas deutlichere Pegelabsenkung von 1,3 dB. Ein solcher Pegelabfall gleicher Stärke lässt sich auch im letzten Band dieses Bereichs um 1850 Hz erkennen. Dabei unterscheidet er sich im oberen Teil des Arrays mit einem Pegelanstieg von 0,3 dB deutlich vom Verlauf des 1600 Hz Bandes.

Für den Mittenbereich von 1200 -2000 Hz ist eine übergeordnete Ausprägung eines Maximalwertes zur Mitte zu erwarten. Diese Entwicklung wird jedoch durch das 1370 Hz Band etwas eingedämmt.

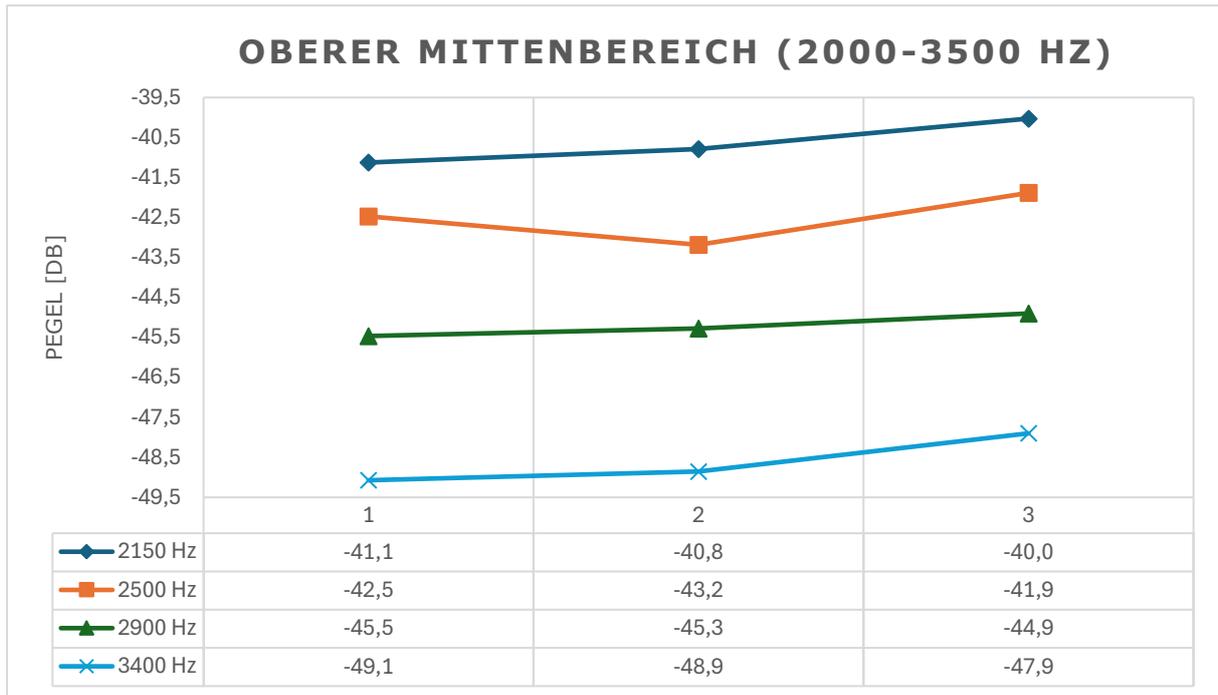


Abbildung 43: mittlere vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Der obere Mittenbereich wird auf den ersten Blick vor allem durch eine weitestgehend stetige Entwicklung in der vertikalen Ebene definiert (siehe *Abbildung 43*). Besonders fällt dabei der geradlinige Pegelanstieg der Bänder um 2150 Hz und 2900 Hz auf. Während es bei ersteren zu einer Pegelzunahme von 1,1 dB kommt, lässt sich im 2900 Hz Band nur eine Steigerung von 0,6 dB erkennen. Das von diesen beiden eingeschlossene Band um 2500 Hz fällt ab der obersten Position zunächst um 0,7 dB ab, kompensiert diese Pegelabsenkung jedoch durch einen darauffolgenden Anstieg von 1,3 dB wieder. Im höchsten Band des oberen Mittenbereichs kommt es erst ab der Mitte zu einer positionsabhängigen Veränderung in Form einer Pegelanhebung von 1 dB bei gleichzeitig sinkender Höhe.

Im Bereich von 2000 – 3500 Hz lässt sich als übergeordneter Verlauf eine eher leichte, aber stetige Pegelzunahme bei abnehmender Höhe nennen. Diese fällt aufgrund der positionsabhängigen Varianz im 2500 Hz und 3400 Hz Band zur unteren Hälfte hin etwas stärker aus.

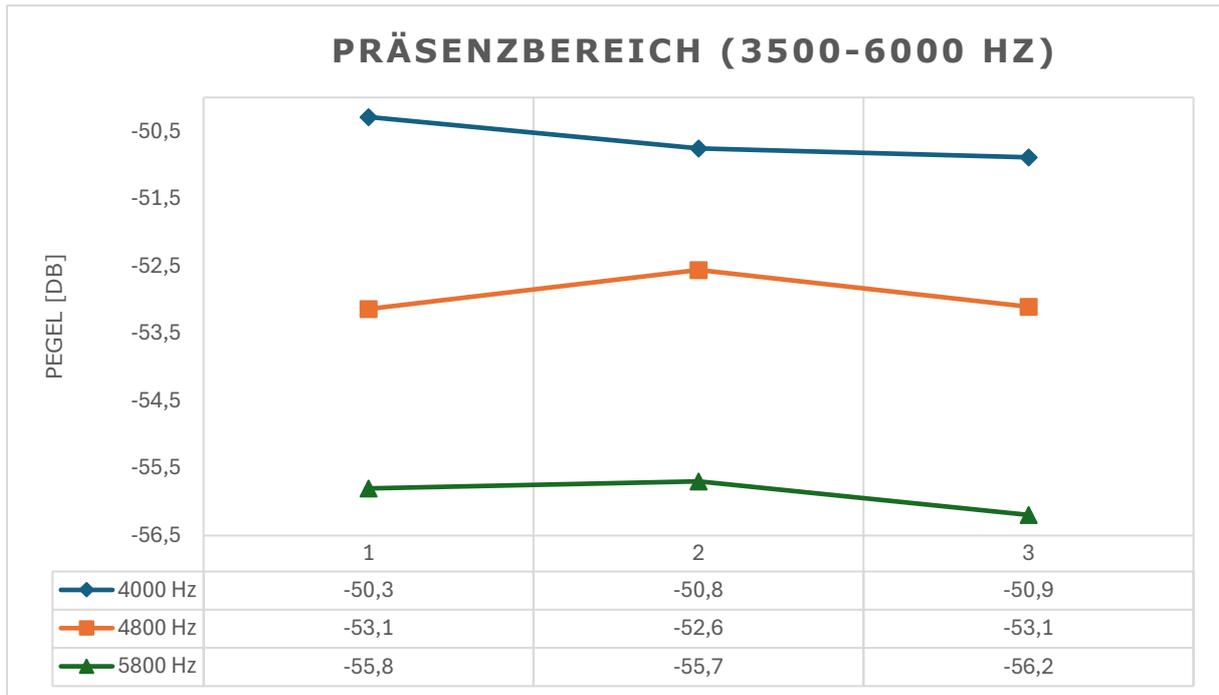


Abbildung 44: mittlere vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Auch im darauffolgenden Bereich von 3500 – 6000 Hz fallen bei genauer Untersuchung der *Abbildung 44* lediglich leichte Veränderungen zwischen benachbarten Mikrofonpaaren auf. Im Fall des tiefsten Bandes um 4000 Hz lässt sich eine mit geringer werdender Höhe kleiner werdenden Pegelabsenkung von insgesamt 0,6 dB auffinden. Das 2. Bark-Band um 4800 Hz kann dabei vornehmlich durch die Bildung einer Maximalstelle an 2. Mikrofonposition beschrieben werden, bei der es von beiden Seiten zu einem Pegelanstieg von nur 0,5 dB kommt. Mit steigender Frequenz wird die Stärke der positionsabhängigen Pegelunterschiede mit einer an höchster Mikrofonposition beginnender allgemeinen Pegelabsenkung von nur noch 0,4 dB bedeutend kleiner.

Betrachtet man vor allem die numerischen Werte des Präsenzbereichs, lässt sich dieser mit einer geringfügigen Positionsabhängigkeit definieren. Es finden leichte Pegelbewegungen in der vertikalen Ebene statt, welche aber aufgrund ihres geringfügigen Ausmaßes an Bedeutung für den Gesamtklang verlieren.

