



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Kombinationstöne und musikalische Wahrnehmung“

Verfasser

Philipp Wiedl, BA

angestrebter akademischer Grad

Master of Arts (MA)

Wien, 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 836

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Masterstudium Musikwissenschaft

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter, M.A.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Nichtlineare Verzerrungen allgemein & Begriffserklärungen	9
3. Voraussetzungen für die Hörbarkeit von Verzerrungsprodukten	14
3.1 Klirrschwelle	14
3.2 Verdeckung	15
3.3 Schwebungen und ebenmerkliche Pegeländerung	18
4. Subjektive nichtlineare Verzerrungen	22
4.1 Ohrpartialtöne	25
4.2 Summationstöne	28
4.3 Quadratischer Differenzton	29
4.4 Kubischer Differenzton	33
5. Subjektive nichtlineare Verzerrungen in Konsonanztheorien	37
5.1 Konsonanztheorie nach Hermann von Helmholtz	37
5.2 Konsonanztheorie nach Paul Hindemith	43
5.3 Konsonanztheorie nach Heinrich Husmann	52
5.3.1 Kombinationstöne und Konsonanz	53
5.3.2 Konsonanzempfinden im binauralen Hören	58
5.3.3 Neurophysiologische Erklärungsversuche	64
6. Kritik an den Konsonanztheorien und alternative Erklärungen	68
7. Versuche zum Konsonanzempfinden	79
7.1 Fragestellung	79
7.2 Messungen, Versuchsdesign & Durchführung	81
7.3 Statistische Auswertung der erhobenen Daten	86
7.4 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen	88
8. Conclusio	100
9. Literaturverzeichnis	103
10. Anhang	107
10.1 Zusammenfassung	107
10.2 Abstract	108
10.3 Lebenslauf	109

1. Einleitung

Das Wesen der Konsonanz ist seit jeher ein Thema, das die musikwissenschaftliche Forschung beschäftigt und bis heute intensiv diskutiert wird. Bereits seit Pythagoras ist bekannt, dass die Konsonanz in einer merkwürdigen Verbindung mit bestimmten einfachen Zahlenverhältnissen steht. Pythagoras bezieht sich damit noch auf Saitenlängen, die in bestimmten Längenverhältnissen zueinander konsonante Klänge ergeben. Diese wurden aber durch spätere Erkenntnisse auf das Verhältnis von Schwingungen zueinander übertragen (Helmholtz 1870, S. 2). An den Schwingungsverhältnissen für die konsonanten Intervalle ändert sich seit Pythagoras im Grunde genommen nichts. Zu den bereits Bekannten kommen lediglich weitere hinzu, um alle konsonanten und dissonanten Intervalle mit Zahlenverhältnissen zu beschreiben.

Was jedoch lange fehlt, ist eine Erklärung für den Zusammenhang zwischen den einfachen Zahlenverhältnissen und den konsonanten Intervallen. Die verschiedensten Forscher versuchen sich schließlich aus unterschiedlichen Richtungen diesem Thema zu nähern, wodurch eine Vielzahl an Konsonanztheorien entsteht: Carl Stumpf erklärt die Konsonanz durch die Verschmelzung zweier zeitgleich erklingender Töne zu einem einzeltonähnlichen Klangeindruck (Stumpf 1911, S. 118). Die Frequenzgruppenbreite und die damit verbundene Rauigkeit von Zusammenklängen nimmt hingegen die zentrale Rolle in der Theorie der sensorischen Konsonanz ein (Plomp/Levelt 1965, S. 555). Ein weiterer sehr wichtiger Faktor für die Konsonanz, der in beinahe jeder Konsonanztheorie vorkommt, ist das Teiltonspektrum. Obertöne sind wesentlich mit dafür verantwortlich wie Intervalle intoniert werden (Terhardt/Zick 1975, S. 273). Auch Untersuchungen zur Konsonanz bei Tönen mit gestauchten und gespreizten Teiltonreihen heben die Rolle des Teiltonspektrums hervor (Sethares 1993, S. 1222-1223). Die Grundlage der Autokorrelationstheorie hingegen ist die zeitliche Verarbeitung von periodischen Signalen im Hörsystem, sowie deren neuronale Repräsentation (Langner 2007, S. 18), die von vielen Forschern mit unterschiedlichen Schwerpunkten behandelt wird.

Unter anderem tauchen auch Kombinations- und Ohrpartialtöne immer wieder in diesen Theorien auf und werden manchmal sogar zur alleinigen Ursache für die Abhebung der Konsonanzen von den Dissonanzen erklärt. Bei den Kombinationstönen handelt es sich um

Verzerrungsprodukte, die durch Nichtlinearitäten in einem akustischen Übertragungssystem entstehen können. Auch das menschliche Ohr arbeitet nichtlinear und kann somit Kombinations- und Ohrpartialtöne hervorbringen. Dass diese zusätzlichen Töne durch das Gehör selbst produziert werden und auch am Klangeindruck obertonloser Zusammenklänge beteiligt sind, verleiht ihnen eine gewisse Unumstößlichkeit und Festigkeit, worin natürlich viele Forscher ein enormes Potenzial für eine schlüssige Erklärung der Konsonanzen gesehen haben.

Was jedoch nicht vergessen werden darf sind die spezifischen Eigenschaften dieser Verzerrungsprodukte. Obwohl Kombinations- und Ohrpartialtöne für die Konsonanztheorien, die auf nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs beruhen, das zentrale Puzzlestück zum Verständnis der Konsonanz sind, werden sie nur in einem sehr unzureichendem Ausmaß von Seiten der Psychoakustik her betrachtet und deren Entstehungsvoraussetzungen bzw. Intensität und Hörbarkeit unter den unterschiedlichen Bedingungen behandelt. Das soll in dieser Arbeit nachgeholt werden, um die Beständigkeit dieser Konsonanzgrundlage und somit die Relevanz der nichtlinearen Verzerrungsprodukte für die Intervalleinschätzung zu prüfen. Zu diesem Zweck ist es notwendig sich vorab mit grundlegenden Faktoren, die die Entstehung und Hörbarkeit von Kombinationstönen und hinzutretenden Obertönen beeinflussen, zu beschäftigen, wie etwa der Klirrschwelle, der Verdeckung, der ebenmerkliche Pegeländerung und den Schwebungen. Zudem spielt vor allem die Lage der durch das Ohr produzierten Töne im Verhältnis zu den tatsächlich als Luftschwingung vorhandenen Tönen, sowie der Pegel der einzelnen Verzerrungsprodukte eine wichtige Rolle für den Gesamtklangeindruck. Natürlich müssen hierbei Ohrpartialtöne, Summationstöne und die stärksten Differenztöne, also der quadratische und der kubische Differenzton, individuell im Detail abgehandelt werden, um deren spezifische Eigenschaften im Hinblick auf die Konsonanztheorien, in denen diese eine Rolle spielen, zu untersuchen. Für die Intensität der nichtlinearen Verzerrungsprodukte sind in erster Linie die Schalldruckpegel und die Frequenzen bzw. Frequenzabstände der Primärtöne, also der objektiv vorhandenen Töne, verantwortlich. Ob Kombinations- und Ohrpartialtöne also überhaupt entstehen und ob diese wahrnehmbar sind, ist durchaus situationsabhängig und kann von Intervall zu Intervall verschieden sein. Die Stabilität dieses Faktors für die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen ist also ein wichtiges Thema und muss durchaus kritisch hinterfragt werden.

Erst mit dem Hintergrundwissen um die Eigenschaften von diesen vom Ohr hervorgebrachten nichtlinearen Verzerrungsprodukten lässt sich schlussendlich prüfen, was die Konsonanztheorien, die darauf beruhen, zu leisten vermögen. Drei Konsonanztheorien in denen Kombinationstöne und Ohrpartialtöne eine zentrale Rolle einnehmen, sind jene von Hermann von Helmholtz, Paul Hindemith und Heinrich Husmann. Obwohl jeder dieser Musiktheoretiker die nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs in seine Theorie miteinbezieht, nähern sich alle drei dem Wesen der Konsonanz aus unterschiedlichen Richtungen an. Dabei ist es interessant, wie verschieden die Verzerrungsprodukte eingesetzt werden können, um eine Erklärung für die Ausnahmestellung der Konsonanzen aufzuzeigen. Eine kritisch vergleichende Herangehensweise soll schließlich die Unterschiede aufzeigen und Kritikpunkte, die auch von diesen Theoretikern selbst über die jeweils anderen Theorien geäußert werden, ansprechen.

Die Frage, die aber bei all diesen Theorien offen bleibt, ist: Was passiert wenn keine nichtlinearen Verzerrungsprodukte am Zusammenklang beteiligt sind? Husmann stellt sich eine ähnliche Frage und prüft in einem Versuch das Konsonanzempfinden von Probanden, wenn Schwebungen und Kombinationstöne ausgeschaltet sind. Der Umstand, dass die Bildung von Kombinationstönen verhindert werden kann, wie das in der musikalischen Praxis häufig der Fall ist, stellt natürlich einen wichtigen Kritikpunkt an den darauf beruhenden Theorien dar. Aber auch die Begründung der Konsonanz durch die Ohrpartialtöne, wie das in der Theorie Husmanns zu finden ist, muss kritisch gesehen werden. Schließlich lassen sich auch diese Verzerrungsprodukte ausschalten, wenn bestimmte Voraussetzungen für deren Bildung nicht gegeben sind. Für diese Hörsituation ohne jegliche Verzerrungsprodukte muss schlussendlich geprüft werden, ob sich die Konsonanzen weiterhin von den dissonanten Intervallen abheben und ob nicht andere Theorien besser bestehen können als jene von Helmholtz, Hindemith und Husmann.

Die Fragen, inwiefern oder ob die Kombinations- und Ohrpartialtöne überhaupt das Konsonanzempfinden bei Zusammenklängen beeinflussen können, soll schließlich mittels dementsprechend angelegter Versuche in dieser Arbeit beantwortet werden. Dazu werden die erhobenen Daten jedes Intervalls einzeln betrachtet, da durch die unterschiedlichen Frequenzabstände auch unterschiedliche Faktoren, die die Einschätzungen der Intervalle beeinflussen können, eine Rolle spielen. Auch sollen die Versuchsergebnisse hinsichtlich neuerer Erkenntnisse der Psychoakustik und anderer Konsonanztheorien, die ohne Verzerrungsprodukte auskommen, gedeutet werden.

Es ist also Ziel dieser Arbeit die unterschiedlichen Verzerrungsprodukte, die durch Nichtlinearitäten im Reiztransportweg des Gehörs entstehen können, im Detail vorzustellen und aufzuzeigen, welche Voraussetzungen gegeben sein müssen damit diese die musikalische Wahrnehmung beeinflussen können. Mittels der Konsonanztheorien von Helmholtz, Hindemith und Husmann werden unterschiedliche Herangehensweisen an die Erklärung des besonderen Wesens der Konsonanz mit Hilfe nichtlinearer Verzerrungsprodukte aufgezeigt. Dabei wird versucht die musikalische Praxis nicht außer Acht zu lassen und die zwar theoretisch in sich stimmigen aber häufig praxisfernen Konstrukte dieser Forscher kritisch hinsichtlich des derzeitigen Forschungsstandes zu prüfen. In diesen Untersuchungen ist es nicht Ziel, den nichtlinearen Verzerrungsprodukten jegliche Bedeutung für die musikalischen Wahrnehmung abzusprechen, aber deren Relevanz für den Gesamteindruck eines Zusammenklanges differenziert und unter genauer Überprüfung der jeweils gegebenen Umstände zu sehen. Dass dies in der Geschichte der Konsonanztheorien häufig nicht passiert ist, hat zum Teil zu Fehleinschätzungen bzw. zur Überschätzung des Einflusses der Kombinations- und Ohrpartialtöne geführt, was in dieser Arbeit vermieden werden soll. Es werden auch unterschiedliche Alternativen zu den Theorien auf der Basis von nichtlinearen Verzerrungen behandelt, um verschiedene Definitionen von Konsonanz und Dissonanz sowie unterschiedliche Erklärungen für die Ausnahmestellung bestimmter Schwingungsverhältnisse aufzuzeigen.

2. Nichtlineare Verzerrungen allgemein & Begriffserklärungen

Vorab ist es interessant sich vor Augen zu führen, was man überhaupt unter nichtlinearen Verzerrungen im Allgemeinen versteht, um später nachvollziehen zu können, inwiefern diese auch in unserem Hörsystem auftreten und an unserer Wahrnehmung beteiligt sind. Dazu ein Beispiel zur Veranschaulichung: „[...] consider what happens when you hold a flexible ruler at one end and shake it. The motion of the free end of the ruler (the output) will include several frequencies above and beyond the rate at which you are shaking it (the input) [...].“ (Gelfand 2009, S. 97). In diesem Beispiel wird beschrieben was passiert, wenn man ein flexibles Lineal an einem Ende hält und es dann schüttelt. In diesem Fall weicht die Bewegung vom losen Ende von jener am gehaltenen Ende ab. Am losen Ende entstehen durch die Flexibilität des Lineals zusätzliche Bewegungen bzw. Vibrationen, welche als nichtlineare Verzerrungsprodukte verstanden werden können. Würde die Bewegung bzw. Schwingung am losen Ende, jener am gehaltenen Ende entsprechen, wie das bei einem starren Lineal der Fall wäre, so würde man von einem linearen Übertragungssystem sprechen. Unter nichtlinearen Verzerrungsprodukten versteht man ganz allgemein ein Signal, welches am Eingang eines Systems nicht vorhanden ist, jedoch durch Nichtlinearitäten im System selbst hinzukommt und schließlich am Ausgang vorzufinden ist (Gelfand 2009, S. 97). In der Akustik bedeutet das konkret, dass die Wellenform eines Signals bzw. einer Schwingung durch ein nichtlineares System verändert bzw. verformt wird und dadurch Verzerrungsprodukte zum Originalsignal hinzutreten (Fricke 1960, S. 9, Fußnote 1).

Die Töne des nicht verformten Originalsignals werden als *Primärtöne* bezeichnet und in der Regel mit *PT.* abgekürzt (dies und folgendes nach Fricke 1960, S. 7). Zu diesen können durch nichtlineare Verzerrungen zusätzliche Obertöne, für deren Bildung ein einzelner Sinuston bereits ausreicht und deren Frequenzen den ganzzahligen Vielfachen der Primärtonfrequenzen entsprechen, oder eben auch *Kombinationstöne* (*KT.*) hinzutreten. Zur Bildung von Kombinationstönen müssen jedoch mindestens zwei Klangkomponenten im Originalsignal vorhanden sein. Diese Primärtöne können nun die Obertöne eines Klanges, die Grundtöne eines Zusammenklanges oder in der einfachsten Variante zwei obertonlose Sinustöne darstellen. Wie der Name schon sagt, entstehen Kombinationstöne

aus dem Zusammenwirken von zwei Primärtönen, wobei *Differenztöne* und *Summationstöne* unter diesen Sammelbegriff fallen.

Die Frequenzen der Kombinationstöne erhält man durch ein einfaches Gesetz (folgendes nach Stumpf 1910, S. 38-39): Die Formel mit der sich alle Kombinationstöne berechnen lassen lautet $\pm \alpha h \pm \beta t$. Die Frequenz des höheren Primärtons wird in dieser Formel, wie meistens in der deutschsprachigen Literatur, mit h bezeichnet, jene des tieferen mit t . Unter α und β versteht man die ganzen Zahlen mit denen die Primärtonfrequenzen multipliziert werden können. Die Summationstöne (*ST.* abgekürzt) ergeben sich aus α mal der höheren Frequenz addiert mit β mal der tieferen Frequenz; die Differenztöne (*DT.* abgekürzt) aus α mal der höheren Frequenz abzüglich β mal der tieferen. Rein rechnerisch kann man alle Kombinationstöne von der einfachen Addition oder Subtraktion der Teiltöne (der Grundton wird als der erste Teilton gesehen) eines Zusammenklanges herleiten. Das entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Entstehung von Kombinationstönen und dient nur zur Veranschaulichung, was bei Zusammenklängen von zwei Sinustönen, die keine Obertöne mit sich führen, klar wird.

Für das weitere Verständnis und um den Überblick über die unterschiedlichen Bezeichnungen der Kombinationstöne zu wahren, sollen noch weitere, für diese Arbeit relevante, Darstellungen beschrieben werden: Die Primärtonfrequenzen werden, neben den Bezeichnungen mit t und h , auch häufig mit f_1 für die tiefere Frequenz und f_2 für die höhere bezeichnet (Zwicker 1982, S. 89). Neben der einfachen Angabe der verwendeten Formel für einen Kombinationston, wie etwa $t+h$ oder f_1+f_2 bzw. $h-t$ oder f_2-f_1 für die einfachsten Kombinationstöne, werden gerne auch Abkürzungen verwendet: S_{11} für den einfachsten Summationston und D_{11} für den einfachsten Differenzton. Die Summationstöne werden also mit einem S , die Differenztöne mit einem D abgekürzt. Darauf folgen zwei Indizes, die angeben welche Vielfache der Primärtöne zur Bildung benutzt werden, wobei sich die erste Zahl stets auf den tieferen bezieht. Ein negatives Ergebnis bei einer Rechnung wird in ein positives umgewandelt (Husmann 1953, S. 12).

Bezeichnung	Differenztöne		Abkürzungen	Summationstöne		Abkürzungen
Primärtöne			f_1, f_2 oder t, h			f_1, f_2 oder t, h
Kombinationstöne 1. Ordnung	$ f_1 - f_2 $	$h - t$	D_{11}	$f_1 + f_2$	$t + h$	S_{11}
Kombinationstöne 2. Ordnung	$ 2f_1 - f_2 $	$ 2t - h $	D_{21}	$2f_1 + f_2$	$2t + h$	S_{21}
	$ f_1 - 2f_2 $	$2h - t$	D_{12}	$f_1 + 2f_2$	$t + 2h$	S_{12}
Kombinationstöne 3. Ordnung	$ 3f_1 - f_2 $	$ 3t - h $	D_{31}	$3f_1 + f_2$	$3t + h$	S_{31}
	$ f_1 - 3f_2 $	$3h - t$	D_{13}	$f_1 + 3f_2$	$t + 3h$	S_{13}
	$ 2f_1 - 2f_2 $	$2h - 2t$	D_{22}	$2f_1 + 2f_2$	$2t + 2h$	S_{22}

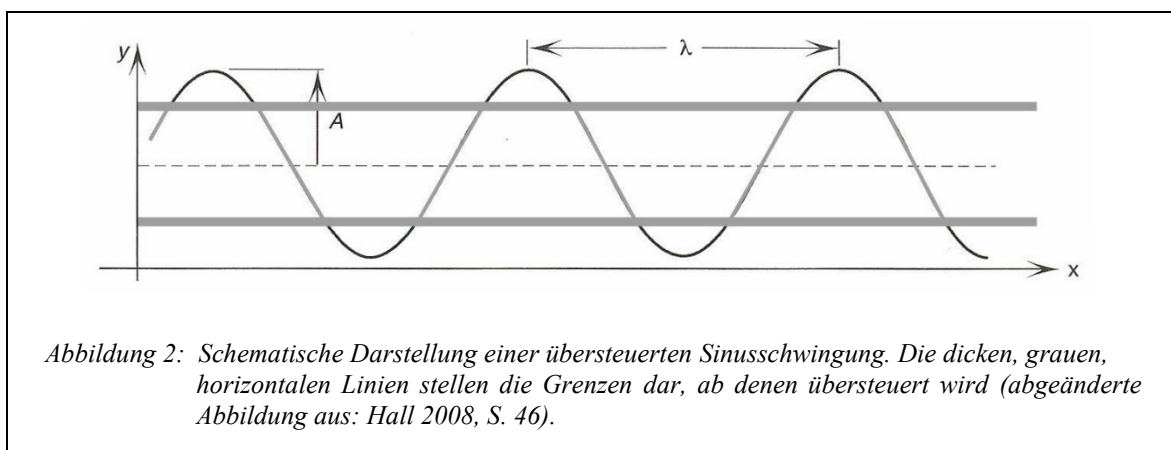
Abbildung 1: Abkürzungen und Bezeichnungen für Primärtöne und Kombinationstöne bis zur dritten Ordnung sowie unterschiedliche Möglichkeiten der Berechnung.

Vor allem in älterer Literatur, wie etwa bei Hermann von Helmholtz (1870) und Paul Hindemith (1940), werden der D_{11} und S_{11} als *Kombinationstöne erster Ordnung* bezeichnet, da man diese durch das Subtrahieren oder Addieren der Primärtöne erhält, ohne deren Vielfache zu verwenden. Da man die Kombinationstonfrequenzen der darauffolgenden Ordnung berechnen kann, indem man aus dem Kombinationston erster Ordnung gemeinsam mit einem der Primärtöne wiederum einen D_{11} oder S_{11} bildet, werden diese *Kombinationstöne zweiter Ordnung* genannt (Helmholtz 1870, S. 243). Dies beschreibt auch Carl Stumpf: „Als ersten D.T. oder D1 bezeichnen wir, wie allgemein üblich, den Ton $h - t$. Als zweiten D.T. oder D2 den Ton $2t - h$, der auch erhalten wird, indem man den D1 von t subtrahiert ($t - [h - t]$).“ (Stumpf 1910, S. 39).

Hat man zum Beispiel die Primärtöne $f_1 = 300$ Hz und $f_2 = 500$ Hz, so liegt der D_{11} bei 200 Hz. Bildet man aus diesem D_{11} gemeinsam mit dem tieferen Primärton wiederum den D_{11} (300 Hz - 200 Hz = 100 Hz), so erhält man die Frequenz des D_{21} (2×300 Hz - 500 Hz = 100 Hz). Aus diesen Kombinationstönen zweiter Ordnung lassen sich gemeinsam mit den Primärtonfrequenzen oder untereinander wiederum die *Kombinationstöne dritter Ordnung* berechnen usw. Da der D_{21} ebenso wie der D_{11} eine direkte Folge der Primärtöne ist und sich nicht aus interagierenden Obertönen oder Kombinationstönen herleiten lässt, ist die Bezeichnung als Differenzton zweiter Ordnung im Grunde genommen unberechtigt (Stumpf 1910, S. 44). Trotzdem haben sich diese Begrifflichkeiten etabliert und werden auch in der eben geschilderten Art und Weise in dieser Arbeit verwendet.

Husmann führt eine Bezeichnung ein, die von der eben erwähnten abweicht, indem er die Ordnung aus der Addition der beiden Indizes berechnet. Demnach wird der D_{11} bereits als der Differenzton zweiter Ordnung, der D_{21} als jener dritter Ordnung usw., bezeichnet (Husmann 1953, S.12). In der Fachliteratur sind beide Bezeichnungen zu finden, um jedoch Unklarheiten zu vermeiden, wird in der weiteren Arbeit ausschließlich die ältere Bezeichnung, nach welcher der D_{11} der Differenzton erster Ordnung ist, verwendet.

Je nachdem auf welches nichtlineare System diese Verzerrungsprodukte in der Akustik nun zurückzuführen sind, kann man die Kombinationstöne und hinzutretende Obertöne in *subjektive* und *objektive* unterteilen. Damit man von objektiven Verzerrungsprodukten sprechen kann, muss eine nichtlineare Verzerrung bereits außerhalb des menschlichen Hörsystems auftreten und somit ein Schallsignal dem Gehör bereits verzerrt dargeboten werden. Zur Untersuchung von nichtlinearen Verzerrungen werden auch in der Forschung spezielle Geräte entwickelt, bei denen sich der Grad der Nichtlinearität regeln lässt, um ein verzerrtes Signal mit einem nicht verzerrtem vergleichen zu können und um untersuchen zu können, ab welchem Verzerrungsgrad Kombinationstöne und zusätzliche Obertöne hörbar werden (Fricke 1960, S. 9). In der musikalischen Praxis werden Verzerrungen in der elektronischen Musik verwendet, wie etwa bei elektrisch abgenommenen Gitarren oder Synthesizern, um ein obertonreiches Material zu erhalten. Ein Beispiel für eine solche objektive nichtlineare Verzerrung lässt sich am einfachsten an einer Sinusschwingung aufzeigen, wobei die Verzerrungen durch unterschiedliche technische Mittel erreicht werden kann. Um eine elektrische Sinusschwingung zu verzerrern, wird meist entweder ein übersättigter oder mit Gleichstrom vormagnetisierter Transformator oder eine übersteuerte Elektronenröhre verwendet (Supper 1996, Sp. 1722).



Wird die Amplitude einer Sinusschwingung ab einer bestimmten Grenze abgeschnitten bzw. abgeflacht, so wird die Schwingungsform, je nach Grad der Übersteuerung mehr oder weniger stark verändert. Die Schwingungsform am Eingang des Systems, eine einfache Sinusschwingung, entspricht nicht mehr der Schwingungsform am Ausgang des Systems. Durch diese Nichtlinearitäten nähert sich die Sinusschwingung einer Rechteckschwingung an, wodurch Verzerrungsprodukte entstehen. In diesem konkreten Fall, wenn nur eine Sinusschwingung verwendet wird, können nur Obertöne zum Originalsignal hinzutreten. Bei der Verformung des Schwingungsbildes von zwei simultan erklingenden Tönen können zusätzlich auch noch Kombinationstöne auftreten. Neben musikästhetisch oder wissenschaftlich gewollten objektiven nichtlinearen Verzerrungen können akustische System außerhalb des Hörsystems aber auch ungewollt und auf störende Art und Weise nichtlineare Verzerrungsprodukte hervorbringen. Vor allem bei hochwertigen Musikwiedergabesystemen wird daher besonders darauf geachtet, dass diese möglichst verzerrungsfrei arbeiten.

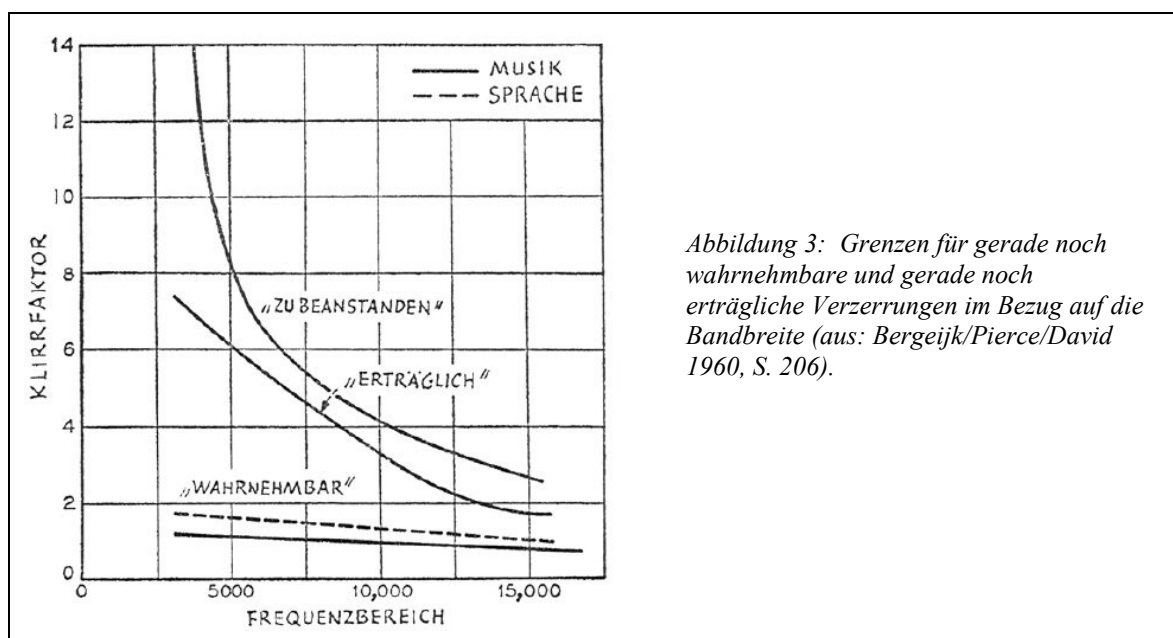
Neben diesen objektiven nichtlinearen Verzerrungen, die außerhalb des Gehörs entstehen, gibt es auch die bereits erwähnten subjektiven. Unter den subjektiven Verzerrungsprodukten versteht man diejenigen, die erst im Gehör selbst entstehen und deshalb auch als Ohrpartial- und Ohrkombinationstöne bezeichnet werden (Fricke 1960, S. 4). Daraus lässt sich schließen, dass auch das Hörsystem des Menschen ein nichtlineares System ist, welches die Schwingungsform der Primärtöne, also jener Klangkomponenten, die tatsächlich als messbare Luftschwingungen vorhanden sind, verformt und dadurch subjektive Verzerrungsprodukte hinzufügt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit wird auf den subjektiven Obertönen und Kombinationstönen liegen, da Helmholtz, Hindemith und Husmann ausschließlich diese als Grundlage für die später vorgestellten Konsonanztheorien dienen. Trotzdem dürfen die objektiven Verzerrungsprodukte nicht vollständig ausgeklammert werden, da diese häufig aufgrund ihrer leichten Messbarkeit zur Veranschaulichung verwendet werden.

3. Voraussetzungen für die Hörbarkeit von Verzerrungsprodukten

3.1 Klirrschwelle

Damit nichtlineare Verzerrungsprodukte, also Kombinationstöne und hinzutretende Obertöne hörbar werden, müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein. Grundsätzlich geht es darum, dass diese Verzerrungsprodukte eine bestimmte Lautstärke erreichen müssen, damit sich der Klangeindruck nach einer nichtlinearen Verzerrung vom Originalklang merklich unterscheidet. Diese Grenze wird im Hifi-Bereich auch Klirrschwelle genannt, wobei die Verzerrungsgröße als Klirrfaktor ausgedrückt wird (siehe Abbildung 3).

Natürlich lassen sich solche Grenzverzerrungen nur im Bezug auf objektive, also tatsächlich vorhandene Luftschwingungen eindeutig bestimmen. In diesem Fall kann man nämlich den Grad der Verzerrung regeln bzw. die Verzerrungen ein- und ausschalten, was einen Vergleich mit dem Ausgangssignal zulässt und damit den ebenmerklichen Klirrfaktor bestimmbar macht.



In Abbildung 3 sind die Grenzen für die Wahrnehmbarkeit und Erträglichkeit von Verzerrungen eingezeichnet, wobei der Klirrfaktor ausdrückt, zu welchem Maß die entstandenen Verzerrungsprodukte Anteil am Gesamtsignal haben. Für Musik liegt der ebenmerkliche Klirrfaktor für Bandbreiten um 5000 Hz bei ca. 1%, wobei sich diese

Grenze hin zu den größeren Bandbreiten leicht nach unten verschiebt. Die Abhängigkeit der Wahrnehmung von Verzerrungen von der Bandbreite zeigt sich vor allem bei jener Grenze, bis zu der die Verzerrungen gerade noch erträglich sind. Liegt die Grenzverzerrung für 5000 Hz Bandbreite noch bei einem Klirrfaktor von 6 %, so fällt dieser Wert auf 2,5 % für einer Bandbreite von 15000 Hz. Je breitbandiger also ein System ist, desto empfindlicher ist dieses für wahrnehmbare nichtlineare Verzerrungen (Bergeijk/Pierce/David 1960, S. 206).

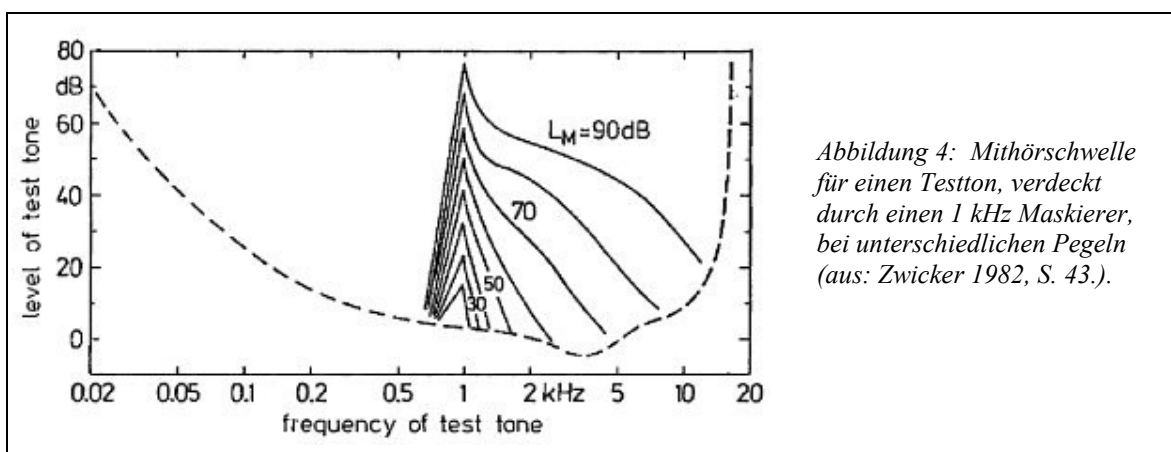
Von den objektiven Verzerrungsprodukten und der daran untersuchten Klirrschwelle lassen sich jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die subjektiven Verzerrungen ziehen. Dies würde zu einem verfälschten Ergebnis führen, da auch die objektiven Kombinationstöne und hinzugekommenen Obertöne wiederum durch das Gehör verzerrt werden, was keine aussagekräftige Bewertung dieser Klänge zulässt: „Die obj. KT. werden nämlich vom Ohr wie jede andere Klangkomponente aufgenommen und in den Verzerrungsvorgang mit einbezogen, so daß dann eine potenzierte Verzerrung das Resultat ist.“ (Fricke 1960, S. 11). Trotzdem lässt sich an der Klirrschwelle, also der Grenze ab der objektive Verzerrungsprodukte den Klang wahrnehmbar verändern, aufzeigen, dass die Kombinationstöne, seien sie nun subjektiv oder objektiv, bestimmte Grenzen erreichen müssen damit diese wahrnehmbar werden. Auch für den Einfluss von subjektiven Kombinationstönen und Obertönen auf die Wahrnehmung spielt vor allem deren Intensität, die mit dem Grad der Verzerrung einhergeht, eine wesentliche Rolle. Kombinationstöne können aber auch „[...] wenn sie in einer Stärke vorhanden sind, in der sie als Einzeltöne hörbar sein würden, unhörbar bleiben.“ (Fricke 1960, S. 10). Die Gründe dafür sind in der Verdeckung sowie der Modulationsschwelle bzw. der Grenze für den ebenmerklichen Pegelunterschied zu suchen.

3.2 Verdeckung

Eine äußerst bedeutende Rolle für die Hörbarkeit von subjektiven und auch objektiven Kombinationstönen spielt die Verdeckung. Im Falle der objektiven Kombinationstöne bedeutet das, dass diese Verzerrungsprodukte unhörbar bleiben können, auch wenn diese physikalisch in der Luftschwingung nachweisbar sind. Etwas schwieriger gestaltet sich die

Untersuchung der subjektiven Kombinations- und Obertöne, da diese nicht so einfach messbar sind, wodurch auch deren Mithörschwelle sehr viel schwerer ermittelbar ist. Grundsätzlich gelten für die Verdeckung von subjektiven und objektiven Verzerrungsprodukten jedoch die gleichen Gesetzmäßigkeiten. Da das Thema dieser Arbeit rein auf die vergleichende Untersuchung von subjektiven Verzerrungsprodukten sowie deren Einfluss auf das musikalische Hören und daraus resultierende Konsonanztheorien abzielt, wird im Weiteren auch nur auf erstere eingegangen.

Die Schwelle ab der ein Sinuston (Testton) neben einem zweiten Ton (Maskierer) gerade noch hörbar ist, nennt man Mithörschwelle. Diese Mithörschwelle für den Testton liegt je nach dessen Lage und der Lautstärke des Maskierers bzw. Störschalls unterschiedlich hoch. In Abbildung 4 sind die steilen Flanken der Mithörschwelle hin zu den Frequenzen zu sehen, die tiefer liegen als der Störton, wohingegen die Flanken hin zu den darüber liegenden Frequenzen immer flacher werden (Zwicker 1982, S. 43).



Was also bei der Verdeckungen von einem Ton durch einen anderen beobachtet werden kann, ist eine asymmetrische Mithörschwelle: „Es gilt, dass hohe leise Töne durch tiefe laute Töne verdeckt werden können, aber tiefe leise Töne nicht durch hohe laute.“ (Hellbrück/Ellermeyer 2004, S. 129). Diese Asymmetrie ist aber keine neuere Erkenntnis der Psychoakustik, sondern schon lange bekannt. Bereits Carl Stumpf bewies durch Versuche, in denen er zwei Stimmgabeln von unterschiedlicher Tonhöhe zeitgleich erklingen lies, dass die höheren Töne stärker sein müssen damit diese tiefere Töne verdecken können als umgekehrt (Stumpf 1965, S. 228). Beobachtet man die Mithörschwelle des Testtons in Abbildung 4, wenn der Maskierer mit einer Frequenz von 1 kHz bei 90 dB liegt ($L_M = 90$ dB), so sieht man, dass die Mithörschwelle bis ca. 700 Hz

gar nicht angehoben wird, also der Ruhehörschwelle entspricht und somit Töne in diesem Frequenzbereich nicht verdeckt werden. Bleibt man bei selber Frequenz und selben Pegel für den Maskierer, so wird die Mithörschwelle für den Testton jedoch enorm angehoben, wenn dieser in der Frequenz höher liegt. Bei gleichem Frequenzabstand zum Maskierer, also bei 1300 Hz, liegt die Mithörschwelle für den Testton bei ca. 70 dB, welche zwar zu den höheren Frequenzen hin stetig abnimmt, aber bis ca. 15 kHz angehoben bleibt. Einzig bei sehr leisen Pegeln des Störtons zeigen sich flachere Flanken der Mithörschwelle hin zu den tieferen Frequenzen. Das heißt zusammenfassend, dass Töne, die in der Frequenz über einem Störton liegen, in der Regel einen höheren Pegel haben müssen als jene, die darunter liegen, um hörbar zu sein.

Betrachtet man dieses Verdeckungsverhalten im Zusammenhang mit den subjektiven Verzerrungsprodukten, so wird klar, dass diese nur unter gewissen Umständen auch tatsächlich hörbar werden. Da die Differenzttöne, oder zumindest die einfachsten Varianten dieser, also der quadratische Differenzton (D_{11}) und der tiefere kubische Differenzton (D_{21}), stets in der Frequenz tiefer liegen als die Primärtöne, sind diese auch bei geringer Intensität bereits gut hörbar. Schwerer haben es die Summationstöne und Ohrpartialtöne, die stets über den Primärtonfrequenzen liegen und deshalb leichter der Verdeckung zum Opfer fallen und häufig unhörbar bleiben.

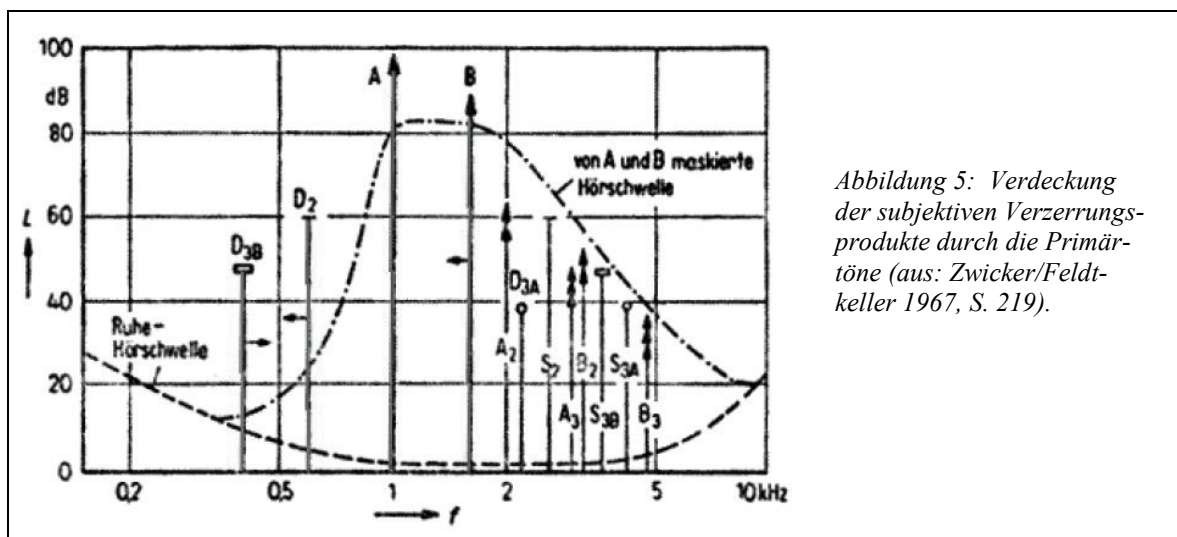


Abbildung 5: Verdeckung der subjektiven Verzerrungsprodukte durch die Primärtöne (aus: Zwicker/Feldtkeller 1967, S. 219).