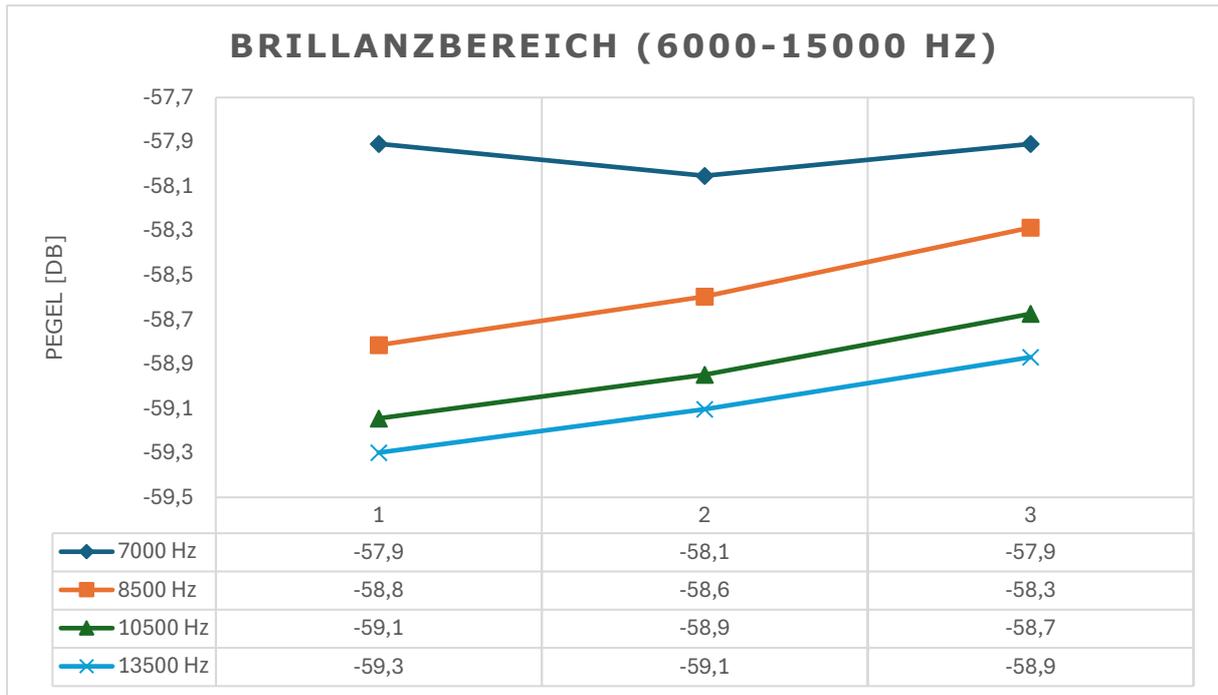


Abbildung 45: mittlere vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Auffällig im Brillanzbereich ist bei erster Betrachtung besonders der gleichförmig geradlinige Verlauf der beiden höchsten Bänder dieses Bereichs (siehe *Abbildung 45*). Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Steigung, welche in allen 3 Fällen durchgehend in positiver Richtung vorliegt. Im 8500 Hz Band lässt sich dabei ein Pegelanstieg von 0,5 dB bei abnehmender Höhe feststellen. Mit steigendem Abstand zum Boden verändert sich das Ausmaß des Pegelanstiegs nur geringfügig, was durch die im 10500 Hz und 13500 Hz vorliegenden Pegelzunahme von 0,6 dB deutlich wird. Eine Ausnahme zu dieser uniformen Bewegung stellt der Verlauf des tiefsten Bandes, um die zentrale Frequenz von 7000 Hz, dar. Durch einen von beiden Seiten erkennbarem gleichwertigen Pegelabfall von 0,2 dB zur Mitte kommt es hier zu einer Bildung eines Minimalwertes an 2. Mikrofonposition.

Aufgrund der uniformen Bewegung der drei höheren Bänder lässt sich der Brillanzbereich mit einem allgemeinen geradlinigen Pegelanstieg von oben nach unten charakterisieren. Der Pegelabfall im 7000 Hz Band hat dabei aufgrund seiner geringen Ausprägung nur wenig Auswirkung auf den Gesamtverlauf im Bereich zwischen 6 – 15 kHz.

6.4.3 Messungen der rechten Ebene

Ebenso wie in der mittleren vertikalen Ebene stehen auch in der 3. Ebene am rechten Rand des Arrays nur drei Mikrofonpositionen zur Verfügung.

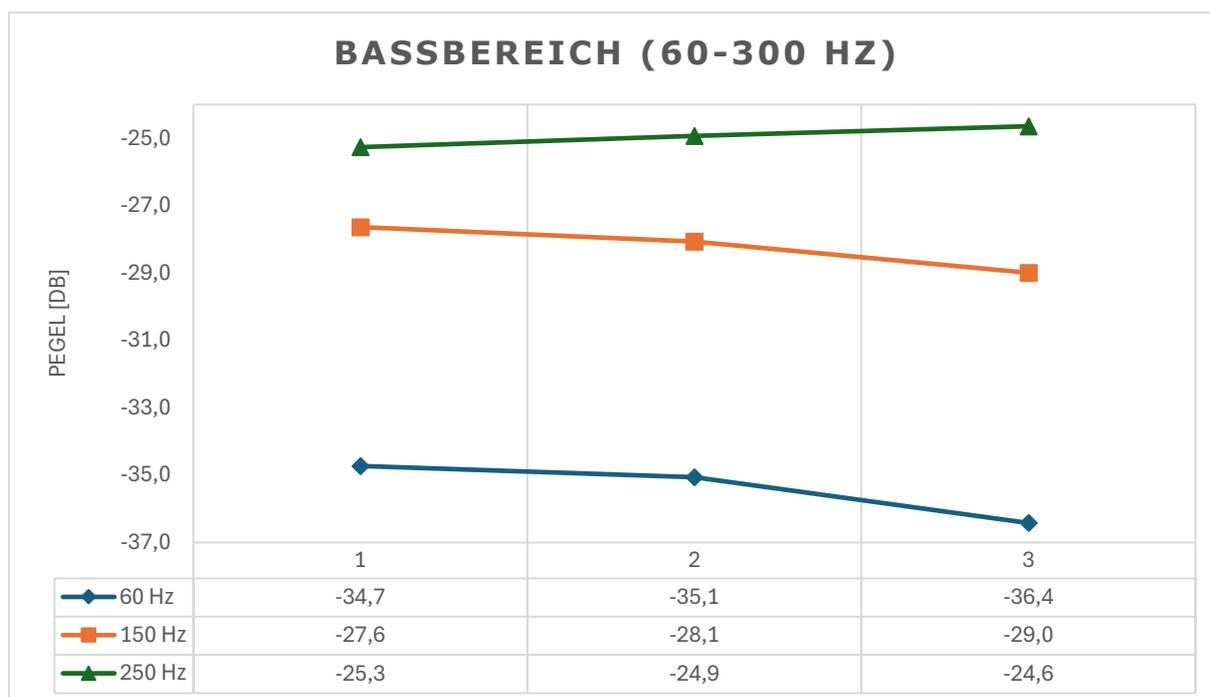


Abbildung 46: rechte vertikale Ebene - Bassbereich (60-300 Hz)

Beginnend im Bassbereich lässt sich eine bereits bei erster bekannter Konstellation der drei Bark- Bänder auffinden. Hierbei stimmen die generellen Bewegungen der Bänder mit denen aus der linken und mittleren Ebene überein (siehe *Abbildung 46*). Es kommt lediglich in Bezug auf das Ausmaß der Pegelveränderungen zu Unterschieden zwischen den Ebenen. Im Falle der rechten Ebene lässt sich für das tiefste Band eine mit sinkender Höhe stärker werdende Pegelabsenkung von insgesamt 1,7 dB erkennen. Für das nächste Band mit einem ähnlichen Verlauf fällt diese Absenkung mit insgesamt 1,4 dB etwas geringer aus. Untersucht man als nächstes das 250 Hz Band, so lässt sich der zu erwartende Wechsel von einer negativen zu einer positiven Verlaufsrichtung des Bandes bemerken. Wenn auch mit einer Steigung von nur 0,7 sehr verhalten, kommt es in diesem Bereich zu einem Pegelanstieg bei gleichzeitig kleiner werdenden Höhe.

Der Bereich von 60–300 Hz wird vorrangig von den Pegelabfällen der beiden tiefsten Bänder dominiert. Es kommt zwar bei höher werdender Frequenz zu einem Anstieg des Pegels ab der obersten Position, doch reicht dies nicht zu einer Umlenkung des generellen negativen Trends des Bassbereichs aus.

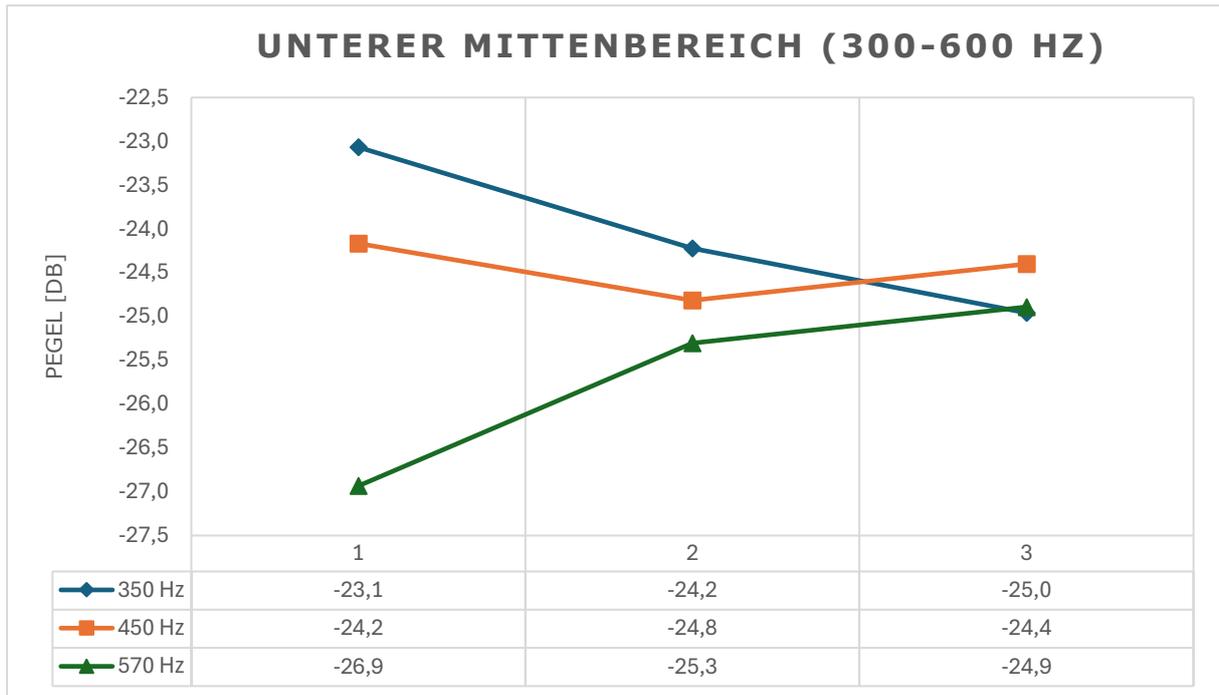


Abbildung 47: rechte vertikale Ebene - unterer Mittenbereich (300-600 Hz)

Die in der mittleren vertikalen Ebene aufgestellte Hypothese kann durch das Auftreten des Knotenpunktes in *Abbildung 47* bestätigt werden. Zwar kommt es in dieser Ebene zu keinem perfekten Kontaktpunkt, da sich das 450 Hz Band in der unteren Hälfte parallel zum 570 Hz Band entwickelt, eine deutliche zusammenlaufende Bewegung ist trotzdem in allen Bändern erkennbar. Wie bereits angemerkt kommt es in der unteren Hälfte des Arrays zu einem 0,6 dB starken parallel verlaufenden Pegelanstieg im 450 Hz und 570 Hz Band. Der zusammenlaufende Charakter dieses Bandes wird dann besonders sichtbar, wenn man die Steigungen dieser beiden Bänder in der oberen Hälfte betrachtet. Dabei weist das 450 Hz Band einen Pegelabfall von 0,6 dB auf, während die Frequenzen um 570 Hz mit einer Steigung von 1,6 dB angehoben werden. Im Falle des höchsten Bandes des unteren Mittenbereich lässt sich ein weitestgehend stabiler Pegelabfall von insgesamt 2 dB auffinden, was in dem bereits angesprochenen Kontaktpunkt an 3. Position resultiert.