In Abbildung 5 sind zwei Primärtöne eingezeichnet, welche mit A (1000 Hz) und B (1600 Hz) bezeichnet werden. Weiters sieht man die von A und B maskierte Hörschwelle sowie die Verzerrungsprodukte, die durch die Primärtöne vom Gehör gebildet werden. Die senkrechte Linie bei 600 Hz stellt den Pegel des quadratischen Differenztones dar, jene bei

400 Hz den des tieferen kubischen. Beide Differenztöne liegen deutlich über der von den Primärtönen maskierten Hörschwelle, was diese gut hörbar macht. Dass die Verdeckung zu den höheren Frequenzen hin stärker ausfällt, bekommen die Ohrpartial- und Summationstöne zu spüren. Die Ohrpartialtöne von A bei 2000 Hz (mit A_2 bezeichnet) und 3000 Hz (A_3) liegen deutlich unter der Mithörschwelle, auch weil der höhere Primärton B diese im darüber liegenden Frequenzbereich noch weiter anhebt. Die Ohrpartialtöne des höheren Tones B (B_2 bei 3200 Hz und B_3 bei 4800 Hz) hingegen liegen schon sehr dicht an der Mithörschwelle. Auch die Summationstöne sind in Abbildung 5 noch verdeckt, aber sehr dicht an der Mithörschwelle gelegen. Der Summationston S_{11} , der gleich wie der quadratische Differenzton in diesem Beispiel einen Pegel von 60 dB aufweist und eine Frequenz von 2600 Hz hat, liegt ca. 5 dB unter der Mithörschwelle.

Wie anhand dieses Beispiels verdeutlicht wird, entscheidet schlussendlich auch die Verdeckung darüber, ob ein Produkt nichtlinearer Verzerrungen des Gehörs überhaupt hörbar wird und somit unseren Höreindruck beeinflusst. Gerade für die Wahrnehmung von Summations- und Ohrpartialtönen, aber auch von Differenztönen höherer Ordnung, die über den Primärtonfrequenzen liegen, ist die Verdeckung ein entscheidender Faktor. Diese subjektiven Verzerrungsprodukte müssen eine relativ hohe Intensität aufweisen bzw. eine günstige Lage entlang der flach abfallenden Flanke der Mithörschwelle haben, damit sie noch darüber liegen und hörbar sind.

3.3 Schwebungen und ebenmerkliche Pegeländerung

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Hörbarkeit von Kombinationstönen und hinzutretenden Obertönen, neben der Verdeckung, können Schwebungen, hervorgebracht durch nichtlineare Verzerrungsprodukte, sowie die Modulationsschwelle bzw. die ebenmerkliche Pegeländerung sein. Auch diese Grenzen müssen, im Falle dass Verzerrungsprodukte mit Primärtönen zusammenfallen bzw. diesen sehr nahe kommen, überschritten werden, damit nichtlineare Verzerrungsprodukte, seien sie nun subjektiver oder objektiver Natur, die Wahrnehmung merklich beeinflussen.

Interessant ist vor allem, dass auch subjektive Kombinationstöne und Obertöne, die ja erst im Ohr selbst entstehen, als Stimulus agieren können, also gemeinsam mit anderen

Verzerrungsprodukten oder mit Primärtönen wiederum Kombinationstöne oder eben auch Rauigkeit bzw. Schwebungen hervorbringen können (Gelfand 1990, S. 409).

Da die Konsonanztheorie von Helmholtz und auch viele andere Theorien auf Schwebungen und Rauigkeit beruhen und diese somit für das weitere Verständnis sehr wichtig sind, soll dieses Phänomen nun genauer beschrieben werden (folgendes nach Roederer 1973, S. 27-28): Weisen zwei Frequenzen einen Abstand von kleiner als 20 Hz zueinander auf, so hört man nicht mehr zwei Töne sondern nur einen Ton, der dem Mittelwert der beiden Primärtonfrequenzen entspricht. Sind sich die beiden Töne sehr nahe (ca. 10 bis 15 Hz Frequenzabstand), so hört man einen schwebenden Ton, dessen Amplitude sich in der Frequenz, die der Differenz der beiden Primärtonfrequenzen entspricht, regelmäßig ändert. Entfernen sich die Frequenzen weiter voneinander, so kann man den Schwebungen nicht mehr folgen und man nimmt einen rau klingenden Ton wahr. Kurz bevor die Grenzen der Frequenzgruppenbreite erreicht werden, werden wieder zwei getrennte Töne gehört, die sich aber immer noch gegenseitig beeinflussen und einen rauen Klangeindruck erzeugen. Erst wenn die beiden Töne nicht mehr in einer gemeinsamen Frequenzgruppenbreite liegen, werden zwei getrennte Töne gehört, die sich gegenseitig nicht stören. Diese Grenzen für die Wahrnehmung von Schwebungen, Rauigkeit oder zwei getrennten Tönen werden in Abbildung 6 veranschaulicht.

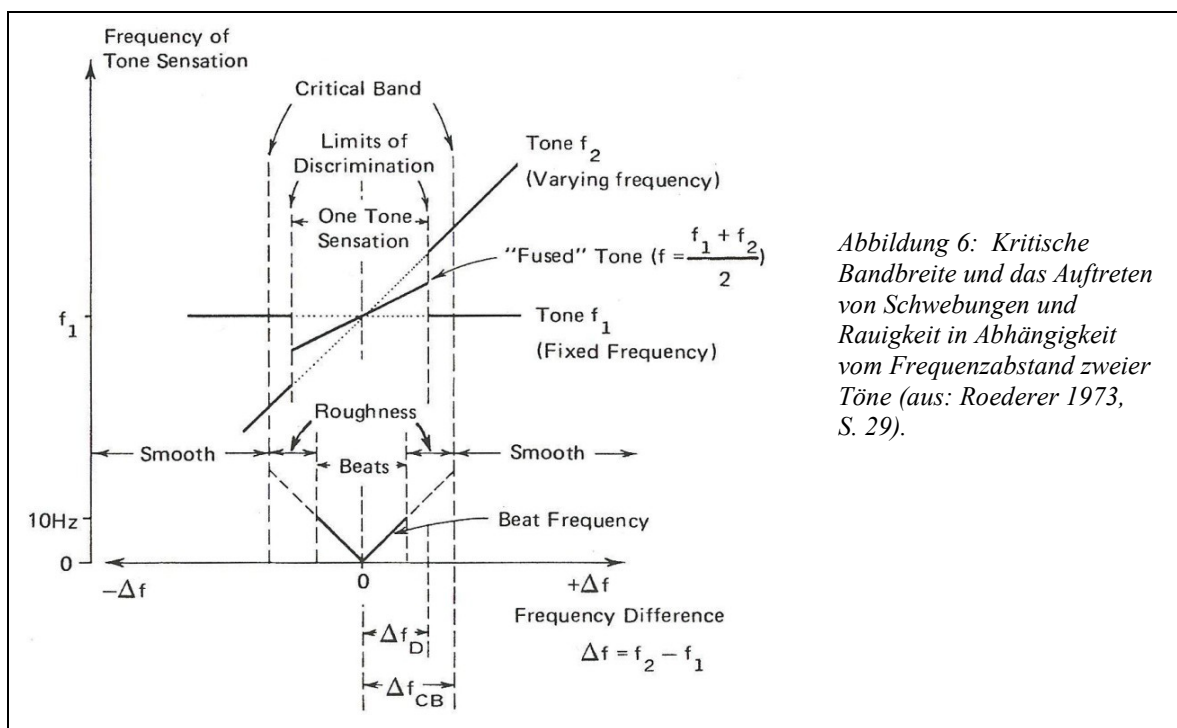


Abbildung 6: Kritische Bandbreite und das Auftreten von Schwebungen und Rauigkeit in Abhängigkeit vom Frequenzabstand zweier Töne (aus: Roederer 1973, S. 29).

Die Frequenzgruppenbreite (oder kritische Bandbreite) liegt bei einer Mittenfrequenz bis 500 Hz konstant bei ca. 100 Hz. Darüber entspricht diese näherungsweise 20 % der anliegenden Mittenfrequenz (Fastl/Zwicker 2007, S. 158). Vergleicht man diese Werte für die Frequenzgruppenbreite mit den musikalischen Intervallen, so stellt man fest, dass Halbton und Ganzton stets innerhalb einer Frequenzgruppenbreite liegen und somit Schwebungen oder Rauigkeit hervorbringen. Bei den Tönen der kleinen und großen Terz hängt es von deren Lage ab, ob diese in eine gemeinsamen Frequenzgruppenbreite fallen. Dies ist in weiterer Folge für die Konsonanztheorie von Helmholtz von großer Bedeutung.

Aber auch wenn die Frequenzlage von Primärtönen oder nichtlinearen Verzerrungsprodukten prinzipiell die Ausbildung eines schwebenden Tones erlaubt, so muss noch die Modulationsschwelle, welche auch von den Pegeln der zusammenklingenden Töne abhängt, überschritten werden, damit diese Schwebungen hörbar werden (folgendes nach Hellbrück/Ellermeier 2004, S. 80-81): Das Ohr reagiert unterschiedlich empfindlich auf Amplitudenmodulationen, wie diese bei Schwebungen entstehen, abhängig von der Modulationsfrequenz. Besonders empfindlich ist das menschliche Gehör bei einer regelmäßigen Amplitudenschwankung von 4 Hz. Bei schnelleren oder langsameren Schwankungen nimmt die Wahrnehmbarkeit zunehmend ab. Die Modulationsschwelle beträgt bei einem 1 kHz-Testton, dessen Amplitude mit 4 Hz moduliert wird, bei einem Pegel von 40 dB ca. 6 %, bei 60 dB ca. 4 % und bei einem Pegel von 100 dB ca. 1 % der Testton-Amplitude. Diese Modulationsschwellen entsprechen ebenmerklichen Pegeländerungen von ca. 1 dB bis 0,1 dB. Diese müssen erreicht werden, damit Schwebungen, hervorgebracht durch Kombinationstöne und Ohrpartialtöne, wahrnehmbar werden.

Falls Kombinationstöne oder Ohrobertöne mit Primärtönen exakt zusammenfallen, also wenn diese keine Schwebungen mehr hervorbringen, muss ebenfalls die ebenmerkliche Pegeländerung erreicht werden, um von einem Einfluss der subjektiven Verzerrungsprodukte auf die Wahrnehmung sprechen zu können. Bisher wurde nur die Ermittlungsmethode für den ebenmerklichen Pegelunterschied mittels Amplitudenmodulation vorgestellt, jedoch lässt sich diese auch mit stationären Klängen ermitteln, was sich anschaulicher auf die Situation übertragen lässt, wenn Verzerrungsprodukte mit Primärtönen zusammenfallen. Bei der zweiten Messmethode werden stationäre Töne verwendet, die durch Pausen voneinander getrennt sind und in

ihrer Lautstärke geringfügig voneinander abweichen. In diesem Fall weichen auch die ebenmerklichen Pegelunterschiede leicht von jenen ab, die mittels Amplitudenmodulation ermittelt wurden. Bei einem Pegel von 40 dB liegt die Grenze bei ca. 0,4 dB und bei 100 dB bei ca. 0,2 dB (Hellbrück/Ellermeier 2004, S. 81).

Natürlich lassen sich diese Diskriminationsschwellen wiederum nur bei den objektiven nichtlinearen Verzerrungsprodukten messen und überprüfen, da man bei diesen mit technischen Hilfsmitteln das Originalsignal mit dem Verzerrten vergleichen kann. Der Einfluss der subjektiven Kombinations- und Obertöne auf einen Klang, wenn diese mit Primärtönen zusammenfallen, lässt sich hingegen nur schwer eindeutig bestimmen und wird meist nur theoretisch berechnet und nicht gemessen. Trotzdem ist jedoch klar, dass diese am sich uns bietenden Klangeindruck beteiligt sind und diesen mitformen, wenn sie denn entstehen können und diese Schwellen überschreiten.

4. Subjektive nichtlineare Verzerrungen

Wie bereits erwähnt, stellt auch das menschliche Gehör ein nichtlineares Übertragungssystem dar, welches Verzerrungsprodukte erzeugen kann. Wo genau und wie im Reiztransportweg Nichtlinearitäten auftreten, die eine ausreichende Erklärung für die Anzahl und Stärke der Verzerrungsprodukte liefern, ist in der Wissenschaft bis heute sehr umstritten und noch nicht zur Gänze geklärt: „The exact nature(s) of these distortion process(es) have yet to be unquestionably established.“ (Gelfand 1990, S. 409).

Einer der Ersten, der sich intensiv mit der Ursache für die Entstehung von Kombinationstönen und Ohrpartialtönen beschäftigt, ist Hermann von Helmholtz. Dieser sucht die nichtlinearen Verzerrungen in den äußeren schwingenden Teilen des Ohres: Das Trommelfell ist nicht symmetrisch aufgebaut, weshalb dessen Schwingungsverhalten auch nichtlinear ausfällt. Noch wichtiger erscheint Helmholtz aber die lose Beschaffenheit des Hammer-Amboss-Gelenks. Bei der Einwärtsbewegung des Trommelfells folgen auch Hammer und Amboss korrekt dieser Bewegung, nicht jedoch bei der Auswärtsbewegung, bei der diese beiden Gehörknöchelchen voneinander loslassen (Helmholtz 1870, S. 248). Schließlich führen die Untersuchungen von Georg von Békésy jedoch zur Erkenntnis, dass zwar auch das Mittelohr nichtlinear arbeitet, der Großteil der nichtlinearen Verzerrungen jedoch im Innenohr zu suchen ist. Zwar führen auch die Asymmetrie des Trommelfells und der Überlastungsschutz in der Steigbügelschwingung, also der Stapediusmuskel, zu Nichtlinearitäten, jedoch reichen diese nicht aus, um die Stärke der Kombinationstöne zu erklären (Békésy 1936, S. 21). Auch dass die Basilarmembran, welche mit wachsender Auslenkung steifer wird, eine Rolle für die Entstehung von nichtlinearen Verzerrungsprodukten spielt, kann Békésy widerlegen, indem er aufzeigt, dass die Steife erst bei Schalldrücken an der Schmerzschwelle bedeutend wächst (Békésy 1947, S. 455).

Eine andere Ursache für die Entstehung von subjektiven Kombinations- und Obertönen kann im nichtlinearen Verhalten der Lymphflüssigkeit in der Scala Tympani und der Scala Vestibuli gefunden werden (folgendes nach Gelfand 1990, S. 175 - 176): Vom ovalem Fenster, auf dem der Steigbügel aufliegt, der die Schwingungen an die Lymphflüssigkeit weitergibt, hin zum Helicotrema der Cochlea wird die Scala Vestibuli immer enger, was dazu führt, dass die Druckwellen in der Flüssigkeit beschleunigt werden. Die Scala Tympani wird hingegen vom Helicotrema hin zum runden Fenster immer weiter, was zu

einer Verlangsamung der Wellen führt. Dieses Verhalten der Lymphflüssigkeit in den Scalae wird als nichtlinear gewertet. Weiters werden die Wellen in den Scalae, die bei einem Reiz mit hoher Intensität auftreten, abgeflacht, was einer Verformung der Wellenform bzw. einer Übersteuerung entspricht. Durch dieses Peak-Clipping können wiederum zahlreiche weitere Verwirbelungen bzw. Strömungen entstehen, die den harmonischen Teiltönen eines Primärtons entsprechen. Strömungen bilden sich auch immer unter den Maxima einer Wanderwelle in Scala Vestibuli und Scala Tympani aus. Wenn zwei Töne gemeinsam auf das Ohr treffen, so können sich diese Strömungen bzw. Verwirbelungen gegenseitig beeinflussen, also aneinander schieben und ziehen, was eine neue Wanderwelle hervorbringt, die von einer tieferen Frequenz als die Primärtöne ist und somit die Differenztöne erklärt.

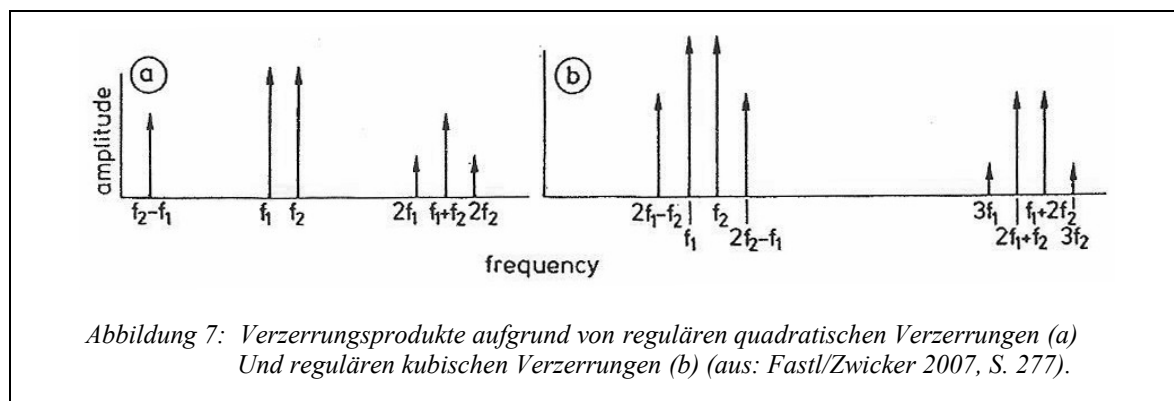
Weiters wird auch vermutet, dass der mechanoelektrische Wandlungsprozess der Haarzellen von mechanischen bzw. hydromechanischen Impulsen in elektrische Nichtlinearitäten aufweist. Diese Verzerrungen scheinen hauptsächlich verantwortlich für jene Verzerrungsprodukte zu sein, die unabhängig von der Amplitude des Ausgangssignals entstehen (Gelfand 1990, S. 177).

Wo und wie nun genau die subjektiven Verzerrungsprodukte entstehen ist also eine sehr umstrittene Frage in der Forschung, welche auch nicht im Rahmen dieser Arbeit zur Gänze geklärt werden kann. Man ist sich zumindest einig, dass der gesamte Reiztransportweg unseres Hörsystems nichtlinear arbeitet und dass die Kombinations- und Ohrpartialtöne in der Cochlea bzw. auf der Basilarmembran tatsächlich vorhanden sein müssen. Dies wird dadurch bestätigt, dass diese Verzerrungsprodukte auch als Stimulus agieren bzw. untereinander und mit Primärtönen interagieren können (Gelfand 1990, S. 409).

Objektive und subjektive Verzerrungsprodukte können in *quadratische* und *kubische* unterteilt werden, wobei nur die objektiven diesen Bezeichnungen auch tatsächlich gerecht werden, indem erstere eine Folge von regulären quadratischen, letztere eine Folge von regulären kubischen nichtlinearen Verzerrungen sind (dies und folgendes nach Fastl/Zwicker 2007, S. 277-278): Wie später noch genauer aufgezeigt wird, folgen die subjektiven Verzerrungen in der Praxis hingegen nicht exakt den einfachen mathematischen Gesetzen, denen sie ihren Namen zu verdanken haben. Wie der Abbildung 7 zu entnehmen ist, zählen der D_{11} , der S_{11} , sowie jene Obertöne, die die doppelte Frequenz der Primärtöne aufweisen, zu den quadratischen nichtlinearen

Verzerrungsprodukten. Zu den kubischen Verzerrungsprodukten hingegen zählen der D_{21} und der D_{12} , der S_{21} und der S_{12} , sowie die Obertöne mit der dreifachen Frequenz der Primärtöne.

Diese Unterteilung in quadratische und kubische Verzerrungsprodukte hat schließlich dazu geführt, dass der D_{11} als *quadratischer Differenzton* bezeichnet wird. Der D_{21} gilt als der tiefere, der D_{12} als der höhere *kubische Differenzton*. Wenn nur vom kubischen Differenzton ohne weitere Angaben gesprochen wird, ist in der Regel der D_{21} gemeint, was auch in dieser Arbeit übernommen wird.



In weiterer Folge werden nun die Ohrpartialtöne, die Summationstöne und jene Differenztöne, die auch für die Konsonanztheorien auf der Basis von nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs am wichtigsten sind und deren Eigenschaften am besten erforscht sind (quadratischer und kubischer Differenzton), genauer betrachtet. Dazu wird vor allem auf deren Intensität in Abhängigkeit von den Primärtonpegeln und -frequenzen eingegangen, um deren Relevanz für die musikalische Wahrnehmung und somit für die Konsonanztheorien zu prüfen.

Die nun beschriebenen Eigenschaften der subjektiven Kombinations- und Obertöne, vor allem deren Pegel und Frequenz, wurden mit der sogenannten *Kompensationsmethode* ermittelt. Dabei wird zusätzlich zu den Primärtönen ein Hilfstön erzeugt, dessen Pegel, Frequenz und Phase von den Versuchspersonen so eingestellt wird, dass das Verzerrungsprodukt durch gegenphasige Auslöschung völlig verschwindet. Von den eingestellten Werten können so direkte Rückschlüsse auf die Eigenschaften des untersuchten Verzerrungsprodukts gezogen werden (Fastl/Zwicker 2007, S. 278).

4.1 Ohrpartialtöne

Das erste Verzerrungsprodukt, das nun beschrieben wird, sind die Ohrpartialtöne bzw. Ohrobertöne, welche auch *subjektive Obertöne* (Hindemith 1940, S.11) oder in der englischsprachigen Literatur meist *aural harmonics* (Gelfand 1990, S. 407) genannt werden. Obwohl die Ohrpartialtöne die einfachste Form von Verzerrungen des Gehörs darstellen, werden diese doch in der Forschung und Literatur oft vernachlässigt, was wohl auf deren meist sehr geringe Intensität zurückzuführen ist.

Bereits Hermann von Helmholtz (1870, S. 249) berichtet über die subjektiven Obertöne: Auch bei Stimmgabeln, die zumindest näherungsweise einen Sinuston hervorbringen, kommen bei starker Erregung zum Grundton harmonische Obertöne hinzu. Helmholtz stellt eine Analogie zum menschlichen Ohr her und geht davon aus, dass sich dieses ähnlich verhalten muss. Jedoch schenkt Helmholtz, wie auch Hindemith, den Ohrpartialtönen keine weitere Aufmerksamkeit in seiner Konsonanztheorie. Beide halten diese Verzerrungsprodukte für zu schwach und unbedeutsam.

Wie die verwendeten Begriffe für diese Verzerrungsprodukte erahnen lassen, handelt es sich dabei um die harmonischen Obertöne eines Grundtons, wie man sie auch bei Klängen mit harmonisch aufgebautem Obertonspektrum finden kann. Diese Verzerrungsprodukte des Gehörs haben also, wie die objektiv in der Luftschwingung vorhandenen harmonischen Obertöne, Frequenzen, die den ganzzahligen Vielfachen des Grundtons entsprechen. Nimmt man die Frequenz f_1 als Stimulus bzw. Primärtonfrequenz, so ergeben sich Ohrpartialtöne mit den Frequenzen $2f_1$, $3f_1$ usw. Geht man von einem Sinuston mit einer Frequenz von 500 Hz für f_1 aus, so liegen die ersten beiden subjektiven Obertöne bei 1000 Hz und 1500 Hz (Gelfand 1990, S. 407). Wie bereits erwähnt, sind die Ohrpartialtöne die einzigen Verzerrungsprodukte, welche entstehen können, wenn nur ein Sinuston auf das Ohr trifft.

Auch die subjektiven Obertöne kann man den quadratischen und kubischen Verzerrungen des Ohres zuordnen, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Der jeweils erste Oberton einer Grundfrequenz ($2f_1$ und $2f_2$ in Abbildung 7) ist ein Produkt quadratischer nichtlinearer Verzerrung, der jeweils zweite Oberton ($3f_1$ und $3f_2$) ein Produkt kubischer nichtlinearer Verzerrung. Während die quadratischen Ohrpartialtöne nur eine halb so große Amplitude wie die quadratischen Kombinationstöne aufweisen, haben die kubischen

Kombinationstöne sogar eine drei Mal so große Amplitude wie die dazugehörigen Ohrpartialtöne (Fastl/Zwicker 2007, S. 277-278).

Die Ohrpartialtöne sind das einfachste Produkt nichtlinearer Verzerrung des Gehörs, da diese in ihrer Frequenz den Obertönen eines harmonischen Klanges entsprechen. Sie entstehen, wenn die Primärtöne einen hohen Schalldruckpegel aufweisen: „The simplest distortion products occur when tones are presented at high levels, resulting in the generation of aural harmonics that are heard by the subject.“ (Gelfand 2009, S. 97). Grundsätzlich herrscht, aufgrund der Tatsache, dass diese erst bei sehr hohen Pegeln der Primärtöne hörbar werden und in den meisten Fällen der Verdeckung zum Opfer fallen, jedoch der Konsens, dass die Ohrpartialtöne nicht so bedeutend sind wie die Differenzttöne.

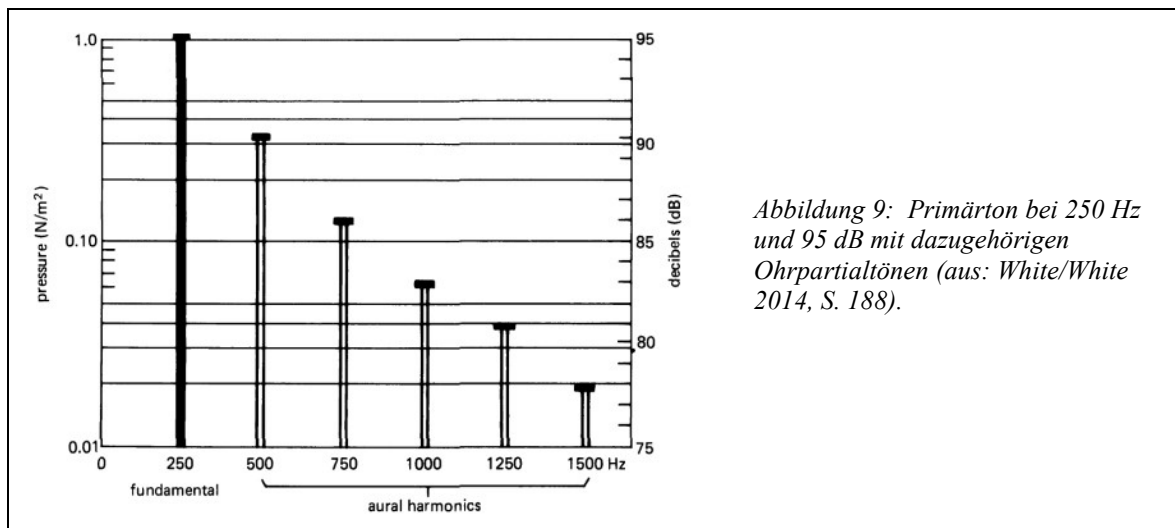
Um in weiterer Folge die Untersuchungen über das Konsonanzempfinden bei Husmann, wo die Ohrpartialtöne eine zentrale Rolle einnehmen, und auch die später vorgestellte Studie zur Konsonanz und die dabei verwendeten Schalldruckpegel für die Primärtöne verstehen zu können, sind genauere Angaben zu den Eigenschaften dieses Verzerrungsproduktes notwendig (folgendes nach White/White 2014, S. 188): Die Schalldruckpegel, ab denen Ohrpartialtöne hörbar werden, sind je nach Frequenz der Primärtöne unterschiedlich. Folgende Grenzschalldrücke, ab denen das Gehör ausreichend verzerrt damit Ohrpartialtöne entstehen können, werden beschrieben: Ohrpartialtöne werden ab 30 dB produziert, wenn der Primärton bei 350 Hz liegt. Bei einer Primärtonfrequenz von 1000 Hz entstehen Ohrpartialtöne ab 50 dB und bei 5000 Hz ab 55 dB.

30 dB	at	350 Hz
50 dB	at	1000 Hz
55 dB	at	5000 Hz

Abbildung 8: Grenzschalldrücke für die Bildung von Ohrpartialtönen bei unterschiedlichen Frequenzen (aus: White/White 2014, S. 188).

Aus diesen Angaben lässt sich schließen, dass das Gehör bei sehr kleinen Schalldruckpegeln nahezu linear arbeitet und dass die subjektiven Verzerrungsprodukte im Allgemeinen und die Ohrpartialtöne im Speziellen erst ab einem gewissen Grenzschalldruck der Primärtöne entstehen.

In Abbildung 9 ist ein Primärton mit einer Frequenz von 250 Hz bei einem Schalldruckpegel von 95 dB mit seinen Ohrpartialtönen zu sehen. Der erste subjektive Oberton mit 500 Hz liegt bei ca. 90 dB, der zweite mit 750 Hz immer noch bei ca. 86 dB. Hin zu den höheren Frequenzen werden diese aber immer schwächer.



Wie man sehen kann, nehmen die Ohrpartialtöne bei erheblicher Lautstärke des Primärtons eine durchaus beträchtliche Lautstärke an. Natürlich bleiben diese trotzdem häufig unhörbar, aber deren mangelnde Erwähnung bzw. völlige Ausklammerung in manchen Konsonanztheorien, die auf nichtlinearen Verzerrungen beruhen, muss sicher kritisch gesehen werden. Bei schwächeren Pegeln der Primärtöne, werden die subjektiven Obertöne zwar vom Ohr bis zu den oben erwähnten Schalldruckgrenzen produziert, jedoch sind diese nur sehr schwach und fallen meist der Verdeckung zum Opfer. Auch wird es immer schwieriger diese subjektiven Verzerrungsprodukte wahrzunehmen, je mehr Primärtöne zusammen erklingen, da die subjektiven Obertöne, wie die objektiven, meist über den starken Grundtönen und Differenztönen niedriger Ordnung liegen. In der Musikpraxis, wenn wir also von Klängen (Grundton mit harmonischem Obertonspektrum) sprechen, sind die Ohrpartialtöne meist nicht bewusst wahrnehmbar, da diese mit den harmonischen Teiltönen des Klanges zusammenfallen. Sie können die Obertöne des Klanges jedoch verstärken und dadurch den Klangeindruck verändern, auch wenn die Veränderung nur sehr gering ausfallen wird, da die objektiven Obertöne um einiges stärker sind als die subjektiven.

Zusammenfassend sind die Ohrpartialtöne also sicher nicht außer Acht zu lassen, jedoch fallen diese in den meisten Fällen eher schwach aus und sind aus diesem Grund auch nur schwer zu messen: Bei kleinen Schalldrücken der Primärtöne sind auch die Ohrpartialtöne sehr schwach. Bei starken Primärtönen werden diese zwar lauter, aber durch die größer werdende Verdeckung hin zu höheren Frequenzen bleiben sie wiederum häufig unhörbar (Zwicker 1982, S. 89).

4.2 Summationstöne

Die Summationstöne trifft ein ähnliches Schicksal wie die Ohrobertöne. Auch ihnen wird im Vergleich zu den Differenztönen relativ wenig Beachtung geschenkt: „We will say little about the summation tone except to point out that it is quite weak and not always audible.“ (Gelfand 1990, S. 408).

Wie bereits angesprochen, können auch die Summationstöne den quadratischen und kubischen Verzerrungen zugeordnet werden (siehe Abbildung 7). Der quadratische Summationston berechnet sich durch die Addition der Primätonfrequenzen ($f_1 + f_2$) und wird häufig mit der Bezeichnung S_{11} abgekürzt. Die kubischen Summationstöne sind der S_{21} ($2f_1 + f_2$) und der S_{12} ($f_1 + 2f_2$). Natürlich gibt es auch hier Summationstöne höherer Ordnung, die sich aus der Addition von zwei Summationstönen oder einem Summationston mit einem Primärtönen ergeben.

Die Entdeckung der Summationstöne wird Hermann von Helmholtz zugeschrieben, auch wenn dieser nur die quadratischen Summationstöne beschreibt: „[...] ihre Schwingungszahlen sind gleich der Summe der Schwingungszahlen der Primärtöne.“ (Helmholtz 1870, S. 240). Wie man ebenfalls der Abbildung 7 entnehmen kann, weisen die Summationstöne eine gleich große Amplitude auf wie die Differenztöne quadratischer und kubischer Art. Sie finden jedoch weniger Beachtung, da diese immer schwächer wahrgenommen werden als die Differenztöne, was wie bei den Ohrpartialtönen an der Verdeckung liegt (Helmholtz 1870, S. 240). Auch die Summationstöne liegen in ihrer Frequenz stets über den beiden Primärtönen und den starken Differenztönen, was dazu führt, dass diese meist verdeckt werden und nur sehr schwer wahrnehmbar sind.

Aus diesem Grund spielen die Summationstöne auch in den Konsonanztheorien von Helmholtz und Hindemith keine Rolle und es werden nur der starke quadratische und kubische Differenzton als Grundlage gesehen. Nur bei Heinrich Husmann finden sie, wie auch die Ohrpartialtöne, ihren Platz: Husmann meint, dass die Summationstöne bei den konsonanten Intervallen immer mit den Ohrpartialtönen und Differenztönen höherer Ordnung zusammenfallen, weshalb diese auch verstärkt werden und doch eine Rolle spielen, auch wenn diese sicher den stärkeren Verzerrungsprodukten des Gehörs untergeordnet sind (Husmann 1953, S. 21).

4.3 Quadratischer Differenzton

Die Differenztöne sind grundsätzlich die nichtlinearen Verzerrungsprodukte des Gehörs, die auch am besten hörbar sind, da zumindest der D_{11} und der D_{21} meist unter den Primärtonfrequenzen liegen. Aus diesem Grund wird diesen auch in den Konsonanztheorien von Helmholtz, Hindemith und Husmann die größte Bedeutung zugeschrieben, wobei der quadratische Differenzton von diesen Theoretikern als der stärkste Kombinationston beschrieben wird. Unter welchen Voraussetzungen dieser tatsächlich alle anderen Verzerrungsprodukte überragt und erhebliche Lautstärke erreicht, soll nun beschrieben werden.

Die Frequenz des quadratischen Differenztones erhält man, wenn man bei einem Zusammenklang von zwei Tönen die tiefere Frequenz von der höheren abzieht. Für die Berechnung der Frequenz des quadratischen Differenztones D_{11} gilt also die Formel $f_2 - f_1$, wobei f_1 für die Frequenz des tieferen und f_2 für die Frequenz des höheren Primärtons steht. Beim quadratischen Differenzton geht man von einer frequenzunabhängigen nichtlinearen Verzerrung des Gehörs aus, was bedeutet, dass zumindest der Frequenzabstand zwischen den beiden Primärtonfrequenzen keine bzw. nur eine geringe Auswirkung auf den Pegel des D_{11} hat (Zwicker 1982, S. 89-90).

In Abbildung 10 sind die relativen Pegel des quadratischen Differenztons in Abhängigkeit von den Primärtonpegeln eingetragen. Die Pegel des tieferen Primärtons (L_1) sind auf der x-Achse aufgetragen, jene des höheren Primärtons (L_2) findet man direkt bei den aufsteigenden Linien. Auf der y-Achse kann man schließlich den Pegel des quadratischen Differenztons bei den unterschiedlichen Primärtonpegeln ablesen, wobei die strichlierten Linien für die Pegel bei regulären quadratischen Verzerrungen, die durchgezogenen für die tatsächlich gemessenen stehen. Diese Pegel wurden mittels Kopensationsmethode ermittelt, weshalb die Differenztonpegel als *cancellation level* bezeichnet werden. In Abbildung 10 a) und b) liegt die Frequenz des tieferen Primärtons bei 1620 Hz, jene des höheren einmal bei 1944 Hz und einmal bei 2592 Hz. Der größere Frequenzabstand wirkt sich nur sehr geringfügig auf die Pegel des quadratischen Differenztones aus. Zwar sind die Pegel bei kleinerem und größerem Frequenzabstand nicht exakt identisch, jedoch entsprechen beide zumindest näherungsweise regulären quadratischen Verzerrungen: „The fact that the two parts [...] can be described well by the same set of dashed lines indicates that, in this case, the nonlinearity is independent of frequency distance.“ (Fastl/Zwicker

2007, S. 279). Trotzdem muss festgehalten werden, dass die Pegel des quadratischen Differenztones in Abbildung 10 a) stets schwächer ausfallen als jene in Abbildung 10 b) und somit der Frequenzabstand der Primärtöne doch einen Einfluss auf die Differenztonpegel hat, auch wenn dieser sicher geringer ist als beim kubischen Differenzton.

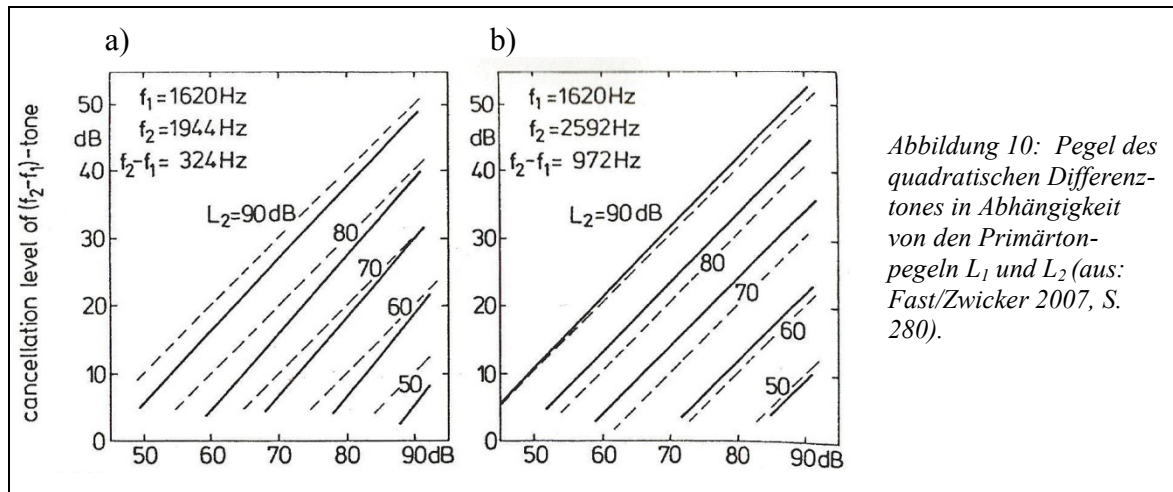


Abbildung 10: Pegel des quadratischen Differenztones in Abhängigkeit von den Primärtonpegeln L_1 und L_2 (aus: Fast/Zwicker 2007, S. 280).

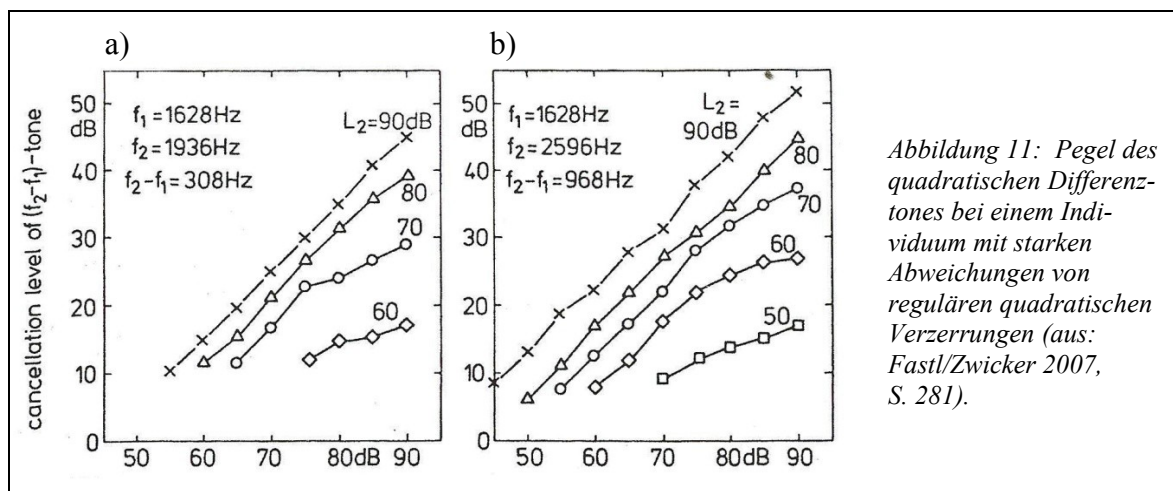


Abbildung 11: Pegel des quadratischen Differenztones bei einem Individuum mit starken Abweichungen von regulären quadratischen Verzerrungen (aus: Fast/Zwicker 2007, S. 281).

Die meisten Versuchspersonen bestätigen die annähernde Unabhängigkeit des Differenztonpegels vom Abstand der beiden Primärtonfrequenzen, jedoch entsprechen die Versuchsergebnisse von einigen Individuen nicht diesem regulären Verhalten. In Abbildung 11 zeigt ein Proband bei unterschiedlichen Frequenzabständen doch erhebliche Unterschiede zwischen den Differenztonpegeln auf: Bei einem geringeren Frequenzabstand von 308 Hz in Abbildung 11 a) weist der quadratische Differenzton unter den Bedingungen $L_1 = 90$ dB und $L_2 = 60$ dB einen Pegel von ca. 17 dB auf. Bei größerem

Frequenzabstand (968 Hz) in Abbildung 11 b) hingegen, liegt der Differenztonpegel bei gleichen Primärtonpegeln bei ca. 27 dB.