Für den Bereich von 300 – 600 Hz lässt sich ein zur Mitte hin fallender Charakter annehmen, welche vor allem durch den Verlauf der beiden tieferen Bänder hervorgerufen wird. Zum unteren Teil hin kommt es aufgrund des parallelverlaufenden Anstiegs der beiden höheren Bänder zu einem leichten Pegelanstieg zum unteren Rand des Arrays.

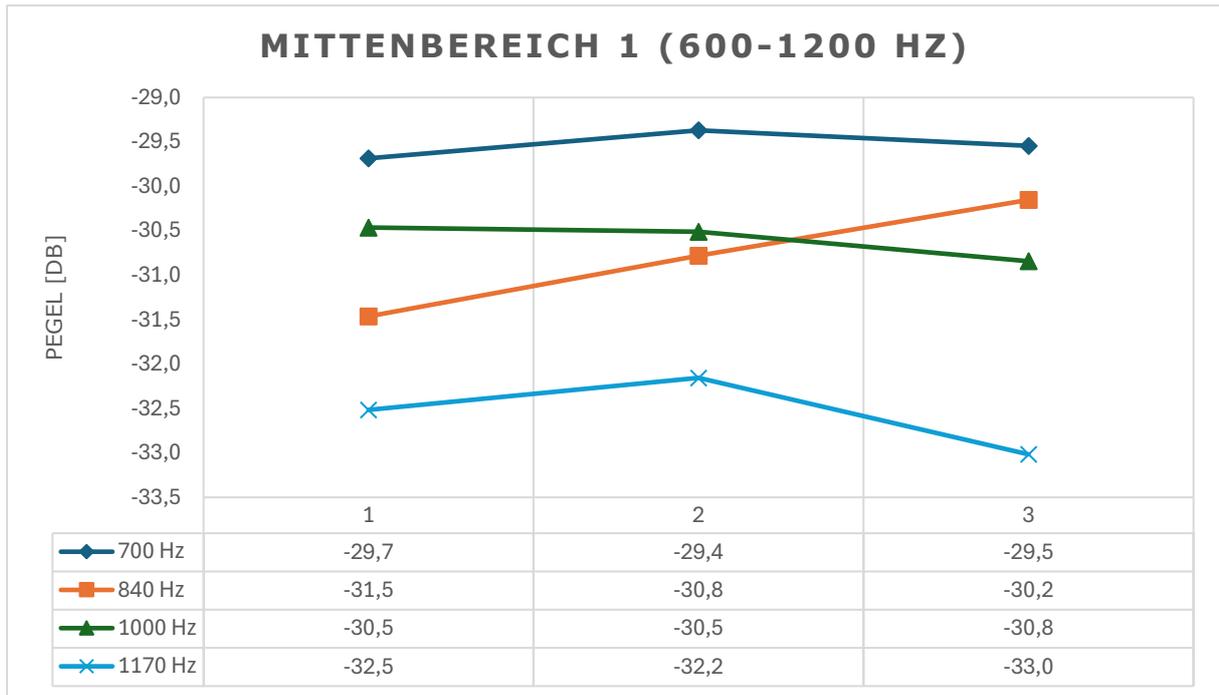


Abbildung 48: rechte vertikale Ebene - Mittenbereich 1 (600-1200 Hz)

Der Bereich um 600 – 1200 Hz weist auf den ersten Blick vornehmlich stetige Entwicklung der Bark Bänder auf (siehe *Abbildung 48*). Lediglich das höchste Band bei 1170 Hz sticht durch einen vergleichsweise hohen Pegelabfall von 0,8 dB in der unteren Hälfte heraus. Für die Bänder bei 700 Hz und 1000 Hz lässt sich ein kleiner Dynamikraum von jeweils 0,3 dB über den ganzen Verlauf der vertikalen Ebene erkennen, was auf eine geringe Positionsabhängigkeit in diesen Frequenzbändern hinweist. Lediglich das 840 Hz Band weist eine höhere positionsabhängige Veränderung auf. Dabei kommt es mit abfallender Höhe zu einer geradlinigen Verstärkung des Pegels um insgesamt 1,3 dB

Der gerade beschriebene Bereich weist in vielen Frequenzen auf eine schwache Positionsabhängigkeit in Bezug auf den spektralen Schwerpunkt hin. Zur unteren Hälfte des Arrays kommt es ebenfalls durch die entgegenwirkenden Anstiege und Abfälle des 840 Hz und 1170 Hz Bandes zu keiner nennenswerten positionsabhängigen Veränderung.

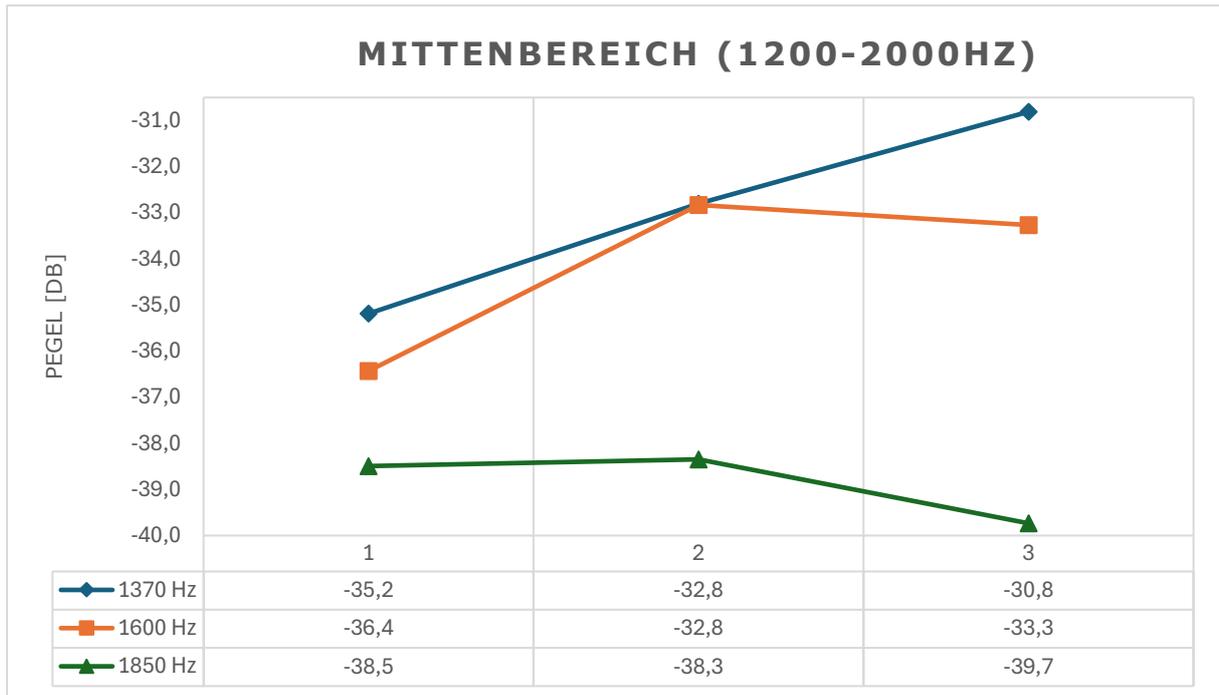


Abbildung 49: rechte vertikale Ebene - Mittenbereich 2 (1200-2000 Hz)

Als Auffälligkeit im Bereich von 1200 – 2000 Hz lässt sich bei erster Betrachtung der Graphen in *Abbildung 49* die energetische Nähe der beiden tieferen Bänder bei 1370 Hz und 1600 Hz aufzeigen. Beide weisen dabei in der ersten Hälfte eine Pegelzunahme mit unterschiedlicher Steigung auf. Im Fall des 1370 Hz Bandes erstreckt sich diese Steigung von durchschnittlich 2,2 dB (+- 0,2 dB) weitestgehend geradlinig über die ganze Höhe des Arrays. Der Verlauf des 1600 HZ Bandes deutet zwar in den oberen Mikrofonpositionen mit einem Pegelanstieg von 3,6 dB auf eine deutlich steilere Entwicklung des mittleren Bandes hin, zeigt aber durch den darauffolgenden Pegelabfall von 0,5 dB eine erhöhte Positionsabhängigkeit im Bereich um 1600 Hz auf. Ein solcher Pegelabfall zur unteren Hälfte des Arrays lässt sich ebenfalls im nächsthöheren Bark-Band bei 1850 Hz auffinden. Dabei kommt es nach einem geradlinigen Verlauf ab der 2. Mikrofonposition zu einem Pegelabfall von 1,4 dB.

Der obere Mikrofonbereich dieses Bandes wird vornehmlich durch den ansteigenden Trend der beiden tieferen Bänder dominiert- Aufgrund der in der unteren Hälfte auffindbaren Pegelabfällen im 1600 Hz und 1850 Hz Band kann es mit kleiner werdender Höhe zu einem Abflachen der zuvor herrschenden ansteigenden Entwicklung kommen.

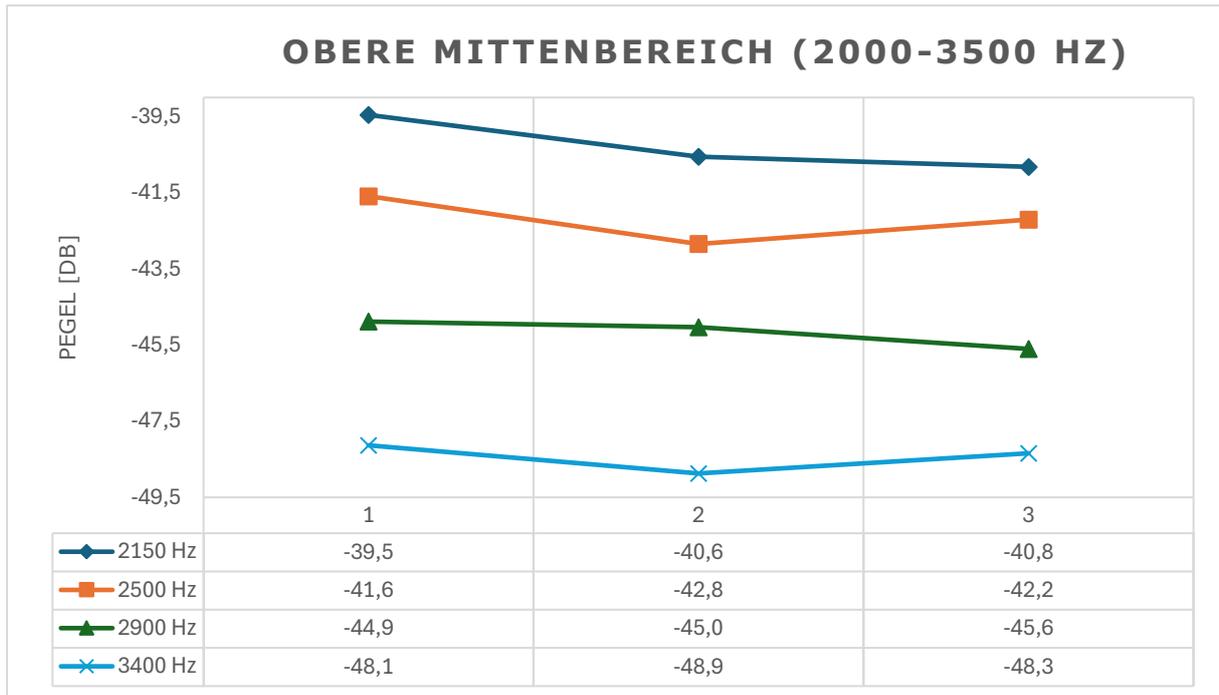


Abbildung 50: rechte vertikale Ebene - oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz)

Auch der obere Mittenbereich von 2000 – 3500 Hz weist eine hohe Geradlinigkeit der Betrachtung der Bark-Bänder auf (siehe *Abbildung 50*). Vor allem in den Bändern um 2150Hz und 2900 Hz lässt sich ein weitestgehend stabiler Pegelabfall zum unteren Ende erkennen. In ersterem kommt es dabei zu einer mit kleiner werdender Höhe abflachenden Pegelabsenkung von insgesamt 1,3 dB. Im 2900 Hz Band hingegen sinkt der Pegel im selben Abschnitt nur um insgesamt 0,7 dB. Die Bark-Bänder bei 2500Hz und 3400 Hz lassen sich besonders über die Betrachtung der Ausbildung einer Minimalstelle an 2. Mikrofonposition beschreiben. Bei ersterem kommt es zu einem linkseitigem Pegelabfall von 1,2 und einer rechtseitigem Pegelanstieg um 0,6 dB. Im zweiten Fall kommt es zu einem beidseitigen Pegelabfall von durchschnittlich 0,7 dB.

Aufgrund der geringen Pegelunterschiede zwischen benachbarten Mikrofonen ist klangfarbliche Entwicklung des obere Mittenbereich weitestgehend positionsunabhängig. Es lässt sich allerdings über die Höhe des Arrays hinweg ein leichter Pegelabfall aufzeigen.

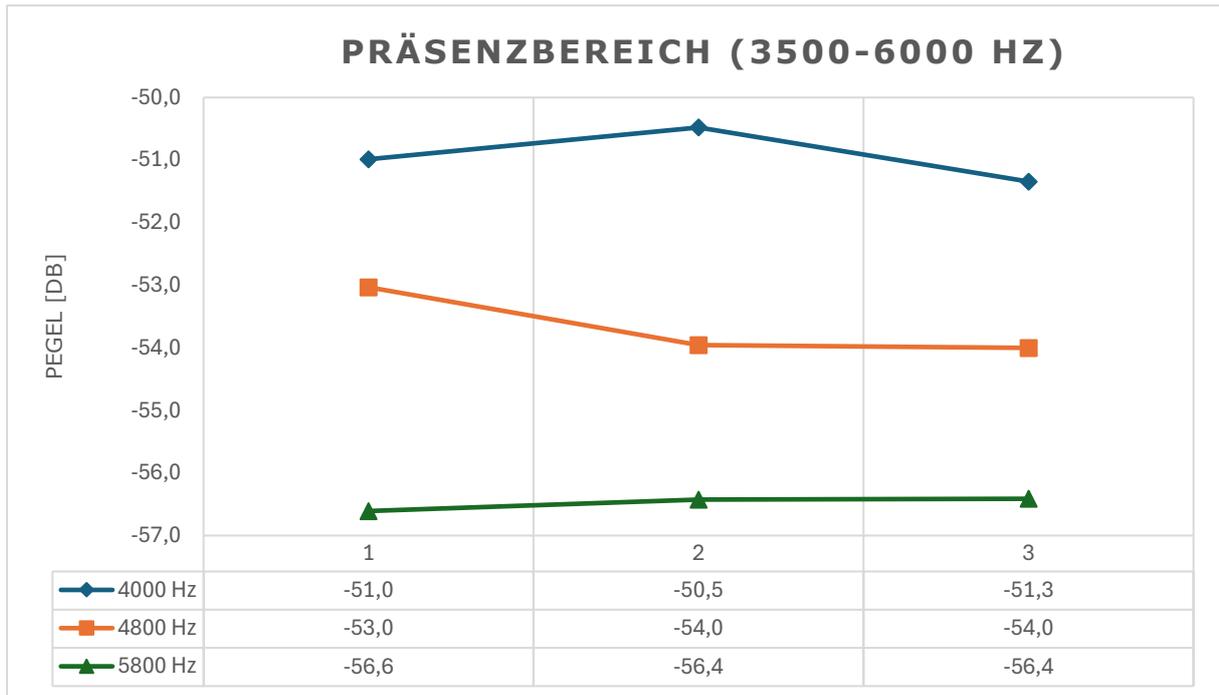


Abbildung 51: rechte vertikale Ebene - Präsenzbereich (3500-6000 Hz)

Betrachtet man die Entwicklung der Bark-Bänder im Bereich von 3500 – 6000 Hz, dargestellt in *Abbildung 51*, unter dem Einfluss der angepassten Skalierung der y-Achse, so wird eine weitere Abnahme der positionsabhängigen Pegelunterschiede erkennbar. Im Fall des 4000 Hz Bandes kommt es trotz dieser Erkenntnis zu einer Maximalwertbildung, welche allerdings durch einen 0,5 dB Pegelanstieg gefolgt von einem 0,8 dB Pegelabfall sehr gering ausfällt. Bei höher werdender Frequenz kommt es, wie im 4800 Hz Band zu sehen, nur noch zu einer Entwicklung des Pegels in der oberen Hälfte, welche die Form eines Abfalls um 1 dB annimmt. Diese Entwicklung endet im 5800 Hz Band, bei dem im Vergleich dazu kaum eine Veränderung des Pegels auffindbar ist.

Der Präsenzbereich lässt sich allgemein über seine geringe Positionsabhängigkeit charakterisieren, was lediglich durch einen leichten Pegelabfall im 4800 Hz Band unterbrochen wird.

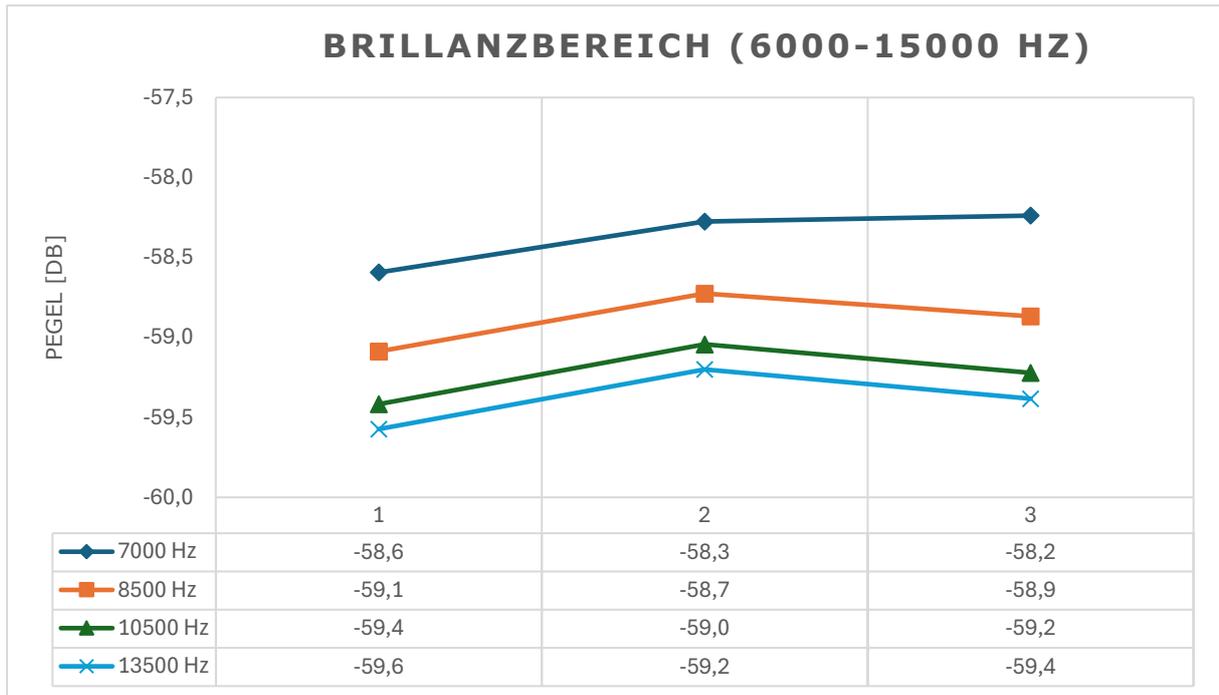


Abbildung 52: rechte vertikale Ebene - Brillanzbereich (6000-15000 Hz)

Entgegen des bei Betrachtung von *Abbildung 52* entstehenden ersten Eindrucks von deutlich positionsabhängigen Veränderungen der hier dargestellten Bänder, bemerkt man bei der Auswertung der numerischen Werte im Brillanzbereich nur leichte Pegelunterschiede innerhalb der Vertikalebene. Dabei lässt sich der Verlauf des 7000 Hz Bandes aufgrund seines Dynamikumfangs von 0,3 dB als geradlinig ansehen. Die restlichen höheren Bänder dieses Bereichs lassen sich durch eine gleichförmige weitestgehende parallel verlaufende Pegelanhebung von durchschnittlich 0,4 dB beschreiben.