Da jedoch für einen Großteil der Versuchspersonen der Frequenzabstand der Primärtöne nur einen geringen Einfluss auf den Differenztonpegel hat, wird angenommen, dass diese nichtlinearen Verzerrungen im Gehör vor den frequenzselektiven Mechanismen auftreten, also im Mittelohr, obwohl dessen Nichtlinearität, wie bereits erwähnt, für viele Forscher nicht ausreicht, um die Stärke der Kombinationstöne zu deuten. Für Individuen die davon abweichen, könnte eine Mischung aus Verzerrungen im Mittelohr und im Innenohr die Ursache für diese spezielle Frequenzabhängigkeit sein (Fastl/Zwicker 2007, S. 281). In diesen Erklärungsversuchen wird deutlich, wie schwierig es ist, sich auf einen eindeutigen Entstehungsort der nichtlinearen Verzerrungsprodukte festzulegen.

Von einer allgemeinen Frequenzunabhängigkeit kann jedoch nicht die Rede sein, da abgesehen vom Frequenzabstand der Primärtöne auch deren Lage einen Einfluss auf den Pegel des quadratischen Differenztones hat: Liegen die Primärtöne über 1000 Hz, so weist der quadratische Differenzton einen sehr geringen Pegel auf, der meist 50 dB unter den Primärtonpegeln liegt. Liegen die Primärtöne jedoch unter 1000 Hz, kann der Pegel des D_{11} einen Pegel annehmen, der nur 10 dB unter jenen der Primärtöne liegt (Gelfand 1990, S. 409).

Neben der Abhängigkeit des Differenztonpegels von den Primärtonfrequenzen, ist es auch unerlässlich die Abhängigkeit von den Primärtonpegeln zu untersuchen, um aufzeigen zu können unter welchen Gegebenheiten der quadratische Differenzton unseren Höreindruck maßgeblich beeinflusst. Auch um die Bedeutung des quadratischen Differenztones für die Konsonanztheorien auf Basis der nichtlinearen Verzerrungen nachvollziehen zu können und um angemessene Pegel für die Primärtöne bei den später noch vorgestellten Versuchen zum Konsonanzempfinden bestimmen zu können, ist es wichtig sich mit den Eigenschaften dieses Verzerrungsproduktes zu befassen.

Die Abhängigkeit des Differenztonpegels von den Primärtonpegeln L_1 (Pegel des tieferen Tones f_1) und L_2 (Pegel des höheren Tones f_2) entspricht zumindest näherungsweise einem einfachen mathematischen Gesetz, das mit folgender Formel beschrieben werden kann:

$$L_{(f_2-f_1)} = L_1 + L_2 - 130 \text{ dB} \quad (\text{Zwicker 1982, S. 90}).$$

Folgt man diesem Gesetz, entspricht der Differenztonpegel $L_{(f_2-f_1)}$ der Addition der beiden Primärtonpegel abzüglich einer Konstante von 130 dB. In Abbildung 10 entsprechen die gestrichelt eingetragenen Geraden genau diesem Gesetz. Die tatsächlichen Werte der Kompensationspegel für den quadratischen Differenzton, dargestellt mit durchgezogenen Geraden, weichen nur sehr geringfügig davon ab. „Die quadratischen Verzerrungen des Gehörs können demnach mit guter Näherung als reguläre quadratische Verzerrungen bezeichnet werden.“ (Zwicker 1982, S. 90). Wie man diesem Gesetz entnehmen kann, wird der quadratische Differenzton erst wahrnehmbar, sobald die Addition der Primärtonpegel mehr als 130 dB ergibt. So ergibt sich sowohl für die Situation $L_1 = L_2 = 70$ dB, als auch für $L_1 = 90$ dB und $L_2 = 50$ dB, derselbe Differenztonpegel von nur 10 dB. Wenn beide Primärtöne einen Schalldruckpegel von 90 dB aufweisen, erreicht der D_{11} einen Wert von 50 dB und liegt immer noch 40 dB unter den Primärtonpegeln (siehe Abbildung 10).

Jedoch weichen die Kompensationspegel für den quadratischen Differenzton einiger Individuen äußerst stark von den regulären quadratischen Gesetzmäßigkeiten ab, was darauf hinweist, dass die Verzerrungen bei diesen Personen nicht allein auf quadratischen Verzerrungen des Gehörs beruhen. Wie bei der Frequenzunabhängigkeit bereits angesprochen, kann eine Mischung aus Verzerrungen im Mittelohr und im Innenohr die Ursache dafür sein (Fastl/Zwicker 2007, S. 281-282). Diese Abweichung von der regulären Abhängigkeit des Differenztonpegels von den Pegeln der Primärtöne bei einigen Versuchspersonen lässt sich sehr gut an einem Beispiel aus Abbildung 11 b) aufzeigen: Nimmt man dieselben Primärtonpegel wie in einem der Beispiele vorhin, $L_1 = L_2 = 70$ dB, so müsste der quadratische Differenzton nach der oben genannten Formel einen Pegel von 10 dB aufweisen. Jedoch liegt der Pegel des D_{11} für die Versuchsperson, deren Werte in Abbildung 11 b) gezeigt werden, bei ca. 22 dB. Auch wenn die Abhängigkeit der Differenztonpegel von den Primärtonpegeln generell nur näherungsweise einem quadratischen Gesetz folgt, so ist eine Abweichung dieses Ausmaßes doch erheblich und lässt auf das Mitwirken anderer, nicht quadratischer Verzerrungen im Gehör bei diesen Individuen schließen.

Zusammenfassend nimmt der quadratische Differenzton tatsächlich eine äußerst prominente Rolle ein und ist unter gewissen Umständen von wahrnehmbarer Lautstärke, was dessen Hervorhebung in den Konsonanztheorien rechtfertigt. Damit der D_{11} jedoch die musikalische Wahrnehmung hörbar beeinflusst, müssen die Primärtonpegel relativ groß sein.

4.4 Kubischer Differenzton

Anders als der Pegel des quadratischen Differenztons, der zumindest für die meisten Individuen näherungsweise in seiner Abhängigkeit von den Primärtonpegeln einem einfachen Gesetz folgt, verhalten sich die Pegel der kubischen Differenztöne.

Fälschlicherweise wird häufig nur von dem einen kubischen Differenzton gesprochen. Jedoch ist mit diesem nur die tiefer liegende Variante gemeint, deren Frequenz man erhält wenn man zweimal die tiefere Frequenz (f_1) nimmt und davon die höhere (f_2) abzieht: $2f_1 - f_2$. Es gibt aber auch noch den höheren kubischen Differenzton, $2f_2 - f_1$, also zweimal die höhere Frequenz abzüglich der tieferen, der häufig in Vergessenheit gerät (Fastl/Zwicker 2007, S. 278). Dies liegt wahrscheinlich daran, dass dieses nichtlineare Verzerrungsprodukt stets über den Primärtonfrequenzen liegt. Dadurch wird auch der höhere kubische Differenzton D_{12} meist durch die darunter liegenden Primärtöne verdeckt, bleibt unhörbar und spielt für die musikalische Wahrnehmung und im Weiteren für die Konsonanztheorien von Helmholtz und Hindemith keine wesentliche Rolle. Einzig bei Husmann wird auch der höhere kubische Differenzton in die Theorie miteinbezogen, wenn auch nur theoretisch, da dieses Verzerrungsprodukt in der Praxis sicher keine so wesentliche Rolle spielt. Wie bereits angesprochen, ist auch in dieser Arbeit mit dem *kubischen Differenzton* ausschließlich der D_{21} gemeint, wenn nicht explizit auf den höheren hingewiesen wird. Die Verdeckung macht den höheren kubischen Differenzton auch für Pegelmessungen in den meisten Fällen unbrauchbar, weshalb in weiterer Folge ausschließlich die Erkenntnisse zum tieferen kubischen Differenzton abgehandelt werden.

Wie der Pegel des quadratischen Differenztones zumindest näherungsweise nach einem quadratischen Gesetz von den Primärtonpegeln abhängt, so würde man auch erwarten, dass die Abhängigkeit der Pegel der beiden kubischen Differenztöne von den Primärtonpegeln einem kubischen Gesetz folgt. Die Formeln für die Pegel jener Differenztöne, die von regulären kubischen Verzerrungen hervorgebracht werden, lauten:

$$L_{(2f_1-f_2)} = 2L_1 + L_2 - C$$

$$L_{(2f_2-f_1)} = 2L_2 + L_1 - C \quad (\text{Fastl/Zwicker 2007, S. 278}).$$

Den Pegel des tieferen kubischen Differenztones erhält man demnach, wenn man zweimal den Pegel des tieferen Primärtones (L_1) nimmt, diesen Wert dann mit dem Pegel des höheren Primärtones (L_2) addiert und schließlich davon eine Konstante (C), welche von der relativen Amplitude der kubischen Verzerrung abhängig ist, abzieht. Jedoch folgen die kubischen Differenzöne diesen kubischen Gesetzen nur unter Laborbedingungen, bei denen objektive Differenzöne mittels regulärer kubischer Verzerrungen auf elektroakustischem Weg hergestellt werden (Fastl/Zwicker 2007, S. 278).

Zum tieferen subjektiven Differenzton D_{21} wurden, wie auch zum subjektiven quadratischen Differenzton, Messungen mittels Kompensationsmethode durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen aber, dass die Abhängigkeit des subjektiven Differenztonpegels von den beiden Primärtonpegeln erheblich von regulären kubischen Verzerrungen, nach der oben angeführten Formel, abweicht bzw. dieser nur folgt, „[...] wenn die Frequenzen f_1 und f_2 verhältnismäßig benachbart sind [...] und auch dann nur, wenn L_2 kleiner ist als L_1 .“ (Zwicker 1982, S. 90).

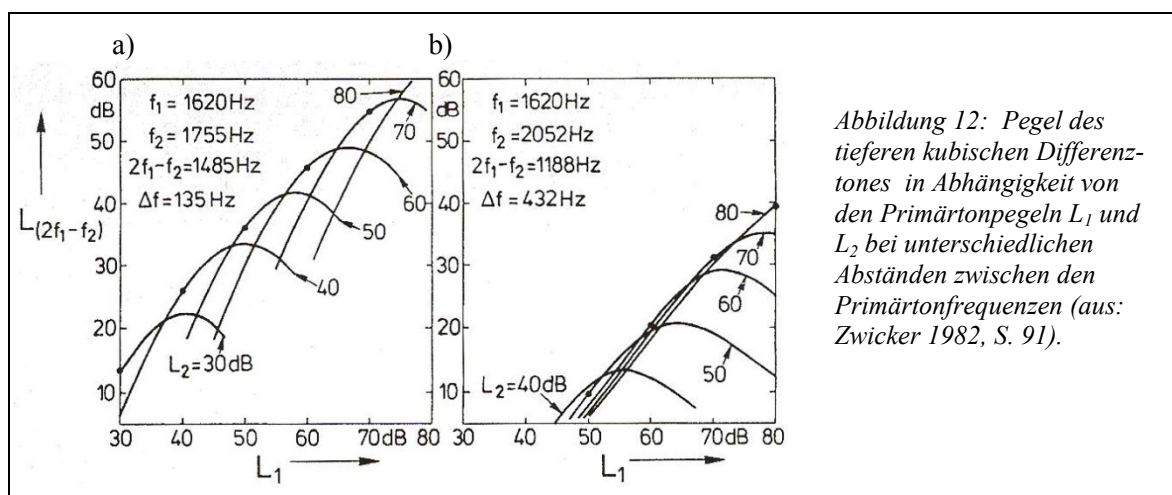


Abbildung 12: Pegel des tieferen kubischen Differenztones in Abhängigkeit von den Primärtonpegeln L_1 und L_2 bei unterschiedlichen Abständen zwischen den Primärtonfrequenzen (aus: Zwicker 1982, S. 91).

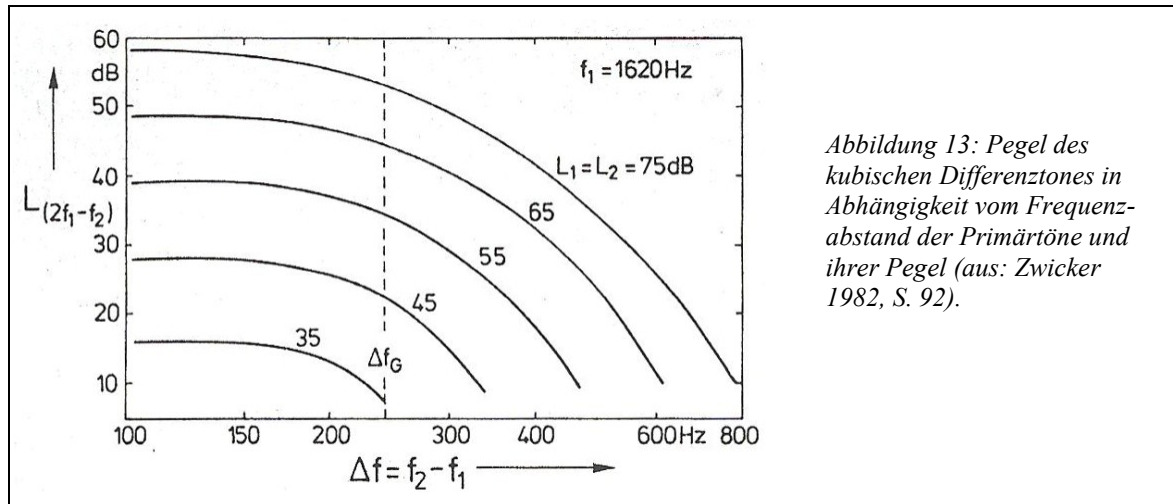
Die Abhängigkeit der Differenztonpegel von L_1 und L_2 , die in Abbildung 12 dargestellt ist, hat tatsächlich mit einer kubischen Kennlinie nichts zu tun. Zwar ist in Abbildung 12 a), in der der Frequenzabstand mit 135 Hz relativ gering ist, ein regulärer Anstieg des Differenztonpegels festzustellen, solange der Pegel des tieferen Tones (L_1) geringer ist als der des höheren (L_2), aber der weitere Verlauf der Pegelkurve deutet offensichtlich auf eine irreguläre Verzerrung hin: „Der Pegel des Kompensationstones nimmt bei konstantem Pegel L_2 mit wachsendem L_1 wieder ab.“ (Zwicker 1982, S. 91). Das heißt, dass auch der kubische Differenzton in hohem Maße von der Lautstärke der Primärtöne abhängig ist, wenngleich diese Abhängigkeit eine vollkommen andere ist, als jene beim quadratischen

Differenzton. An der Pegelkurve des kubischen Differenztones in Abbildung 12 a), bei der L_2 konstant bei 40 dB liegt, lässt sich diese Abhängigkeit gut aufzeigen: Solange L_1 unter L_2 (40 dB) liegt, ist ein konstanter Anstieg des Differenztonpegels, der den Gesetzen kubischer Verzerrungen folgt, zu beobachten. Lässt man den Pegel des tieferen Tones (L_1) jedoch stetig größer werden, so steigt der Pegel des Differenztones von 40 dB bis ca. 50 dB immer langsamer, bis er schließlich sogar beginnt abzunehmen. Ab einem Pegel von 60 dB für den tieferen Primärton ist dieser sogar unhörbar.

Es ist verwunderlich, dass jener Teil des Gehörs, der für die Entstehung des kubischen Differenztones verantwortlich ist, weniger nichtlinear arbeitet, wenn der Pegel des tieferen Primärtones größer wird: „This decrement [...] indicates that the hearing system acts less nonlinearly for higher input levels, i.e. indicating the existence of a distortion source that cannot be described by simple regular nonlinear characteristics.“ (Fastl/Zwicker 2007, S. 283). Das zeigt, dass die seltsame Abhängigkeit des D_{21} von den Primärtonpegeln bzw. die Abweichung von regulären nichtlinearen Verzerrungen nach einfachen Gesetzen bislang unbeantwortete Fragen aufwirft, die die Beschreibung dieses Verzerrungsproduktes sehr schwierig macht.

Neben der Abhängigkeit von den Primärtonpegeln ist die Lautstärke des kubischen Differenztones auch erheblich vom Frequenzabstand der beiden Primärtöne abhängig (folgendes nach Zwicker 1982, S. 91): Dies wird deutlich wenn man die Pegelkurven des D_{21} von Abbildung 12 a) und b) miteinander vergleicht. In jenem Beispiel, das in Abbildung 12 a) gezeigt wird, beträgt der Frequenzabstand zwischen f_1 (1620 Hz) und f_2 (1755 Hz) nur 135 Hz, während dieser in Abbildung 12 b), in der f_2 auf 2052 Hz erhöht wird, 432 Hz beträgt. Die in Abbildung 12 b) gezeigten Differenztonpegel bei größerem Frequenzabstand liegen durchschnittlich 30 dB unter jenen der Abbildung 12 a). Noch deutlicher wird die Abhängigkeit des Differenztonpegels vom Frequenzabstand der Primärtöne in Abbildung 13: Hier sieht man den Verlauf von $L_{(2f_1-f_2)}$ bei größer werdendem Frequenzabstand, wobei f_1 konstant eine Frequenz von 1620 Hz aufweist und f_2 sich nach oben hin immer weiter davon entfernt. Bei größer werdendem Abstand nimmt der Pegel des kubischen Differenztones zuerst noch langsam, dann jedoch sehr rasch ab, bis dieser schließlich die Mithörschwelle erreicht. Die gestrichelte Linie stellt die ungefähre Grenze der Frequenzgruppenbreite dar, bis zu welcher der Differenztonpegel bei größer werdendem Abstand zwischen f_1 und f_2 nur langsam abnimmt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Frequenzgruppenbreite in einem Zusammenhang zur

Frequenzabhängigkeit des kubischen Differenztones steht, was jedoch noch nicht endgültig geklärt ist: „Vermutlich kann die Frequenzgruppenbreite [...] nur ein Hinweis dafür sein, daß die Frequenzselektivität des Gehörs bei der Entstehung kubischer Verzerrungen im Gehör eine wichtige Rolle spielt.“ (Zwicker 1982, S. 91).



Die genaue Betrachtung des tieferen kubischen Differenztones zeigt, dass diesem subjektiven Verzerrungsprodukt in den später genauer erläuterten Theorien von Helmholtz, Husmann und Hindemith zu Unrecht stets weniger Bedeutung und Einfluss auf die musikalische Wahrnehmung zugesprochen wird als dem quadratischen Differenzton. Natürlich wird der kubische Differenzton seiner Rolle als prominentestes Verzerrungsprodukt (Fastl/Zwicker 2007, S. 278) nur unter gewissen Voraussetzungen gerecht, die vom Frequenzabstand und den Pegeln der Primärtöne abhängen. Diesen aber grundsätzlich als schwächer zu bezeichnen ist schlichtweg falsch. Vergleicht man den Pegel des D_{11} und des D_{21} bei gleichen Primärtonpegeln ($L_1 = L_2 = 70$ dB), wenn ein relativ geringer Frequenzabstand vorliegt, so erreicht der kubische Differenzton sogar einen Pegel von 55 dB (vgl. Abbildung 12 a), während der quadratische nur einen Pegel von 10 dB (vgl. Abbildung 10 a) aufweist.

5. Subjektive nichtlineare Verzerrungen in Konsonanztheorien

5.1 Konsonanztheorie nach Hermann von Helmholtz

Die erste Konsonanztheorie, in der die Kombinationstöne eine Rolle spielen, findet man bei Hermann von Helmholtz (1870). Verzerrungsprodukte, die aus den Nichtlinearitäten des Gehörs hervorgehen, sind zwar nicht die eigentliche Grundlage für seine Theorie, aber in jedem Fall notwendig, um die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen schlüssig zu erklären. Die Grundlage dieser Konsonanztheorie sind jedoch vielmehr Schwebungen und Rauigkeit, die bei Zusammenklängen von zwei oder mehreren Tönen bzw. Klängen entstehen können. Schwebungen, hervorgebracht durch Kombinationstöne, stellen in dieser Theorie nur eine Möglichkeit dar, um Dissonanz aufzuzeigen. Schwebungen und Rauigkeit können natürlich auch durch die Grundtöne zweier Klänge selbst, wenn sich diese in ihren Frequenzen zu nahe kommen, oder durch deren Obertöne entstehen. Die Kombinationstöne werden für die Konsonanztheorie von Helmholtz erst essentiell und rücken in den Vordergrund, wenn dieser versucht, die Dissonanz- und Konsonanzwahrnehmung von Sinustönen, zu erklären. Um in weiterer Folge die Rolle der Kombinationstöne in dieser Theorie verstehen zu können, wird vorerst auf die Konsonanztheorie von Hermann von Helmholtz im Allgemeinen näher eingegangen.