Trotz der deutlichen sichtbaren Veränderungen im Graph des Brillanzbereich zeigt die numerische Auswertung nur geringe Entwicklungen auf. Als nennenswerte übergeordnete Charakterisierung sollte dabei jedoch die leichte Pegelanhebung von 0,8 dB bei geringer werdender Höhe genannt werden.

6.4.4 Zugrundeliegende Mechanismen der vertikalen Ebenen

Auch in der vertikalen Ebene hat der Resonanzboden einen großen Anteil an der Abstrahlcharakteristik verschiedener Frequenzen. Im Gegensatz zur horizontalen Ebene kann hier jedoch der Reflektionen am Deckel ein deutlich größerer Einfluss zugeschrieben werden.

Der Eingriff des Resonanzbodens wird besonders in den tiefen Frequenzen in Form eines Pegelabfalls bei geringer werdender Höhe der tieferen Bark-Bänder deutlich.

Der Grund dafür besteht in der gegenphasigen Schallabstrahlung ober- und unterhalb des Resonanzbodens, was in einer Abschwächung der gegenphasigen Anteile in der horizontalen Ebene resultiert (Meyer 2015, S. 132). Dies hat unter anderem mit den großen Wellenlängen der unteren Frequenzen zu tun, was sie dazu ermächtigt Hindernisse zu umgehen, wie in dem hiesigen Fall den Korpus. Durch diese Eigenschaften kommt es zu einer Auslöschung gegenphasiger Schallanteile, was in einer reduzierten Abstrahlung bestimmter Frequenzen resultiert (siehe Kapitel 4.2).

In den mittleren Frequenzen lässt sich, ähnlich wie in der horizontalen Ebene, eine hohe Komplexität der Bark-Bänder auffinden. Dies beruht auf den komplexen Schwingungsmustern des Resonanzbodens, durch die es zu Schallabstrahlung an mehreren verschiedenen Punkten des Resonanzbodens mit entsprechender unterschiedlicher Phasenlage kommt. Eine Summierung dieser Schallwellen mit denen vom Deckel reflektierten Wellen resultiert in einer phasenbedingten Auslöschung bestimmter Frequenzen. Bork spricht dabei von sogenannten Interferenzschwankungen. (Bork 1996, S. 3)

Für die höheren Lagen weist schon Meyer auf eine erhöhte Richtwirkung durch die Reflektion am Deckel hin (Meyer 2015, S. 134). Dies wird auch bei Betrachtung der Entwicklungen der Bark-Bänder dieses Bereichs sichtbar, entwickelt sich jedoch zum rechten Rand des Arrays zurück. Bei diesem Effekt lässt sich ein Einfluss der Form des Deckels, welcher zum hinteren Ende kleiner wird, hinzunehmen. Hierbei handelt es sich jedoch aufgrund fehlender Informationen in der Fachliteratur nur um eine Vermutung, welche in einer weiterführenden Arbeit genauer untersucht werden sollte.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die im Kapitel 6 aufgeführten Beobachtungen geben einen detaillierten Einblick in die positionsabhängigen Veränderungen der Klangfarbe. Die in den Bark-Bändern beobachteten horizontalen sowie vertikalen Regelmäßigkeiten wurden für verschiedene Frequenzbereiche in folgenden *Heatmaps* zusammengefasst, welche als übersichtliches Werkzeug für die akustische Musikproduktion angesehen werden können. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass es aufgrund der im Vergleich zu den Bark-Bändern großen Bandbreite der dargestellten Frequenzbereiche zu einer gröberen Auflösung der Pegelunterschiede kommt. Aufgrund der um zwei Mikrofonpositionen verschobenen obersten Ebene kommt

es am linken Rand zu fehlenden Werten für zwei korrespondierende Mikrofonpositionen sowie einer daraus resultierenden Stelle ohne Werte in der rechten oberen Ecke des Arrays, welche in den Darstellungen durch weiße Rechtecke gekennzeichnet sind. In Bezug auf die Nummerierung kommt es aufgrund dessen zu zehn möglichen Mikrofonpositionen in der horizontalen Achse über alle drei Ebenen verteilt, was für den Vergleich der Heatmaps mit den Ergebnissen aus Kapitel 6 eine Verschiebung der Mikrofonpositionen der unteren beiden Ebenen um zwei Stellen nach rechts bedeutet.

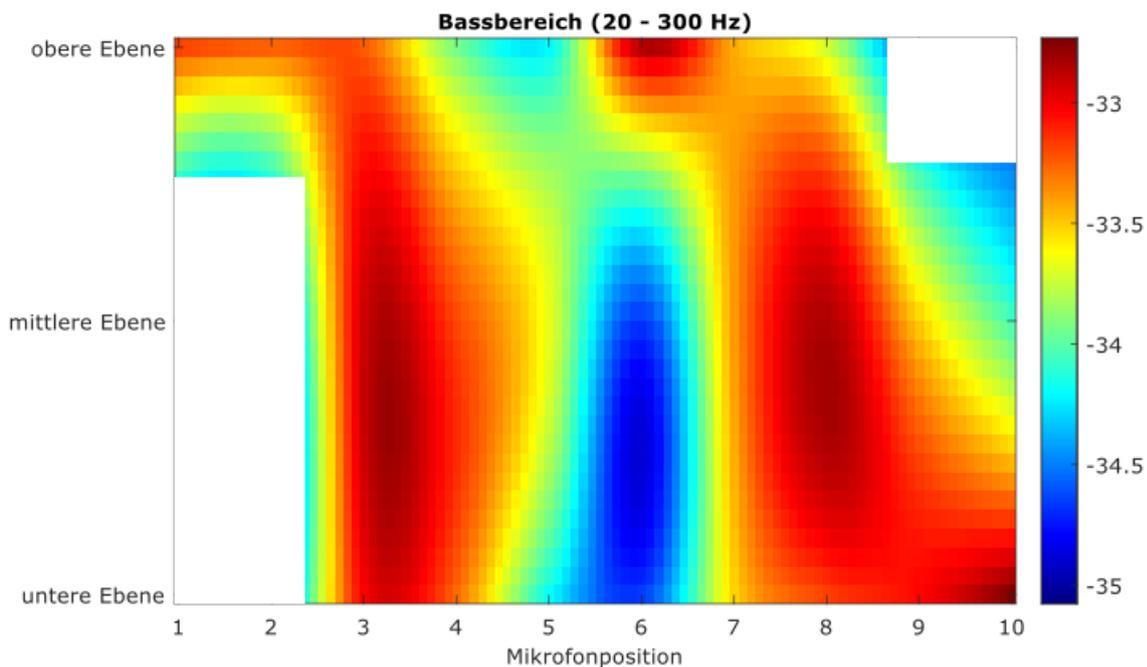


Abbildung 53: Heatmap Bassbereich (20-300 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im Bassbereich

Der Bereich von 20-300 Hz wird durch zwei dominante Bereiche bei 3. und 8. Mikrofonposition charakterisiert (siehe *Abbildung 53*). Dies korreliert mit der Form der Resonanzbodenmoden für diesen Frequenzbereich. Der dadurch im Resonanzboden aufkommende Schwingungsknoten wird durch ein Pegelminimum in der Mitte, um die 6. Mikrofonposition, deutlich. In Bezug auf die Veränderungen in der vertikalen Ebene lässt sich eine weitestgehend säulenartige Ausbreitung in den bereits genannten dominanten Bereichen aufzeigen. Lediglich in der unteren rechten Ecke, der oberen linken Ecke und in der obersten Ebene an 6. Position kommt es zu einer zusätzlichen Ausbildung von Hotspots.

Vergleicht man die gemessenen Ergebnisse mit den subjektiven Eindrücken der Höranalyse, so lassen sich einige Überschneidungspunkte erkennen. Besonders in der untersten und oberen Ebene spiegeln sich die Hotspots des Bassbereichs wider.

Für die Positionierung der Mikrofone gibt es daher vornehmlich zwei vertikale Ebenen, bei denen ein deutliches Hervortreten des Bassbereichs zu erwarten ist. Für die mittlere Ebene scheinen im Vergleich andere Frequenzbereiche den Höreindruck zu dominieren.

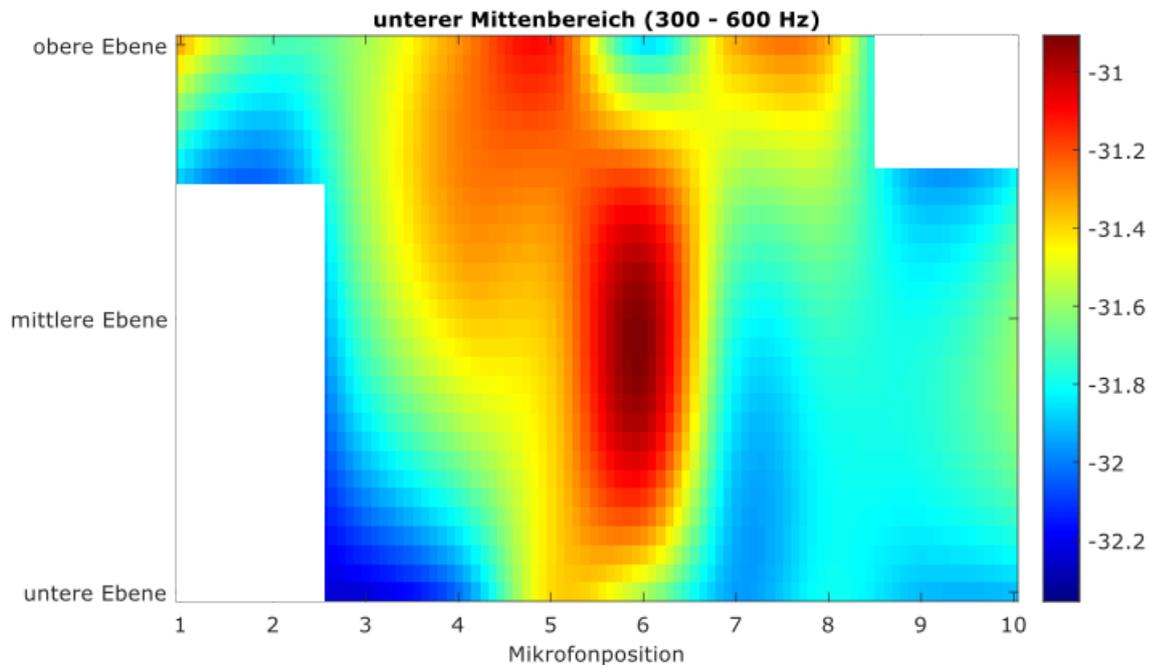


Abbildung 54: Heatmap unterer Mittenbereich (300-600 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im unteren Mittenbereich

Bei der Auswertung der Bark-Bänder des unteren Mittenbereichs kam es immer wieder zu kontrastierenden Bewegungen zwischen den Bändern, was in *Abbildung 54* durch die Ausbildung von lediglich einem Hotspot an 6. Position in der Mitte des Arrays deutlich wird. Um diesen Bereich herum kommt es zu einer flächendeckenden Präsenz mit mittlerer Intensität, was durch die weitestgehend grüne Einfärbung dieser Bereiche und der geringen Ausprägung von Minimalstellen zu erkennen ist. Diese flächendeckende Präsenz kann durch die in Kapitel 6 deutlich gewordene Komplexität der Bark-Bänder erklärt werden, welche aufgrund der größeren Bandbreite der Frequenzbereiche der Heatmaps zu großflächigeren Veränderungen in der Gesamtdarstellung verschwimmen.

In der Höranalyse werden die unteren Mitten nur selten genannt, was im Einklang mit dem gerade aufgeführten flächendeckenden Charakter dieses Bereiches steht. Aufgrund der mit zwei Ausnahmen bestehenden mittleren Intensität dieses Bereichs dominieren andere Frequenzbereiche die Hörwahrnehmung. Bewegt man das Mikrofon im Bereich des hier untersuchten Arrays, so kann man mit einer an

den meisten Stellen moderaten Präsenz der unteren Mitten rechnen, ist jedoch auf eine Anhebung dieser zur Mitte hin achten.

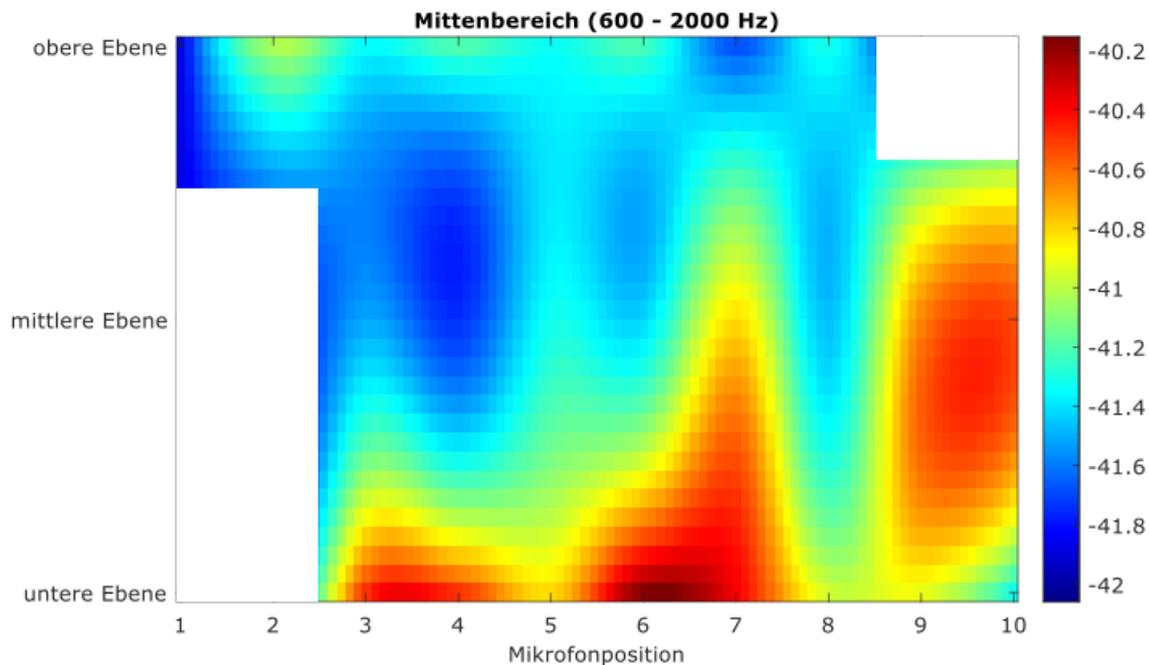


Abbildung 55: Heatmap Mittenbereich (600-2000 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im Mittenbereich

Auch in *Abbildung 55* wird durch die im Vergleich zum Kapitel 6 großen Bandbreite der in der Darstellung zusammengefassten Frequenzwerte die starke Positionsabhängigkeit nur bei genauerer Betrachtung sichtbar. Durch die Auslöschung positiver und negativer Maximalwerte der hier zusammengefassten Bark-Bänder lässt sich gerade in der Mitte nur eine geringfügige Intensität des Mittenbereichs aufzeigen. Bei genauerer Betrachtung können die Pegelunterschiede benachbarter Mikrofonpositionen, welche als charakteristisch für den Mittenbereich aufgezeigt wurden, anhand der immer wieder auftretenden kleinen hellgrünen Bereiche gesehen werden. In Bezug auf die vertikale Entwicklung lässt sich vornehmlich eine hohe Intensität der Mitte der unteren Ebene, sowie am rechten Rand erkennen.

Die Bildung von Hotspots in der unteren Ebene sowie am rechten Rand werden durch die Höreindrücke der Höranalyse bestätigt. Der ebenfalls von oben nach unten und zum rechten Rand hörbar zunehmender Charakter kann in der *Heatmap* durch die Ausbildung der Rot eingefärbten Hotspots erkannt werden. Kommt es im Falle der Aufnahme zu einer Überbetonung des Mittenbereichs, würde eine Bewegung des Mikrofons in Richtung der linken oberen Ecke dieses Problem beheben.

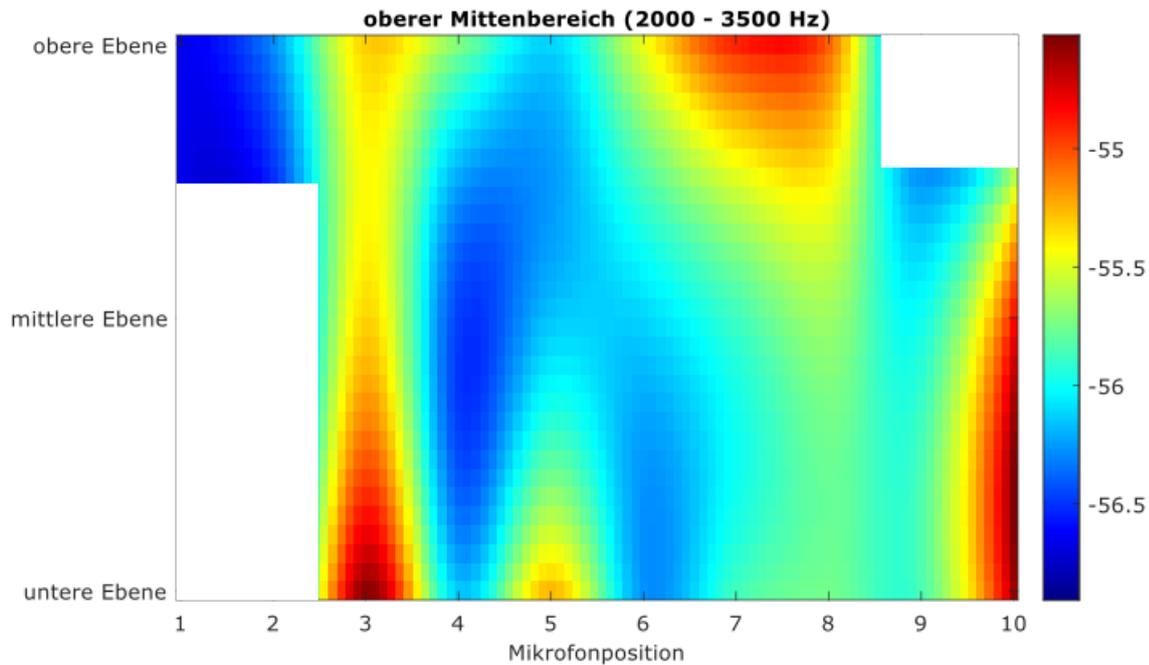


Abbildung 56: Heatmap oberer Mittenbereich (2000-3500 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im oberen Mittenbereich

Mit höher werdender Frequenz weist die in *Abbildung 56* dargestellte *Heatmap* eine Verlagerung der Schwerpunkte zur linken Seite sowie zum oberen Rand des Arrays hin. Lediglich die Hotspots in der unteren linken Ecke und am rechten Rand bleiben aus dem Mittenbereich erhalten. Besonders markant ist die durchweg hohe Präsenz der oberen Mitten in der vertikalen Ebene der 3. Mikrofonposition. Wo es zuvor nur in der unteren Ebene zu einem Hotspot kam, erstreckt er sich hier über die ganze Höhe des Arrays. Ebenfalls hervorzuheben sei an dieser Stelle der deutliche Anstieg der Intensität am rechten Rand, was diesen in Bezug auf die Position des Mikrofons um das Klavier herum an das hintere Ende des Instruments platziert. Mit steigender Frequenz wird die Reflektion durch den Deckel und damit das Verhältnis von Direktschall und reflektierten Schall wichtiger, was in diesem Fall die Zunahme in der oberen Ebene sowie die am rechten Rand erklärt.