Wie bereits in einem vorangegangenen Absatz erklärt, bringen zwei Töne mit geringem Frequenzabstand zueinander Schwebungen oder Rauigkeit hervor. Aber es müssen sich nicht unbedingt die Grundtöne in ihrer Frequenz zu nahe kommen: Durch Obertöne oder Kombinationstöne können auch Schwebungen und Rauigkeit bei Intervallen entstehen, deren Grundtöne weiter voneinander entfernt sind als eine kleine Terz, die gerade noch innerhalb einer Frequenzgruppenbreite liegt.

Da die meisten Klänge mit einem deutlich ausgeprägten Obertonspektrum versehen sind und diese grundsätzlich stärker sind als die Kombinationstöne und somit auch in der musikalischen Praxis eine größere Rolle spielen (Helmholtz 1870, S. 284), wird die Konsonanztheorie von Hermann von Helmholtz im Allgemeinen vorerst anhand der Obertöne erklärt (folgendes nach Helmholtz 1870, S. 305-306): Wenn zwei Klänge, also Grundton und Obertöne, zusammenklingen, so können sich diese gegenseitig stören, was

sich in Form von Schwebungen oder Rauigkeit des Klanges äußert. In diesen Störungen, durch Schwebungen hervorgebracht, sieht Helmholtz den Ursprung der Dissonanzen. Bei bestimmten Zahlenverhältnissen (jenen der konsonanten Intervalle) zweier Frequenzen zueinander bilden sich jedoch entweder keine Schwebungen oder nur so schwache, dass sie den Zusammenklang nicht wesentlich stören und wir sie als konsonant empfinden. Anhand der koinzidierenden Obertöne, lassen sich die konsonanten Intervalle auch nach ihrem Wohlklang ordnen: Von den absoluten Konsonanzen spricht Helmholtz bei Oktave, Duodezime oder Doppeloktave, da bei diesen Intervallen der höhere Grundton mit einem Oberton des Tieferen zusammenfällt und dadurch keine neuen Obertöne hinzukommen, die dissonieren könnten, sondern nur die des Tieferen verstärkt werden. Führt man diese Ordnung der Konsonanzen, basierend auf dem Verschmelzungsgrad durch zusammenfallende Obertöne, fort, so folgen nun die vollkommenen Konsonanzen mit Quinte und Quarte, darauf die mittleren Konsonanzen mit großer Terz und großer Sexte, und schließlich die unvollkommenen Konsonanzen zu denen die kleine Terz und kleine Sexte zu zählen sind. Wie man in Abbildung 14 sehen kann, liegen die zusammenfallenden Obertöne zweier harmonischer Klänge umso niedriger, je einfacher das Zahlenverhältnis und je reiner die Konsonanz ist.



Abbildung 14: Konsonante Intervalle und deren koinzidierende Obertöne. Die Grundtöne sind als halbe Noten dargestellt (aus: Helmholtz 1870, S. 291).

Octave	Duodezime	Quinte	Quarte	Gr. Sexte	Gr. Terz	Kl. Terz.
1 : 2	1 : 3	2 : 3	3 : 4	3 : 5	4 : 5	5 : 6

Wirft man einen Blick auf die dissonanten Intervalle, so bringen bei der großen und kleinen Sekunde bereits die Grundtöne gemeinsam einen schwebenden oder rauen Ton hervor. Bei der großen und kleinen Septime erzeugt der höhere Grundton gemeinsam mit dem ersten Oberton des tieferen Intervalltons einen rauen Klangeindruck, worin nach Helmholtz der dissonante Charakter dieser Intervalle begründet ist. Weiters gilt der Tritonus zwischen Quinte und Quarte, erheblich gestört durch Schwebungen und Rauigkeit, als besonders scharfe Dissonanz (Helmholtz 1870, S. 300).

Wie in der Einleitung zur Konsonanztheorie von Helmholtz gezeigt, begründet Helmholtz das Wesen der Konsonanz darin, dass Schwebungen bei diesen Intervallen entweder ausbleiben oder nur in einem geringen Maße auftreten. Die Koinzidenz von Grundton und Oberton oder von Obertönen untereinander sind also nach Helmholtz die Ursache für das Wesen der Konsonanz. Eine andere Erklärung muss sich Helmholtz jedoch zurechtlegen, wenn dieser dem Konsonanz- und Dissonanzempfinden bei Intervallen mit Sinustönen näherkommen will. In diesem Fall spielt Koinzidenz und das Ausbleiben von Schwebungen und Rauigkeit zwar weiterhin die zentrale Rolle, jedoch muss er nun die Kombinationstöne heranziehen, sind doch schließlich keine Obertöne mehr vorhanden. In der Variante seiner Konsonanztheorie mit dem Kombinationstönen, sieht Hermann von Helmholtz sogar die ursprünglichste Form, da diese auf alle Zusammenklänge anwendbar ist und nicht nur auf jene mit Obertönen: „Die allgemeinste Ursache zur Erzeugung von Schwebungen geben die Combinationstöne; sie sind die einzige Ursache bei einfachen Tönen, die soweit oder weiter wie eine kleine Terz voneinander entfernt sind.“ (Helmholtz 1870, S. 319). Auf derselben Basis, dass die Kombinationstöne natürliche, vom Gehör selbst hervorgebrachte Klangerscheinungen sind und deshalb allgemeine Gültigkeit haben und auf alle Arten von Zusammenklängen anwendbar sind, entstehen alle Konsonanztheorien, die auf nichtlinearen Verzerrungen beruhen. Der universelle Charakter der nichtlinearen Verzerrungen wird von den Wissenschaftlern auf deren Konsonanztheorien übertragen.

Hermann von Helmholtz wählt zur Begründung für das Konsonanzempfinden bei Intervallen mit Sinustönen einen etwas anderen Weg, auch wenn dieser ebenfalls auf Schwebungen und Rauigkeit basiert: Grundsätzlich geht Helmholtz davon aus, dass der Wohlklang einer Konsonanz davon abhängt, wie stark sich ein rein gestimmtes Intervall von den benachbarten verstimmtten, unreinen bzw. dissonanten Intervallen abgrenzt. Wenn sich eine Abweichung von einem reinen Intervall, also eine Verstimmung, sehr deutlich durch Schwebungen äußert, so ist dieses Intervall sehr stark begrenzt, was laut Helmholtz einen direkten Schluss auf die Vollkommenheit der Konsonanz zulässt (Helmholtz 1870, S. 319). Die Begrenzungsfunktion für die Konsonanzen kommt in erster Linie dem Differenzton erster Ordnung zu, also dem quadratischen Differenzton, da dieser von Helmholtz als der stärkste angesehen wird, was unter vielen Bedingungen auch zutrifft. Schwebungen durch Kombinationstöne höherer Ordnung, wie beispielsweise dem kubischen Differenzton, sind erst ausschlaggebend in dieser Theorie, wenn sonst keine

Möglichkeiten mehr bestehen, um Schwebungen aufzuzeigen, da diese von Helmholtz als zu schwach angesehen werden (Helmholtz 1870, S. 310-311). Dabei lässt Helmholtz außer Acht, dass auch der kubische Differenzton unter gewissen Umständen zu durchaus beträchtlicher Lautstärke anwachsen kann und in bestimmten Situationen dem quadratischen ebenbürtig oder sogar überlegen ist.

Schwebungen durch Kombinationstöne, die die konsonanten Intervalle abgrenzen, können durch den quadratischen Differenzton in den meisten Fällen aber nur dann hervorgebracht werden, wenn man zu den Grundtönen die ersten Obertöne hinzunimmt oder wenn drei oder mehrere Sinustöne in einem Akkord zusammenklingen. Um jedoch bei nur zwei Sinustönen eine Schwebung aufzeigen zu können, müssen auch die Differenztöne höherer Ordnung miteinbezogen werden (Helmholtz 1870, S. 310-311). Nur die Oktave bildet eine Ausnahme:

Um die reine Oktave, dargeboten mit zwei Sinustönen, von ihren benachbarten verstimmten Intervallen mit Schwebungen abgrenzen zu können, braucht man weder zusätzliche Obertöne noch muss man einen dritten Sinuston zur Akkordbildung hinzunehmen. Hier bringt bereits der starke quadratische Differenzton bei Verstimmung eine Schwebung hervor. Als Beispiel wird die verstimmte Oktave mit 100 Hz und 201 Hz angenommen. Hier liegt der quadratische Differenzton bei 101 Hz ($201 \text{ Hz} - 100 \text{ Hz} = 101 \text{ Hz}$), welcher wiederum mit dem tieferen Primärton bei 100 Hz eine Schwebung hervorbringt. Die Oktave ist durch den starken quadratischen Differenzton von allen Intervallen am stärksten begrenzt und in ihrer Rolle als die vollkommenste Konsonanz bestätigt (Helmholtz 1870, S. 313).

Bei der Quinte hingegen reicht der Differenzton erster Ordnung alleine nicht aus, um eine Schwebung hervorzubringen und das reine Intervall vom verstimmten abzugrenzen. Anhand der verstimmten Quinte mit den Grundtonfrequenzen von 200 Hz und 301 Hz soll dies aufgezeigt werden und die weiteren Möglichkeiten, trotzdem eine Abgrenzung hervorzubringen, vorgestellt werden. Der quadratische Differenzton D_{11} mit 101 Hz liegt zu weit entfernt von den beiden Primärtonfrequenzen und kann daher keine Schwebung mit diesen hervorzubringen. Der Differenzton zweiter Ordnung D_{21} , hingegen liegt bei 99 Hz und erzeugt gemeinsam mit dem Differenzton erster Ordnung D_{11} bei 101 Hz eine Schwebung (Helmholtz 1870, S. 313). Wenn man zu diesen Grundtönen nur den jeweils ersten Oberton hinzunimmt, kann auch bei der Quinte eine Schwebung durch die von Helmholtz bevorzugten Differenztöne erster Ordnung erzeugt werden. Bei der verstimmten

Quinte mit 200 Hz und 301 Hz liegen die ersten Obertöne bei 400 Hz und 602 Hz. Hierbei sind alle Töne zu weit voneinander entfernt, als dass diese Schwebungen hervorbringen könnten. Aber der quadratische Differenzton der beiden Grundtöne bei 101 Hz schwebt gemeinsam mit dem quadratischen Differenzton der sich aus dem Oberton bei 400 Hz und den höheren Grundton bei 301 Hz bildet und bei 99 Hz liegt (Helmholtz 1870, S. 315) (siehe Abbildung 15). Die zweite Möglichkeit die Helmholtz vorschlägt, um die konsonanten Intervalle durch Schwebungen der Differenztöne erster Ordnung abzugrenzen, ist zu den Intervall-Sinustönen einen weiteren Sinuston hinzuzunehmen und einen Akkord zu bilden. Wenn man also eine reine Oktave mit 200 Hz und 400 Hz nimmt und dazwischen den Ton 301 Hz der verstimmten Quinte einfügt, so erhält man wiederum die quadratischen Differenztöne bei 101 Hz und 99 Hz, die miteinander schweben (Helmholtz 1870, S. 318). Aus diesen Möglichkeiten schließt Helmholtz, dass auch die Quinte sehr stark begrenzt ist und deshalb als sehr konsonant empfunden wird.

		Theiltöne der Quinte			
		301	602	903	
Theiltöne des Grundtones	200	101	402	703	Combinationstöne
	400	99	202	503	
	600	299	2	303	
	800	499	198	103	
	1000	699	398	97	

Abbildung 15: Teiltöne und Differenztöne erster Ordnung der verstimmten Quinte mit den Grundtonfrequenzen 200 Hz und 301 Hz (aus: Helmholtz 1870, S. 311).

Wie bereits angesprochen ist eine Konsonanz laut der Theorie von Helmholtz umso wohlklingender, je stärker diese sich vom verstimmtten Intervall durch Schwebungen abgrenzt. Für die Quarte lassen sich diese Schwebungen noch etwas schwerer finden als für die Quinte: Wenn man nur zwei Sinustöne im verstimmtten Intervall verwendet, braucht man bereits den Differenzton dritter Ordnung. Bei der verstimmtten Quarte mit 300 Hz und 401 Hz ist dies jener Differenzton, der sich aus dem kubischen Differenzton bei 199 Hz und dem höheren Primärton bei 401 Hz bilden lässt und bei 202 Hz liegt. Somit schweben der Differenzton zweiter Ordnung mit 199 Hz und der Differenzton dritter Ordnung mit 202 Hz. Aber wenn man nur die jeweils ersten Obertöne hinzufügt, so entstehen bei der verstimmtten Quarte bereits wieder Schwebungen, hervorgebracht durch den Differenzton

erster Ordnung, was uns dieses Intervall, dem Wohlklang zufolge, direkt nach der Quinte einreihen lässt (Helmholtz 1870, S. 314-315).

Um Schwebungen bei der verstimmten großen Terz hervorzurufen und somit dieses Intervall abzugrenzen, sind Differenztöne noch höherer Ordnung notwendig, welche aber nur mehr äußerst schwer wahrzunehmen sind (Helmholtz 1870, S. 314). Auch wenn man nur die ersten Obertöne hinzunimmt bringen die starken quadratischen Differenztöne noch keine Schwebungen hervor, sondern erst die kubischen. Um also auch bei den übrigen konsonanten Intervallen, also den Terzen und Sexten, noch Schwebungen durch die quadratischen Differenztöne hervorzubringen, die diese von den verstimmten Intervallen abgrenzen, so braucht man schon die jeweiligen ersten zwei Obertöne oder muss einen weiteren Sinuston hinzunehmen. Aus dieser weniger deutlichen Abgrenzung ergibt sich auch der geringere Wohlklang dieser Konsonanzen, gegenüber Oktave, Quinte oder Quarte (Helmholtz 1870, S. 316-317).

Felix Krüger folgt der Schwebungstheorie von Helmholtz und liefert auch einen experimentellen Beweis dafür, dass die Schwebungen der verstimmten Konsonanzen auch durch die Kombinationstöne entstehen können (folgendes nach Krüger 1901, S. 227-229): Wie schon Helmholtz beschrieben hat, koinzidieren bei den konsonanten Intervallen mindestens zwei Obertöne, was die Schwebungen bei leichter Verstimmung erklärt. Mit einem Interferenzapparat gelingt es Krüger die Obertöne von Stimmgabeln auszuschalten oder zumindest sehr stark abzuschwächen. Die dann noch gehörten deutlichen Schwebungen lassen sich auch aufgrund ihrer Lage nur noch auf die Kombinationstöne zurückführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gesamte Theorie von Helmholtz auf Schwebungen beruht, die entweder durch die Grundtöne selbst, deren Obertöne oder aber auch durch deren Kombinationstöne hervorgerufen werden. Die Kombinationstöne, im Speziellen der quadratische und der tiefere kubische Differenzton, spielen erst bei der Erklärung des Konsonanzempfindens bei Sinustönen die zentrale Rolle. Schließlich hat man bei obertonlosen Tönen auch keine andere Möglichkeit, um Koinzidenz bzw. Schwebungen aufzuzeigen. Helmholtz verfolgt seine Schwebungstheorie so konsequent, dass er immer kreativere Wege suchen muss, um die Schwebungen, die die verstimmten von den konsonanten Intervallen abgrenzen, auch finden zu können. Dass die Schwebungen von verstimmten Terzen und Sexten, wenn diese als Sinustöne dargeboten werden, durch die Differenztöne erster und zweiter Ordnung gar nicht mehr hervorgebracht

werden können, mag in mancher Hinsicht nach Erklärungsnot aussehen. Schließlich kann Helmholtz das Konsonanzempfinden bei diesen Intervallen nicht allein anhand der Kombinationstöne aufklären. Dass dafür entweder die ersten Obertöne oder ein weiterer Sinuston herangezogen werden muss, sieht Helmholtz jedoch nur als Begründung für den schwächeren Grad des Wohlklanges dieser Intervalle.

Weiters kann die Theorie von Helmholtz dadurch in Frage gestellt werden, dass auch bei binauraler Darbietung, wo Schwebungen und Rauigkeit nicht entstehen können, das Konsonanzempfinden unter gewissen Umständen erhalten bleibt (Husmann 1953, S. 36). Helmholtz geht auch, wie Hindemith und Husmann, stets von starren stationären Tönen aus und bedenkt nicht, dass diese Voraussetzungen in der musikalischen Praxis meist nicht gegeben sind und dass durch natürliche Schwankungserscheinungen in der Tonerzeugung die Ausbildung von Schwebungen und Kombinationstönen verhindert werden kann (Fricke 2009, S. 97). Auf diese und weitere Kritikpunkte an der Störungstheorie von Hermann von Helmholtz wird aber im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

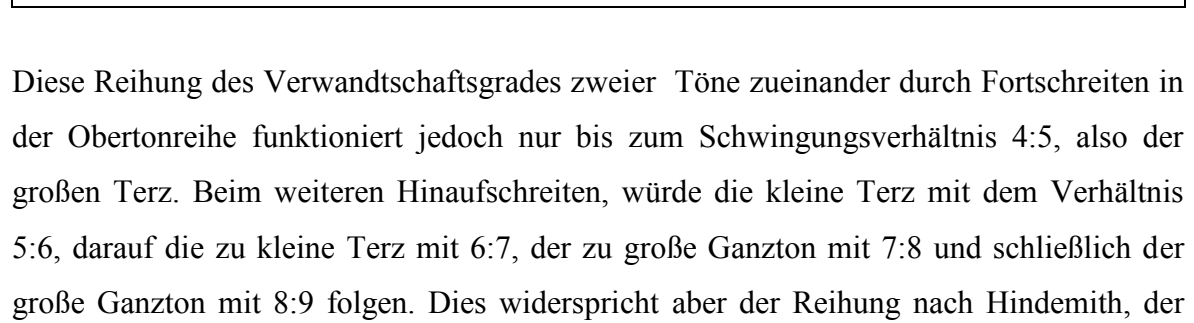
5.2 Konsonanztheorie nach Paul Hindemith

Ein weiterer Theoretiker, der versucht eine Erklärung für das Konsonanzempfinden bei bestimmten Schwingungsverhältnissen zu finden und dafür auch die Kombinationstöne miteinbezieht, ist Paul Hindemith. Vorerst erklärt sich jedoch auch Hindemith den Verwandtschaftsgrad zweier Töne durch deren Obertöne und die Kombinationstöne rücken erst später ins Zentrum seiner Theorie, um eine vollständige Erklärung liefern zu können.

Wiederum soll vorerst, der Vollständigkeit halber und um aufzuzeigen, dass auch Hindemith die Obertöne als ebenso wichtig wie die nichtlinearen Verzerrungsprodukte erachtet, die Rolle der Obertöne in der Theorie von Hindemith untersucht werden. Die Koinzidenz, also das Zusammenfallen von Obertönen, und im Weiteren auch der Kombinationstöne mit den Primärtönen oder untereinander, spielt auch bei Hindemith die zentrale Rolle und so sind anfangs sogar Übereinstimmungen zur Konsonanztheorie von Helmholtz zu finden: Die Obertöne des höheren harmonischen Klanges der Oktave verschmelzen vollständig mit jenen des tieferen und verdoppeln diese. Dies ist bei der Quinte nicht mehr der Fall, wodurch dieses Intervall weniger wohlklingend

Schwingungszahlen	64	128	192	256	320	384	448	512	576	640	704	768	832	896	960	1024	
Ordnungszahlen der Obertöne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Saitenlängen (C=1)	1	1/2	2/3	1/4	5/8	1/6	1/7	1/8	9/10	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15	1/16	

Abbildung 16: Obertonreihe mit C als Grundton (aus: Hindemith 1940, S. 34).



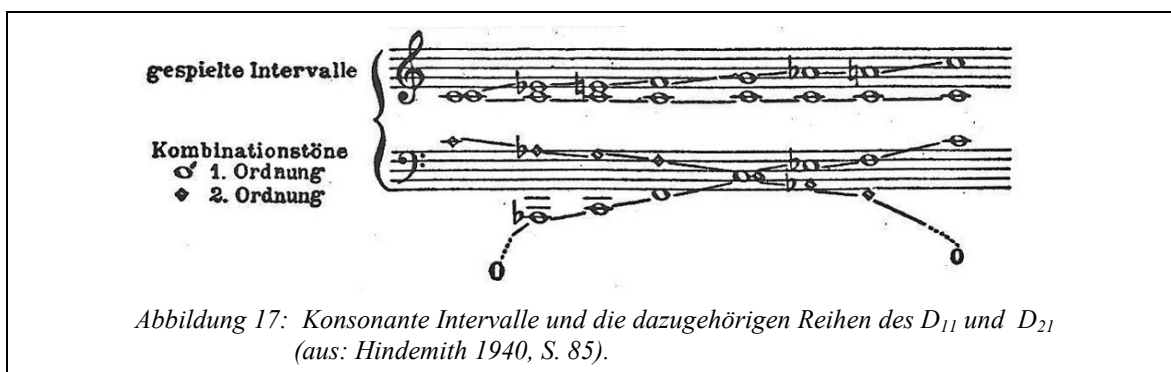
zufolge die große Sexte mit dem Schwingungsverhältnis 3:5 auf die große Terz folgt (Hindemith 1940, S. 77-78). Die Regel des obertonweisen Aufwärtssteigens ist damit unterbrochen und kann nicht herangezogen werden, um die vollständige Reihung der Intervalle nach dem Verwandtschaftsgrad der beiden Töne zu erklären. Die Reihe 1 liefert demzufolge nur Aufschluss über das Verhältnis jedes Tones zu einem Grundton, was für die Musiktheorie zwar von großer Bedeutung ist, aber für die Aufstellung einer schlüssigen Konsonanztheorie nicht ausreicht.