Beim Vergleich dieser Erkenntnisse mit dem Eindrücken der Höranalyse stimmen die Bereiche von hoher Intensität weitestgehend überein. Lediglich im Bereich des rechten Randes scheint trotz der hohen Intensität der oberen Mitten der Eindruck eines dunkelnen Klangs zu überwiegen. Für die Positionierung sollten hier besonders die deutlich geringere Präsenz in der Mitte des Arrays beachtet werden und die daraus resultierende Zunahme bei einer Bewegung in Richtung der Ränder beachtet werden.

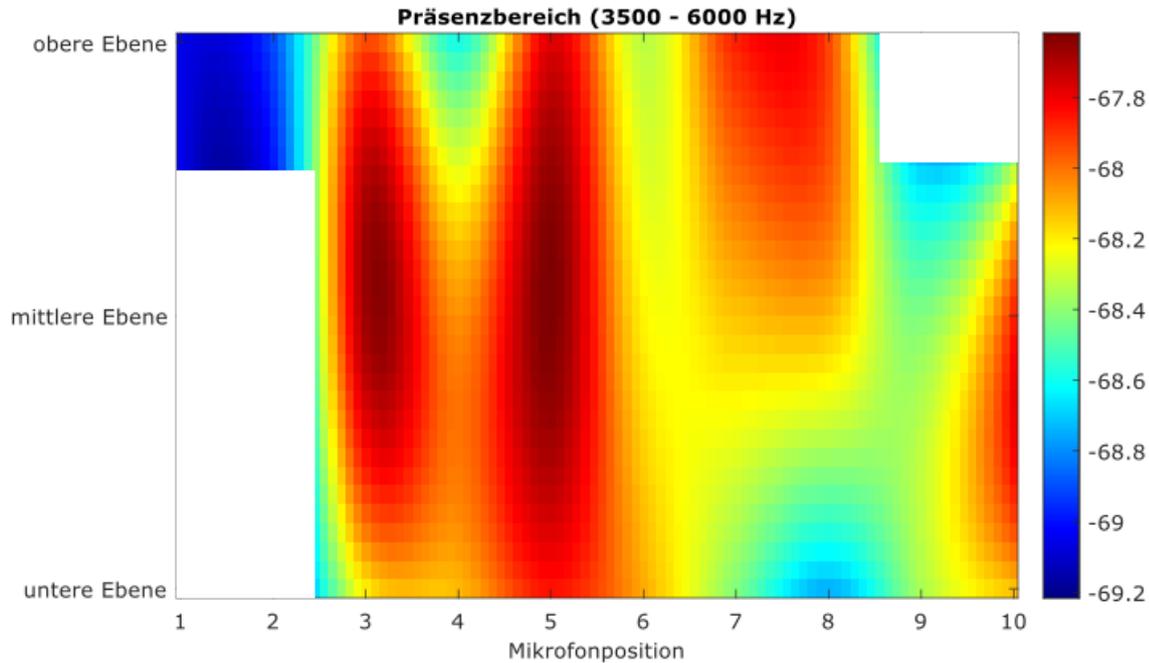


Abbildung 57: Heatmap Präsenzbereich (3500-6000 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im Präsenzbereich

Im Bereich von 3500 Hz bis 6000 Hz lässt sich eine grundlegend hohe Intensität vieler Bereich erkennen (siehe *Abbildung 57*), welche besonders stark in der linken Hälfte ausgeprägt sind. Dabei stechen die vertikalen Ebenen der 3. und 5. Mikrofonposition mit einer deutlich erhöhten Intensität heraus. Im Gegensatz dazu fallen die Bereiche von hoher Intensität in der rechten Hälfte weniger stark und etwas großflächiger aus (besonders im Bereich der 7. und 8. Mikrofonposition). Betrachtet man die Entwicklung der Bark Bänder des Präsenzbereichs, so lässt sich als Grund für diese stark ausgeprägten Maximalstellen die uniformen Bewegungsmuster anbringen. Durch einen gleichzeitigen Anstieg und Abfall der Pegel der Bänder kommt es im Falle einer Zusammenlegung dieser zu einem Erhalt dieser übergeordneten gleichförmigen Bewegungen. Für die Positionierung von Mikrofonen sollte in Bezug auf die Frequenzen zwischen 3500 Hz und 6000 Hz mit einer verstärkten Präsenz in der linken Hälfte des Arrays gerechnet werden.

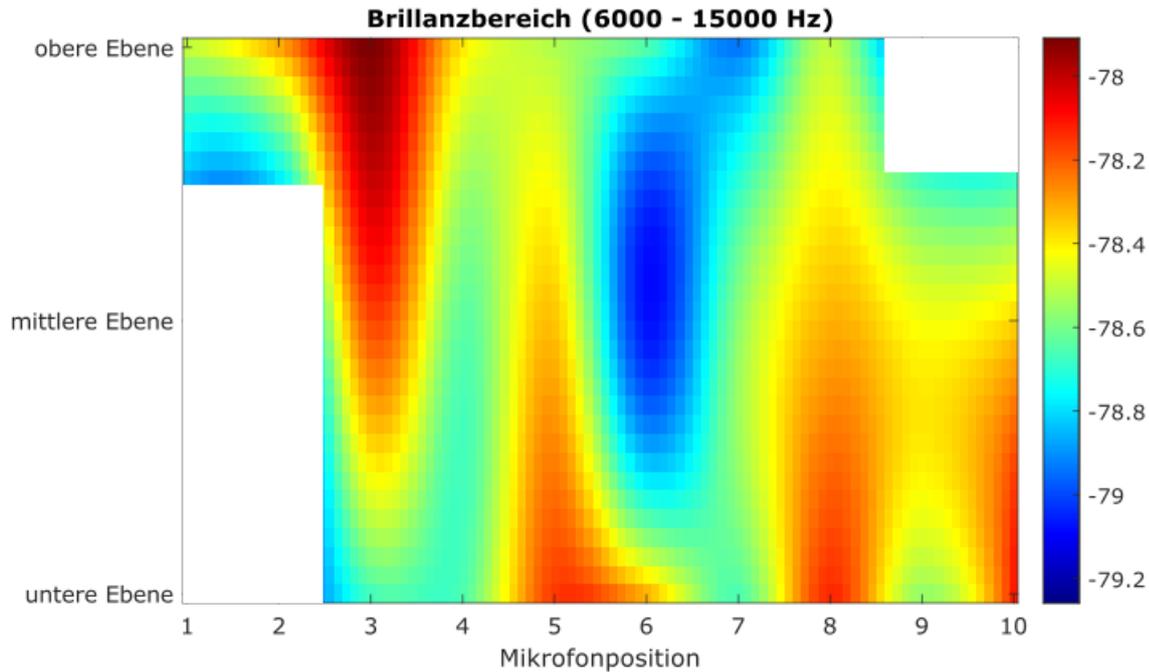


Abbildung 58: Heatmap Brillanzbereich (6000-15000 Hz) - Zusammenfassung der horizontalen und vertikalen Ebenen im Brillanzbereich

Für die obersten Frequenzen des analysierten Raums lässt sich eine starke Abhängigkeit der Intensität zur Höhe erkennen (siehe *Abbildung 58*). Am deutlichsten wird dies bei Betrachtung des 1. Hotspots in der obersten Ebene an 3. Mikrofonposition. Zwar ragt dieser bis in die mittlere Ebene hinein, hat seinen Schwerpunkt jedoch trotzdem in der obersten Ebene. Bei weiterem rechtsgerichtetem Verlauf lassen sich ähnliche Entwicklungen ausgehend von der untersten Ebene mit unterschiedlicher Ausprägung an 5., 8. und 10. Mikrofonposition erkennen. Auffällig ist hier, dass zwischen den *Hotspots*, besonders zwischen 5 und 8, die Intensitäten rapide abfallen. Diese Beobachtung kann, ähnlich wie im Präsenzbereich, durch die uniforme Bewegung der obersten Bark-Bänder erklärt werden, welche sich in diesem Fall in Bezug auf den Verlauf zwischen den Ebenen stark unterscheiden.

Bei einem Vergleich der *Abbildung 58* und der Ergebnisse der Höranalyse aus Kapitel 6.1 kommt es zu einer deutlichen Diskrepanz zwischen den gemessenen Eigenschaften und den angegebenen Höreindrücken. Als Grund dafür kann die abfallende Empfindlichkeit im Bereich über 6000 Hz genannt werden (Meyer 2015, S. 17), welche die tatsächliche Intensität dieses Bereichs im Vergleich zu den anderen Frequenzräumen untergehen lässt.

Aufgrund der Kombination der Höranalyse sowie der Messung der horizontalen und vertikalen Ebene lassen sich folgende übergeordnete Aussagen bezüglich der positionsabhängigen Klangfarbenveränderungen treffen:

Für den Bassbereich sind vor allem die Formen der Eigenmoden des Resonanzbodens ausschlaggebend für die positionsbedingten Klangfarbenveränderungen. Es kommt daher eher zu weniger, aber dafür großflächigeren Bereichen mit hoher Intensität. Die mittleren Frequenzen stechen besonders mit einer deutlich ausgeprägteren Positionsabhängigkeit innerhalb der Bark-Bänder heraus, was zu großen Teilen sowohl auf die komplexeren Schwingungen des Resonanzbodens als auch auf die dadurch entstehenden phasenbedingten Interferenzen zurückzuführen ist. Die Verläufe zweier frequenznaher Bänder können dabei sehr konträre Bewegungen aufweisen, was die Existenz einer *Umkehrfrequenz* in deren Zwischenraum annehmbar macht. Für eine allgemeine Betrachtung des Mittenbereichs resultieren diese konträren Bewegungen, verbunden mit großen positionsabhängigen Pegelveränderungen, aufgrund einer gegenseitigen Auslöschung von positiven und negativen Extremwerten in einer homogenen Intensität im Mikrofonarray. Mit steigender Frequenz entwickelt sich der konträre Charakter der Bewegungen zu einer uniformen Bewegung zwischen den Bark-Bändern, was für die allgemeine Betrachtung der höheren Frequenzbereiche in einer deutlich konzentrierten Ausbildung von Bereichen mit hoher Intensität resultiert.

8 Praktische Anwendung

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde dargestellt, wie die Klangfarbe im Instrument entsteht und wie sie vor allem in Bezug auf die Hammer-Saiten-Interaktion durch die Spielweise des/der Pianist*in beeinflusst werden kann. Die dort erläuterten Mechanismen und Begebenheiten liegen zu großen Teilen außerhalb des Einflussbereiches der Tonschaffenden, sollten jedoch bei der Beurteilung der Klangfarbe beachtet werden. Durch das Wissen über diese Mechanismen kann bei der Analyse der gewählten Mikrofonposition zwischen einer positionsabhängigen Klangfarbenveränderung und einer nicht beeinflussbaren klangfärbenden Eigenschaft des Instruments oder der Spielweise unterschieden werden.

Für den Aspekt der positionsabhängigen Veränderungen können vor allem die in der Zusammenfassung aufgeführten *Heatmaps* als praktische Orientierungshilfe benutzt werden. Die übersichtliche Darstellung der Abbildung kann dabei direkt

am Aufnahmeort zur Auswahl oder Veränderung der Mikrofonposition zur Hilfe hinzugezogen werden. Dieser einfache Zugang zu Informationen über die komplexen Mechanismen hinter der Klangfarbenbildung eines Flügels ermöglicht es daher auch jungen Tonschaffenden ohne viel Erfahrung fundierte und an der gewünschten Klangfarbe orientierte Entscheidungen zu treffen. Kommt es im Zuge eines Soundchecks zu problematischen Frequenzen in der Aufnahme, helfen die detaillierten Darstellungen der Bark-Bänder dabei, den Grund einzelner Resonanzen zu verstehen und dementsprechende Veränderungen an der Mikrofonposition vorzunehmen.

9 Ausblick

Unter den oben genannten Aspekten stellt die Untersuchung des Einflusses der Mikrofonposition auf die Abbildung der Teiltöne einen interessanten nächsten Schritt dar. Jedoch würde diese Untersuchung den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es ließen sich zwar mit Hilfe der hier untersuchten spektralen Schwerpunkte eine Aussage über die Stärke hoher und tiefer Teiltöne tätigen, dies wäre aber in Anbetracht der Signifikanz der Teiltöne für die Bildung der Klangfarbe nicht ausreichend genug, um aussagekräftige Ergebnisse über deren Entwicklung zu liefern.

Eine weitere Entwicklung, welche mit der Verfügbarkeit neuer Techniken einhergeht, ist die interaktive Darstellung der in dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse. Mit ihnen könnten in Echtzeit die Veränderungen bei unterschiedlichen Mikrofonposition dargestellt und analysiert werden. Dies würde einerseits für die Ausbildung zukünftige Toningenieur*innen eine neue Möglichkeit zum Studieren der Flügelakustik darstellen, ohne dass die Verfügbarkeit eines Flügels gegeben sein muss, andererseits jedoch auch den etablierten professionellen Toningenieur*innen eine Möglichkeit geben, die für die Aufnahme neuer Formen der Musik notwendigen Anpassungen der Aufnahmeverfahren zu entwickeln.

10 Literaturverzeichnis

Abdullah, Hadi; Rahman, Muhammad Sajidur; Peeters, Christian; Gibson, Cassidy; Garcia, Washington; Bindschaedler, Vincent et al. (2021): Beyond \$L_p\$ clipping: Equalization-based Psychoacoustic Attacks against ASRs: arXiv. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/355664561_Beyond_L_p_clipping_Equalization-based_Psychoacoustic_Attacks_against_ASRs.

Bork, I. (1996): Sound Radiation from a Grand Piano. In: *Journal of the Audio Engineering Society* (100), Artikel 4158. Online verfügbar unter <https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=7613>.

Dickreiter, Michael (2014): 2 Schallquellen. In: Michael Dickreiter, Volker Dittel, Wolfgang Hoeg und Martin Wöhr (Hg.): *Handbuch der Tonstudioteknik*. 8., völlig überarbeitete und erweiterte Aufl. Berlin: DE GRUYTER, S. 66–114.

Fastl, Hugo; Zwicker, Eberhard (2007): *Psychoacoustics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Fletcher, Neville H.; Rossing, Thomas D. (1991): *The Physics of Musical Instruments*. New York, NY: Springer New York.

Giordano, Nicholas (2010): Some Remarks on the Acoustics of the Piano. In: Thomas D. Rossing (Hg.): *The Science of String Instruments*. New York, NY: Springer New York, S. 353–370.

Giordano, Nicholas J. (2016): *Physics of the piano*. First published in paperback. Oxford: Oxford Univ Press.

Haih, Caroline; Dunkerley, John; Rogers, Mark (2020): *Classical Recording. A Practical Guide in the Decca Tradition*. Abingdon, Oxon, New York, NY : Routledge, 2021. | Series: Audio Engineering Society presents...: Focal Press.

J. Burred (2009): *The Acoustics of the Piano* Juan José Burred. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Acoustics-of-the-Piano-Juan-Jos%C3%A9-Burred-Burred/ba4407fd779bb3541b56ff56a056aed5fada163e>.

Jeff Smoot, VP für Apps Engineering; Motion Control bei Same Sky (2021): Ein Blick auf den Audiofrequenzbereich und Audiokomponenten. In: *Nordamerikanische Fachredakteure von DigiKey*, 21.07.2021. Online verfügbar unter <https://www.digikey.de/de/articles/a-look-at-audio-frequency-range-and-audio-components?srsId=AfmBOorxI6MvaGBt8vRYrR2VYzhDkvSEAUtOPc5c23PXkMFPg79qqQOh>, zuletzt geprüft am 17.02.2025.

Koelsch S., Schröger E. (2007): *Neurowissenschaftliche Grundlagen der Musikverarbeitung*. Online verfügbar unter https://stefan-koelsch.de/papers/koelsch-schroeger-musikpsychologie_20070221.pdf.

Lehtonen, Heidi-Maria; Penttinen, Henri; Rauhala, Jukka; Välimäki, Vesa (2007): Analysis and modeling of piano sustain-pedal effects. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 122 (3), S. 1787. DOI: 10.1121/1.2756172.

Meyer, Jürgen (2015): Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer, und Architekten. 6., erweiterte Auflage. Bergkirchen: PPVMedien GbmH Edition Bochinsky (Edition Bochinsky, Band 24).

MK 2H | Microphone capsule | SCHOEPS Microphones (2025). Online verfügbar unter <https://schoeps.de/en/products/colette/capsules/omnis/mk-2h.html>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2025, zuletzt geprüft am 17.02.2025.

Morat, Daniel; Ziemer, Hansjakob (Hg.) (2018): Handbuch Sound. Geschichte - Begriffe - Ansätze. Unter Mitarbeit von Rainer Rutz. J.-B.-Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl-Ernst-Poeschel-Verlag. Stuttgart: J.B. Metzler Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5451272>.

Nagae, Kazuya; Weigelt, Thomas; Kamekawa, Toru; Marui, Atsushi (2022a): Research on microphone arrangement in the grand piano recording : In search of a musical suitable timbre Microfone Setup D274. Online verfügbar unter <http://soundmedia.jp/nuaudktua/Images/MicSetupD274.pdf>.

Nagae, Kazuya; Weigelt, Thomas; Kamekawa, Toru; Marui, Atsushi (2022b): Research on microphone arrangement in the grand piano recording D274 Skrijabin. Online verfügbar unter <http://soundmedia.jp/nuaudktua/D274-5Skrijabin/index.html>, zuletzt aktualisiert am 10.07.2022, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Nagae, Kazuya; Weigelt, Thomas; Kamekawa, Toru; Marui, Atsushi (2023): Microphone arrangement in the piano recording. Online verfügbar unter <http://soundmedia.jp/nuaudktua/>, zuletzt aktualisiert am 26.01.2024, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Nishiguchi, Isoharu (2004): Recent research on the acoustics of pianos. In: *Acoust. Sci. & Tech.* 25 (6), S. 413–418. DOI: 10.1250/ast.25.413.

R. Wagner (2005): Begriffe zur Klangbeschreibung. Audio consequent GbR. Online verfügbar unter http://www.audio-consequent.de/info/inf_klbegriffe.htm.

Reuter C. (2004): Von der „Physik der Klangfarben“ zur „Psychologie der Klangfarben“. Online verfügbar unter https://scholar.archive.org/work/5brpmjk5vvhzzcgll06wievc2q/access/wayback/https://www.psycharchives.org/bitstream/20.500.12034/2607/1/17_2004_6_reuter.pdf.

Richardson, Bernard (2011): The acoustics of the piano. In: David Rowland (Hg.): *The Cambridge Companion to the Piano*: Cambridge University Press, S. 96–114.

Siedenburg K. (2020): Die Farbe macht die Musik. Akustische und perzeptuelle Grundlagen der Klangfarbenwahrnehmung. In: *Akustik Journal* (03/20), S. 29–41. Online verfügbar unter https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal/20-03/akustik_journal_2020_03_online_artikel2.pdf.

Suzuki, Hideo (1986): Vibration and sound radiation of a piano soundboard. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 80 (6), S. 1573–1582. DOI: 10.1121/1.394321.

Vogt, Patrik; Hirth, Michael; Kasper, Lutz; Klein, Pascal; Küchemann, Stefan; Kuhn, Jochen: Akustik. In: , S. 103–164.

Weinreich, Gabriel (1977): Coupled piano strings. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 62 (6), S. 1474–1484. DOI: 10.1121/1.381677.

Werner A. Deutsch (2003): Klangfarbe. Hg. v. Barbara Boisits. Oesterreichisches Musiklexikon online. Online verfügbar unter https://www.musiklexikon.ac.at/ml/musik_K/Klangfarbe.xml, zuletzt aktualisiert am 25.04.2003.

Zwicker, E. (1961): Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen). In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 33 (2), S. 248. DOI: 10.1121/1.1908630.