Zu diesem Zweck führt Hindemith die *Reihe 2* mit anderer Basis ein, in welcher nun die Kombinationstöne die zentrale Rolle einnehmen. Unter der Reihe 2 versteht er die tatsächliche Reihung der Intervalle nach dem Verwandtschaftsgrad der beteiligten Intervalltöne zueinander (Hindemith 1940, S. 80). Es ist also auch in dieser Konsonanztheorie, ähnlich jener von Helmholtz, festzustellen, dass die Kombinationstöne erst in den Mittelpunkt rücken, wenn die Obertöne nicht mehr ausreichen, um eine plausible Erklärung zu liefern. Hindemith wählt zwar einen anderen Ansatz als Helmholtz und nimmt die natürliche Obertonreihe anstatt der Koinzidenz von Obertönen als Grundlage seiner Theorie, muss aber schlussendlich eine neue Reihung auf Basis der Kombinationstöne wählen, um eine vollständige und der Realität entsprechende Wertung der Intervalle vornehmen zu können, was nun genauer betrachtet werden soll:

Hindemith sieht die Kombinationstöne bis zum Entstehen seiner Theorie als nicht ausreichend in die Musiktheorie miteinbezogen, auch wenn diese in der Konsonanztheorie von Helmholtz bereits eine wichtige Grundlage bilden: „Obwohl die Natur der Kombinationstöne seit langem bekannt ist, sind sie von der Musiktheorie niemals in einem Maße, das ihrer Bedeutung entspricht, zur Erklärung von Materialeigenheiten und Satzvorschriften herangezogen worden.“ (Hindemith 1940, S. 81). Hindemith schreibt zwar, dass die Kombinationstöne eher schwach sind und doch eine gewisse Aufmerksamkeit der Hörer benötigen, um bewusst wahrgenommen zu werden, betont aber auch, dass diese in der unbewussten Wahrnehmung eine wichtige Rolle für die Bewertung eines Intervalls einnehmen: „Sie sind der trigonometrische Punkt außerhalb des klingenden Intervalls, mit dessen Hilfe das Ohr eine Art Dreiecksmessung vollzieht und dadurch ein Urteil über den Reinheitsgrad des Intervalls erhält.“ (Hindemith 1940, S. 81). Er stellt sich also vor, dass das Gehör unbewusst die Lage der Kombinationstöne mit jener der tatsächlich erklingenden Intervallgrundtönen abgleicht und erst dadurch eine Bewertung eines Zusammenklangs ermöglicht wird. Für seine theoretischen Überlegungen zieht auch

Hindemith nur den quadratischen Differenzton (D_{11}) und den kubischen Differenzton (D_{21}) heran. Diese werden von ihm jedoch meist nicht explizit Differenztöne genannt, sondern pauschal als Kombinationstöne erster und zweiter Ordnung bezeichnet (Hindemith 1940, S. 85), obwohl unter diesen Begriffen eigentlich auch die Summationstöne S_{11} , S_{21} und S_{12} sowie der schwächere kubische Differenzton D_{12} verstanden werden müssten. Nach Hindemith können zwar die Differenztöne bis zur sechsten Ordnung hörbar sein, jedoch sind Kombinationstöne höherer Ordnung für das Gehör aufgrund ihrer geringen Lautstärke und der Tatsache, dass meist nur Oktavverdopplungen früher erzeugter Kombinationstöne auftreten, nicht mehr bedeutend (Hindemith 1940, S. 84).

In Abbildung 17 ist der Tonhöhenverlauf der Differenztöne erster und zweiter Ordnung bei größer werdenden Intervallen in Noten dargestellt (folgendes nach Hindemith 1940, S. 83-85): Bei den gespielten Intervallen, wird der tiefere Ton konstant auf dem c' gehalten und der höhere Intervallton stetig nach oben bis zum c'' geführt, wobei die konsonanten Intervalle als Stationen mit Noten eingezeichnet sind. Die aufsteigende Reihe der Kombinationstöne, dargestellt in ganzen Noten, repräsentiert den Differenzton erster Ordnung. Dieser entspringt beim Einklang aus dem Nichts bzw. aus unendlicher Tiefe. Bei der Quinte $c' - g'$, mit den Frequenzen 256 Hz und 384 Hz, liegt der Differenzton D_{11} bei 128 Hz, was dem c entspricht. Die aufsteigende Reihe des quadratischen Differenztons endet schließlich bei der Oktave im c' , was dem tieferen Intervallton entspricht. Die absteigende Reihe hingegen zeigt den Differenzton zweiter Ordnung, also den kubischen Differenzton D_{21} . Diese Reihe beginnt auf dem c , indem der Differenzton mit den Intervalltönen des Einklangs zusammenfällt. Bei der Quarte $c' - f'$ fällt der Differenzton auf das f und bei der Quinte $c' - g'$ trifft sich dieser mit der ersten Reihe auf dem c . Von da an fällt die Reihe des Differenztons zweiter Ordnung weiter stetig ab, bis sie schließlich im Nichts bzw. in unendlicher Tiefe beim Zusammenklang der Oktave endet.



Um nun eine Reihung der Intervalle von konsonant nach dissonant im Sinne der Reihe 2 nach Hindemith vornehmen zu können, treten die eben beschriebenen Kombinationstonreihen erster und zweiter Ordnung in den Vordergrund. Die Kombinationstöne werden als Belastung oder Trübung der Intervalle wahrgenommen, wobei je nach Lage des kubischen und quadratischen Differenztones diese unterschiedlich stark ist.

Für die Klarheit eines Intervalls spielen weitere Punkte, laut Hindemith, eine wesentliche Rolle (folgendes nach Hindemith 1940, S. 89-91): Grundsätzlich haben tiefere Töne immer auch höheres klangliches Gewicht. Das gilt sowohl für die Primärtöne als auch für die Kombinationstöne, was, wie bereits in einem früheren Kapitel erwähnt, in der Verdeckung begründet ist. Weiters übertrifft der Differenzton erster Ordnung auch in den Vorstellungen Hindemiths in den meisten Situationen jenen zweiter Ordnung in seiner Klangstärke. Ein Intervall wirkt stabiler, wenn diese Grundlagen zusammenfallen und dadurch kein verwirrender Klangeindruck erzeugt wird. Wenn als Beispiel der tiefere Primärton eines Intervalls durch die Kombinationstöne verdoppelt wird, so wird der gewichtmäßig bevorzugte tiefere Ton als Grundton von den Differenztönen bestätigt, was sich positiv auf den Klangeindruck auswirkt. Auch werden Intervalle als klarer empfunden, wenn der tiefer liegende Differenzton sein klangliches Gewicht dadurch bestätigt bekommt, dass dieser der meist stärkere quadratische Differenzton ist.

Diese Voraussetzungen werden in der Begründung für die Reihung der konsonanten Intervalle deutlich (folgendes nach Hindemith 1940, S. 86-87): Wenn man den Einklang und die Oktave betrachtet, so sind diese beiden Intervalle gar nicht belastet. Beim Einklang liegt der Differenzton erster Ordnung in unendlicher Tiefe und ist nicht wahrnehmbar, weshalb dieser das Intervall auch nicht zu trüben vermag. Der Differenzton zweiter Ordnung fällt mit den gespielten Intervalltönen, also den Primärtönen zusammen und wird daher auch nicht als Belastung wahrgenommen. Ähnlich verhält es sich bei der Oktave: Bei diesem Zusammenklang fällt der quadratische Differenzton mit dem tieferen Primärton des Intervalls zusammen und der kubische Differenzton ist noch nicht hörbar, weshalb auch die Oktave als unbelastet bezeichnet werden kann (siehe Abbildung 17). Auf die ungetrübten Intervalle Oktave und Einklang folgt in der Reihung der konsonanten Intervalle von Hindemith, wie auch bei allen anderen hier behandelten Theoretikern, die Quinte. Der eindeutige Konsonanzcharakter ergibt sich aus der sehr geringen Belastung des Intervalls durch die Kombinationstöne. In Abbildung 18 ist die Quinte $c' - g'$ mit den

dazugehörigen Differenztönen, welche auf dem c zusammenfallen, dargestellt. Eine äußerst kleine Last ergibt sich nur daraus, dass die Differenztöne nicht mit einem der gespielten intervalleigenen Tön zusammenfallen, sondern eine Oktave tiefer einen Intervallton verdoppeln. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Quarte: Auch bei diesem Intervall wird einer der Primärtöne, in diesem Fall der höhere, wiederholt. Nimmt man als Beispiel die Quarte $c' - f'$, wie das auch in Abbildung 18 zu finden ist, so liegt der Differenzton erster Ordnung auf dem F , jener zweiter Ordnung eine Oktave höher auf dem f . Es kommt also auch hier zu einer Wiederholung eines intervalleigenen Tones, jedoch in zwei verschiedenen Oktaven, was dazu führt, dass die Quarte etwas stärker belastet wirkt als die Quinte. Aus diesem Grund ist auch die Quarte der Quinte in der Reihung der konsonanten Intervalle nachzustellen.

Weiters wird bei der Quinte der tiefere und somit stärkere Primärton des Intervalls von den Differenztönen als Grundton bestätigt, was zur großen Stabilität des Zusammenklangs beiträgt. Die Differenztöne der Quarte hingegen wiederholen den höheren Ton des gespielten Intervalls, wodurch dieser die Grundtonrolle übernimmt und ein labilerer Klangeindruck entsteht: „In der Quarte wird der obere Ton verstärkt, seine Grundtonwirkung fällt also nicht mit dem gewichtmäßig bevorzugten unteren Tone zusammen.“ (Hindemith 1940, S. 91).



Abbildung 18: Quinte und Quarte mit den dazugehörigen Differenztönen erster und zweiter Ordnung (aus: Hindemith 1940, S. 87).

Wie Quinte und Quarte bilden auch große Terz und kleine Sexte, sowie kleine Terz und große Sexte Intervallpaare, die sich zur Oktave ergänzen. Diese Umkehrbarkeit zeigt sich für Hindemith unmissverständlich in den Kombinationstönen. Sowohl bei der großen Terz, als auch bei der kleinen Sexte, wird ein intervalleigener Ton in einer tieferen Lage wiederholt und ein neuer, intervallfremder Ton eingeführt (folgendes nach Hindemith 1940, S. 88-89): Bei der großen Terz $c' - e'$ fällt der Differenzton erster Ordnung auf das C , der Differenzton zweiter Ordnung auf das g . Der intervalleigene Ton wird bei der kleinen Sexte $c' - as'$ vom Differenzton zweiter Ordnung verdoppelt und liegt auf dem As , während der Differenzton erster Ordnung das intervallfremde es einführt (siehe Abbildung 19). Transponiert man nun die kleine Sexte nach $e' - c''$, sodass sich diese mit

der großen Terz $c' - e'$ zur Oktav ergänzt, so wird man feststellen, dass diese Intervalle den gleichen, nur in der Lage verschiedenen, Differenztonbestand mit sich führen. Darin sieht Hindemith einen rein akustischen Beweis für die Umkehrbarkeit von Intervallen, welche auf die Terz-Sext- und Sekund-Septim-Paare zutrifft. Warum aber trotz dieser Ähnlichkeiten die Terzen und Sekunden stets den Sexten und Septimen überlegen sind, liegt in der größeren Stabilität und Klarheit dieser Intervall. Am Beispiel der großen Terz ergibt sich die Stabilität daraus, dass der quadratische Differenzton, der von Hindemith stets als stärkerer Differenzton bezeichnet wird, den intervalleigenen Ton wiederholt und dieser durch die tiefere Lage gegenüber dem kubische Differenzton in seiner klanglichen Überlegenheit bestätigt wird. Bei der kleinen Sexte hingegen wird zwar der intervalleigene Ton durch den tieferen Differenzton wiederholt, jedoch fehlt diesem die Bestätigung seiner Klangstärke, handelt es sich doch nur um den kubischen Differenzton, der von Hindemith stets als schwächer bezeichnet wird.

Weiters wird bei der großen Terz der tiefere Intervallton, aufgrund der Wiederholung durch einen der Differenztöne als Grundton bestätigt, während bei der kleinen Sexte der höhere Ton durch Wiederholung zum Grundton wird, was den Zusammenklang labiler werden lässt (Hindemith 1940, S. 91). Das eben angesprochene klarere Klangbild, in dem der stärkere Differenzton auch zugleich die tiefste Lage einnimmt, trifft bei den komplementären Intervallpaaren immer auf die Terzen und Sekunden zu. Wie man in Abbildung 19 sehen kann, liegt auch bei der kleinen Terz $c' - es'$ der Differenzton erster Ordnung am tiefsten, während dieses klarere Klangbild auf die große Sexte $c' - a'$ nicht zutrifft. Bei beiden Intervallen fallen die Differenztöne aber mit keinem der intervalleigenen Töne zusammen, wodurch diese auch stärker belastet sind als die große Terz und kleine Sexte und diesen in der Reihung der konsonanten Intervalle nachzustellen sind. Stattdessen wird ein neuer Ton eingeführt, der in zwei Oktaven erklingt: Der kubische Differenzton der kleinen Terz $c' - es'$ führt den neuen Ton as ein, welcher vom quadratischen Differenzton zwei Oktaven tiefer wiederholt wird. Zur großen Sexte $c' - a'$ kommen die Differenztöne f und F .

Mit den intervallfremden Tönen lassen sich nun, gemeinsam mit den Primärtönen Dur-Dreiklänge bilden, wobei sich die Grundtonfrage bei kleiner Terz und großer Sexte etwas schwieriger gestaltet. Der Grundton dieser Akkorde wird nämlich nur von den Kombinationstönen gebildet und ist im Intervall selbst gar nicht enthalten, was doch zu einigen Unstimmigkeiten mit den praktischen Erfahrungen im Tonsatz führt. Hindemith

lässt schließlich zumindest für die kleine Terz zur Vereinfachung den tieferen Primärton als Grundton gelten (Hindemith 1940, S. 92).



Abbildung 19: Terzen und Sexten mit den dazugehörigen Differenztönen erster und zweiter Ordnung (aus: Hindemith 1940, S. 87).

Viel unklarer als bei den Konsonanzen verhalten sich die Differenztöne der dissonanten Intervalle, also der Sekunden, Septimen und des Tritonus. Das größte Problem liegt wohl darin, dass diese Intervalle in unterschiedlichen Größen vorkommen und, je nachdem für welches Frequenzverhältnis man sich entscheidet, die Kombinationstöne eine andere Position einnehmen. Am Beispiel der großen Sekunden, wie sie in der Obertonreihe vorkommen, zeigt sich sehr deutlich, welch große Folgen schon eine geringe Änderung der Intervallgröße für die Lage der Differenztöne hat (siehe Abbildung 20). Weder vermögen die Differenztöne der großen Sekunden bzw. kleinen Septimen einen der Intervalltöne als Grundton zu bestätigen, noch schaffen sie es gemeinsam mit den Primärtönen einen klaren Klangeindruck zu erzeugen bzw. in einem sinnvollen, konsonanten Verhältnis zu diesen zu stehen. Noch unklarer fällt die Anordnung der Differenztöne erster und zweiter Ordnung bei kleiner Sekunde und großer Septime aus (Hindemith 1940, S. 102-103).

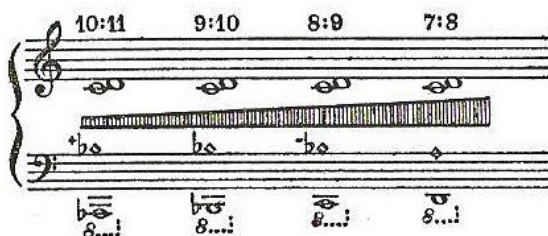


Abbildung 20: Differenztönen erster und zweiter Ordnung des Ganztones bei unterschiedlichen Schwingungsverhältnissen (aus: Hindemith 1940, S. 103).

Zur Vervollständigung der Reihe 2 fehlt Hindemith nur noch der Tritonus, welcher das Gegenstück zur Oktave am anderen Ende der Reihe bildet (folgendes nach Hindemith 1940, S. 105): Ähnlich wie bei den anderen dissonanten Intervallen, lässt sich auch beim

Tritonus kein Grundton auf Basis der Differenztöne ausmachen. In seinen unterschiedlichen Frequenzverhältnissen liegen auch die Differenztöne jeweils anders, was anhand seiner engsten (5:7) und weitesten (7:10) Form in Abbildung 21 gezeigt wird. In der engsten Variante verbindet sich der Quintklang der Differenztöne mit den Primärtönen zum Septakkord *As-c'-es-ges'*, in welchem der höhere Intervallton die zu tiefe Septime bildet. In der weitesten Variante hingegen bilden die Differenztöne, diesmal im Abstand einer Quarte zueinander, gemeinsam mit den Primärtönen den Septakkord *d-fis'-A-c'*. Auch in allen anderen Frequenzverhältnissen des Tritonus bilden die Primärtöne gemeinsam mit dem quadratischen Differenzton D_{11} und den kubischen Differenzton D_{21} immer einen Septakkord, worin Hindemith die Begründung für die Dominanzwirkung und Auflösungsbedürftigkeit dieses Intervalls sieht.



Abbildung 21: Engster (5:7) und weitester (7:10) Tritonus mit dazugehörigen Differenztönen erster und zweiter Ordnung (aus: Hindemith 1940, S. 105).

Obwohl Hindemith seine endgültige Erklärung für die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen in den nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs sieht, betont er doch mehrmals die Bedeutung der Obertöne, sind doch gerade sie in der praktischen Musikausübung äußerst wichtig und unter den meisten Umständen auch stärker vertreten als die Kombinationstöne: „Ein gänzlich obertonloser Ton ist ausdruckslos, ohne Profil und Eigenkraft. Er ist mit unseren Musikinstrumenten nicht darstellbar.“ (Hindemith 1940, S. 33). Dass trotz der Fundierung dieser Theorien auf den Kombinationstönen den Obertönen immer sehr große Bedeutung zugesprochen wird, kann man bei allen Theoretikern, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, beobachten, was von einer bestimmten Unsicherheit zeugt. Auch wenn sich die Konsonanzen und deren Reihung nach Verwandtschaftsgrad der Intervalltöne theoretisch sehr gut mit den Kombinationstönen erklären lassen, so scheinen sich diese Wissenschaftler doch der möglichen Kritik, dass diese in der musikalischen Praxis keine so erhebliche Rolle spielen wie die Obertöne, doch bewusst zu sein.

5.3 Konsonanztheorie nach Heinrich Husmann

Ein weiterer Wissenschaftler, der seine Theorie zum Konsonanzempfinden zu einem großen Teil auf der Basis der Kombinationstöne und Ohrpartialtöne aufbaut, ist Heinrich Husmann (1953). Husmann liefert auch mit Sicherheit die umfassendste Theorie zu den nichtlinearen Verzerrungsprodukten und deren Einfluss auf die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Zusammenklängen. Im Gegensatz zu Helmholtz und Hindemith, betont Husmann neben den Differenztönen erster und zweiter Ordnung auch mehrmals die Bedeutung der Differenztöne höherer Ordnung, der Summationstönen und der Ohrpartialtönen, welche zwar meist viel schwächer ausfallen, aber trotzdem den Klangeindruck beeinflussen können. Weiters ist Husmann der Erste dieser drei Wissenschaftler, der nicht nur ein theoretisches Konstrukt auf Basis der Kombinationstöne aufbaut, sondern auch versucht seine Theorie mit Versuchen zu untermauern. Husmann schafft mit seinen Studien, wenn auch nicht ganz vollständig und gänzlich aufschlussreich, einen guten Ausgangspunkt bzw. eine interessante Grundlage für weiterführende Untersuchungen.

Interessant ist vorab, dass bei Husmann die Reihung der konsonanten Intervalle hin zu den Dissonanzen von jenen der anderen beiden Theoretikern leicht abweicht: Als Konsonanzen sieht dieser die Oktave (1:2), die Quinte (2:3), die Quarte (3:4), sowie die große Terz (4:5) und die kleine Terz (5:6). Darauf folgen dann jene Intervalle, die nach Husmann einen neutralen Charakter besitzen (Sexten), bevor mit dem Ganzton und dessen Schwingungsverhältnis von 8:9 die Dissonanzen beginnen (Husmann 1953, S. 21). Die größten Diskrepanzen zwischen den drei Wissenschaftlern gibt es wohl bei der Einstufung der Terzen und Sexten: Helmholtz bezeichnet, wie bereits erwähnt, große Terz und große Sexte als mittlere Konsonanzen, kleine Terz und kleine Sexte als unvollkommene Konsonanzen (Helmholtz 1870, S. 306). Auch Hindemith reiht eine der bei Husmann neutralen Sexten (die kleine Sexte) noch vor die kleine Terz (Hindemith 1940, S. 88-89). Diese Unterschiede sind wohl auf die unterschiedlichen Herangehensweisen von Helmholtz, Hindemith und Husmann zurückzuführen. Alle Theorien sehen zwar nichtlineare Verzerrungsprodukte als Grundlage für die Ausnahmestellung und Reihung der Konsonanzen, jedoch wählt jeder einen anderen Weg, um diese zu erklären.

Weiters haben die unterschiedlichen Theoretiker auch verschiedene Vorstellungen davon, was man unter Konsonanz versteht. Um der Theorie Husmanns zur Konsonanz folgen zu können, wird vorab der Konsonanzbegriff nach seinen Vorstellungen erklärt (folgendes nach Husmann 1952, S. 220): Eine Konsonanz definiert sich nach Heinrich Husmann nicht durch ihren Wohlklang, sondern schlicht und einfach durch das Zahlenverhältnis zweier Schwingungen zueinander. Damit warnt Husmann davor, eine Erscheinung durch ihre Wirkung zu definieren und greift stattdessen auf jene Definition der Konsonanz zurück, die bereits in der Antike zu finden ist.

Durch diese Erklärung wird auch die leicht abgeänderte Reihung der Konsonanzen gegenüber jenen von Helmholtz und Hindemith nachvollziehbar. Definiert man die Konsonanz rein durch die Einfachheit des Schwingungsverhältnisses, so ergibt sich die Reihung von Husmann, nach der große Terz und kleine Terz vor die große Sexte und kleine Sexte zu stellen sind.

5.3.1 Kombinationstöne und Konsonanz

Die Kernaussage von Husmann besteht nun darin, dass die konsonanten Intervalle, gebildet aus zwei Sinustönen, mit ihren Kombinations- und Ohrobertönen, eine regelmäßige und harmonische Reihe bilden, die einem Einzelton mit harmonischen Obertönen aus den ganzzahligen Vielfachen des Grundtons weitestgehend entspricht. Jedoch wird der Grundton der meisten konsonanten Intervalle nicht von einem der starken Primärtöne, sondern vom Differenzton, der die tiefste Lage einnimmt, gebildet. Dass heißt, dass die harmonische Reihe von Sinustonintervallen in ihrem Aufbau einem Einzelton entsprechen „[...] von dem sie sich nur durch das Stärkeverhältnis der einzelnen Teiltöne untereinander unterscheiden. Sie verschmelzen daher in hohem Grade einzeltonähnlich zu einem einheitlichen Klang.“ (Husmann 1953, S. 23).

Eine Ausnahmestellung nimmt dabei die Oktave ein (folgendes nach Husmann 1953, S. 21): Die Oktave ist das einzige Intervall bei dem der tiefere Primärton zugleich auch der Grundton der harmonischen Reihe ist, die durch die Kombinations- und Ohrpartialtöne gebildet wird. Somit entsprechen bei der Oktave die Kräfteverhältnisse in der harmonischen Reihe einem Einzelton mit harmonischen Aufbau weitestgehend, was dazu führt, dass sich die Oktave von den restlichen Intervallen abhebt. Nur der zweite Ton der

Reihe (erster Oberton), welcher auch von einem Primärton gebildet wird, fällt etwas stärker aus als in den meisten harmonischen Klängen. Aus welchen Verzerrungsprodukten sich diese Reihe nun zusammensetzt und wo die jeweiligen Kombinationstöne liegen, ist in Abbildung 22 zu sehen und soll nun genauer beschrieben werden: Wie bereits angesprochen, fällt bei der Oktave, mit dem Schwingungsverhältnis 1:2, der quadratische Differenzton D_{11} mit dem tieferen Primärton zusammen. Berechnet man die Kombinationstöne mit den Zahlen des Schwingungsverhältnisses, so lässt sich leicht eine harmonische Reihe aufzeigen: D_{11} ($|1 - 2| = 1$) fällt, wie auch einige Differenztöne höherer Ordnung, zum Beispiel D_{31} ($3 - 2 = 1$), mit dem Grundton dieser Reihe zusammen. Der kubische Differenzton D_{21} ($2 - 2 = 0$) sowie der Differenzton D_{42} ($4 - 4 = 0$) sind nicht hörbar, während D_{22} ($|2 - 4| = 2$) sowie D_{41} ($4 - 2 = 2$) mit dem höheren Primärton zusammenfallen. D_{12} ($|1 - 4| = 3$) und D_{23} ($|2 - 6| = 4$) liegen über den Primärtönen und fallen an diesen Positionen mit Summationstönen und Ohrobertönen zusammen. Die Ohrpartialtöne des tieferen (2, 3, 4, ...) und des höheren Primärtons (4, 6, 8, ...), sowie die Summationstöne und Differenztöne fallen bei der Oktave also auf die harmonischen Vielfachen eines virtuellen Grundtons und bilden eine lückenlose Reihe, wie diese auch bei einem Einzelton mit harmonischem Spektrum zu finden ist.

1	2	3	4	...
PT , D_{11} , D_{31} , D_{32}	PT , D_{22} , D_{41}	S_{11} , D_{12}	S_{21} , D_{23}	...

Abbildung 22: Harmonische Reihe einer Oktave vom 1. bis zum 4. „Teilton“, gebildet aus den beiden Primärtönen und den Kombinationstönen. Den „Grundton“ bildet der tiefere Primärton.

Als Beispiel für die anderen Konsonanzen soll nun auch noch die große Terz genauer betrachtet werden (folgendes nach Husmann 1953, S. 22): Diese weist ein Schwingungsverhältnis von 4:5 auf und somit liegen auch die Primärtöne in der harmonischen Reihe, die sich aus den Verzerrungsprodukten ergibt, an vierter und fünfter Stelle. Der Grundton dieser Reihe wird bei der großen Terz von dem meist sehr starken quadratischen Differenzton D_{11} ($|4 - 5| = 1$) gebildet, was der Einzeltonähnlichkeit bei Intervallen mit Sinustönen sicher zugutekommt. Auch der Differenzton höherer Ordnung D_{43} fällt auf die Grundtonposition und verstärkt diese. Der kubische Differenzton D_{21} liegt

ebenfalls tiefer als die beiden Primärtöne und bildet gemeinsam mit D_{33} ($|12 - 15| = 3$) den dritten Ton der Reihe. Der zweite Ton wird von den Differenztönen D_{32} ($12 - 10 = 2$) und D_{22} ($|8 - 10| = 2$) gebildet. Auch über den Primärtönen sind noch Differenztöne (D_{12} , D_{43} , D_{31} , ...) zu finden (siehe Abbildung 23). Gemeinsam mit den Summations- und Ohrpartialtönen, die sich auch in diese Reihe einfügen und sich gegenseitig oder Differenztöne an der selben Position verstärken, lässt sich eine beinahe lückenlose Reihe bis zum dreißigsten Ton fortführen, wenn man Kombinationstöne bis zur achten Ordnung verwendet. Der erste Ohrpartialton des tieferen Primärtons fällt auf den achten Ton dieser Reihe und wird vom Differenzton D_{34} noch verstärkt. Der tiefste Summationston S_{11} liegt in diesem Fall erst an der Stelle des neunten Tons dieser Reihe, auf den aber kein zusätzlicher Differenzton fällt, der diesen noch verstärken könnte.

1	2	3	4	5	6	7	8	...
D_{11} , D_{43}	D_{32} , D_{22}	D_{21} , D_{33}	PT	PT	D_{12} , D_{42}	D_{31} , D_{23}	D_{34}	...

Abbildung 23: Harmonische Reihe einer großen Terz vom 1. bis zum 8. „Teilton“, gebildet aus den beiden Primärtönen und den Kombinationstönen. Den „Grundton“ bildet der quadratische Differenzton D_{11} .

Wie man bereits bei Hindemith sehen konnte, gibt es jedoch auch konsonante Intervalle bei denen der kubische Differenzton D_{21} tiefer liegt als der fälschlicherweise grundsätzlich als stärker angenommene quadratische Differenzton D_{11} . Konkret handelt es sich um die große und die kleine Sexte. Bei der großen Sexte mit dem Schwingungsverhältnis 3:5 fällt der D_{21} ($6 - 5 = 1$) auf die Grundtonposition, D_{11} ($|3 - 5| = 2$) hingegen bildet den zweiten Ton der Reihe (siehe Abbildung 24). Noch schwieriger verhält es sich bei der kleinen Sexte mit dem Schwingungsverhältnis 5:8, bei der weder der kubische noch der quadratische Differenzton die Grundtonposition der harmonischen Reihe einnimmt. D_{11} ($|5 - 8| = 3$) bildet den dritten Ton der Reihe, D_{21} ($10 - 8 = 2$) den zweiten Ton. In diesem Fall wird der Grundton der Reihe vom viel schwächeren Differenzton höherer Ordnung D_{32} ($|15 - 16| = 1$) gebildet (siehe Abbildung 25).

1	2	3	4	5	...
D ₂₁	D ₁₁	PT	D ₂₂	PT	...

Abbildung 24: Harmonische Reihe einer großen Sexte bis zum 5. „Teilton“. Den „Grundton“ bildet der kubische Differenzton D₂₁.

1	2	3	...	5	...	8	...
D ₃₂	D ₂₁	D ₁₁	...	PT	...	PT	...

Abbildung 25: Harmonische Reihe einer kleinen Sexte bis zum 8. „Teilton“. Den „Grundton“ bildet der Differenzton D₃₂.

Obwohl keine weiteren Ausführungen zu den neutralen Sexten bei Husmann zu finden sind, kann man davon ausgehen, dass er diese Intervalle als neutral bezeichnet, weil der stets als stärker angenommene quadratische Differenzton bei diesen Intervallen nicht den Grundton der harmonischen Reihe bildet. Folgt man der Theorie Husmanns, so sind diese beiden Intervalle durch die Stärkeverhältnisse innerhalb der harmonischen Reihe aus den Primär- und Kombinationstönen, dem harmonischen Einzelton viel ferner als die von ihm als konsonant bezeichneten Intervalle. Bei den konsonanten Intervallen nach Husmann sind zwar die Primärtöne, welche man mit Vorsicht als „Obertöne“ innerhalb dieser harmonischen Reihen bezeichnen kann, stärker als der „Grundton“, aber dieser wird zumindest vom elementarsten Differenzton, dem D₁₁, gebildet. Bei den neutralen Intervallen hingegen ist der Grundton viel weniger gewichtig, was sich negativ auf die einzeltonähnliche Verschmelzung zu einem einheitlichen Klangeindruck auswirkt.

Nichts destotrotz lassen sich auch bei den neutralen Intervallen regelmäßige und größtenteils vollständige harmonische Reihen, gebildet aus den Primärtönen gemeinsam mit den nichtlinearen Verzerrungsprodukten, aufzeigen. Interessant ist, dass auch noch der Ganzton einen relativ regelmäßigen und vollständigen Aufbau aufweist. „Beim Halbton (sowie genau so bei der kleinen Septime) liegen die vorhandenen Töne dagegen immer nahe zusammen und dazwischen große und leere Stellen.“ (Husmann 1953, S. 22). In diesem unregelmäßigen Aufbau dieser Reihen liegt wohl auch, folgt man der Theorie Husmanns, der Dissonanzcharakter dieser Intervalle begründet. Nimmt man den Halbton mit einem Schwingungsverhältnis von 15:16, so fällt der D₁₁ ($|15 - 16| = 1$) zwar wieder auf den Grundton der harmonischen Reihe, der kubische Differenzton D₂₁ ($30 - 16 = 14$) liegt aber bereits an der vierzehnten Stelle. Auch die Differenztöne höherer Ordnung füllen die große Lücke dazwischen nicht ausreichend auf: D₁₂ ($|15 - 32| = 17$), D₂₂ ($|30 - 32| = 2$), D₂₃ ($|30 - 48| = 18$), D₃₂ ($45 - 32 = 13$). Wohl liegen noch Differenztöne auf den Stellen dazwischen, jedoch sind diese höherer Ordnung und somit viel schwächer oder gar

unhörbar. Die Ohrpartial- und die Summationstöne liegen in diesem Fall natürlich viel höher und fallen so auch nur selten, und meist nur mit schwachen oder unhörbaren Differenztönen zusammen. Es lässt sich also kein so einzeltonähnlicher, regelmäßiger und vollständiger Aufbau mehr erkennen.

1	2	...	14	15	16	17	...
D ₁₁	D ₂₂	...	D ₂₁	PT	PT	D ₁₂	...

Abbildung 26: Harmonische Reihe eines Halbtons. Den „Grundton“ bildet der quadratische Differenzton D₁₁. Vor allem die starken Kombinationstöne niedriger Ordnung lassen große Lücken in der Reihe frei.

Man darf jedoch nicht vergessen, dass diese harmonischen Reihen durch die geänderten Stärkeverhältnisse doch erheblich vom Klangeindruck eines Einzeltons mit harmonischen Spektrum abweichen. Keiner würde in Versuchung geraten zwei gemeinsam erklingende Töne, seien es Sinustöne oder harmonische Klänge, mit einem Einzelton zu verwechseln, weshalb Husmann richtigerweise immer nur von „einzeltonähnlich“ spricht. Wie ähnlich nun ein Intervall mit Sinustönen einem Einzelton ist, hängt auch davon ab an welcher Position in den harmonischen Reihen aus Verzerrungsprodukten die Primärtöne liegen. Die Obertöne, die in der natürlichen Teiltonreihe an einer tiefen Position liegen, sind in den meisten Fällen auch die stärksten, was sich sicherlich in unsere Hörgewohnheit eingepreßt hat. Liegen die Primärtöne eines Sinustonintervalls also an einer tiefen Position, nahe des aus einem Differenzton gebildeten Grundtons der Reihe, so entspricht der Klangeindruck eher unserer Vorstellung eines Einzeltons, als bei einem Intervall, bei dem die Primärtöne eine höhere Position in der harmonischen Reihe einnehmen.

Zwischen der theoretischen Erklärung der Ausnahmestellung der Konsonanzen anhand von Intervallen mit Sinustönen und der Praxis, in der Intervalltöne auch Obertöne mit sich führen, sieht Husmann keinen wesentlichen Unterschied: „Man sieht auf den ersten Blick, daß bei den Konsonanzen nichts Neues mehr passiert, während bei anderen Intervallen sich ein unübersehbares Labyrinth von unharmonischen Tönen bildet.“ (Husmann 1953, S. 23). Bei den konsonanten Intervallen bilden auch die harmonischen Obertöne untereinander bzw. gemeinsam mit den Grundtönen oder anderen Kombinationstönen wiederum Kombinationstöne. Diese fallen jedoch immer nur in dieselbe Reihe, gebildet aus den

harmonischen Vielfachen des tiefsten Differenztons. Es ist zwar möglich, dass sich je nach Obertonspektrum die Stärkeverhältnisse verändern, die Reihe selbst bleibt aber die gleiche (Husmann 1953, S. 23). Die harmonische Reihe bleibt auch bei den von Husmann als neutral bezeichneten Intervallen und den Dissonanzen durch die Obertöne, die sich wieder darin einfügen, dieselbe. Lediglich der unregelmäßige und damit unharmonische Aufbau der Dissonanzen macht schlussendlich den Unterschied aus.

Zusammenfassend kann man zur Grundlage der Konsonanztheorie von Husmann sagen, dass die Konsonanzen mit oder ohne Obertöne einen einfachen und harmonischen Aufbau besitzen. Sie folgen in ihrer regelmäßigen Anordnung der nichtlinearen Verzerrungsprodukte dem harmonischen Einklang, auch wenn der Grundton nur von einem Kombinationston gebildet wird. Zusammenklänge, die jedoch nicht den einfachen Schwingungsverhältnissen der Konsonanzen entsprechen, sind mit einem unregelmäßigen und unharmonischen Gewirr von Kombinationstönen versehen. Der Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz liegt also, wie auch für die anderen beiden Theoretiker, im Objekt, also dem Intervall, selbst.

5.3.2 Konsonanzempfinden im binauralen Hören

Um das Wesen der Konsonanz noch besser verstehen zu können und um vor allem die Grundlage, auf der das Konsonanzempfinden beruht, isolieren zu können, geht Husmann auf den Sonderfall der binauralen Darbietung genauer ein. Für den Begriff „binaurale Darbietung“, der so von Husmann (1953) übernommen wurde, verwendet man häufig auch den Begriff „dichotisches Hören“ (Feeney 1997), was in diesem Fall aber dasselbe meint: Bei der binauralen Darbietung bzw. dem dichotischen Hören, werden die beiden Intervalltöne auf das linke und rechte Ohr verteilt, was einige schwerwiegende Folgen für das Hörempfinden hat. Da man unter *binaural* allgemein das Hören mit beiden Ohren meint, ist der Begriff *dichotisch*, der eine unterschiedliche Darbietung auf linkem und rechtem Ohr meint, sogar präziser. Trotzdem werden, mit dieser Erläuterung der Begrifflichkeiten, für diese Hörsituation im weiteren Text die Bezeichnungen *binaural* und *dichotisch* synonym verwendet.

Versuche von Husmann haben ergeben, dass Schwebungen durch die binaurale Art der Darbietung nicht mehr vorhanden sind und man weiterhin zwei separate Töne hört anstatt eines pulsierenden Zwischentons. Das führt zu seinem Schluss, dass Schwebungen nur im Ohr selbst entstehen und auch nur sobald zwei Töne gemeinsam auf das Ohr treffen. Bei den Versuchspersonen stellte sich jedoch trotz des Ausbleibens von Schwebungen und Rauigkeit ein korrektes Dissonanz- und Konsonanzempfinden ein (Husmann 1953, S. 30). Wie bereits im Kapitel zur Konsonanztheorie nach Helmholtz beschrieben wurde, begründet dieser die Konsonanz im Ausbleiben von Schwebungen. Durch die Erkenntnisse aus Husmanns Versuche im binauralen Hören wird dieser Theorie jedoch die Grundlage entzogen. Dieser erkennt zwar die Konsonanztheorie von Helmholtz als „[...] eine der bedeutendsten Leistungen der Tonpsychologie des 19. Jahrhunderts [...]“ (Husmann 1953, S. 30) an, jedoch sieht er diese durch seine Versuche eindeutig widerlegt. Auch die Folgetheorie von Felix Krüger, die auf der Schwebungstheorie von Helmholtz aufbaut und die besagt, dass jede Dissonanz eine verstimmte Prim enthält (Krüger 1901, S. 240), scheint durch Husmann entkräftet.

Vor einer voreiligen vollständigen Verwerfungen einer Theorie, nur weil diese auf eine bestimmte Hörsituation nicht anwendbar ist, sei jedoch gewarnt. Auch die Ergebnisse der eigenen Versuche weisen darauf hin, dass sich das Gehör bei der Unterscheidung zwischen Konsonanzen und Dissonanzen an jenen Anhaltspunkten orientiert, die in der jeweiligen Hörsituation noch deutlich wahrnehmbar sind. Das heißt wiederum, dass Schwebungen und Rauigkeit, wenn diese denn entstehen können, durchaus eine Orientierungshilfe sein können, wenn andere wichtige Indikatoren, wie etwa die objektiven Obertöne, fehlen.

Die Versuche von Husmann haben gezeigt, dass beim binauralen Hören je nach Größe des Intervalls entweder zwei getrennte Töne gehört werden oder die beiden Töne zu einem einzigen verschwimmen wenn sie sich zu nahe kommen, jedoch in keinem Fall Schwebungen auftreten. Von diesen Ergebnissen ist Husmann fest überzeugt, auch wenn diverse Forscher vor ihm bereits von der Hartnäckigkeit der Schwebungen auch bei binauraler Darbietung berichten und auch manche seiner eigenen Versuchspersonen Schwebungen zu hören glaubten. Husmann schiebt dieses Schwebungsempfinden jedoch dem Wandern der Aufmerksamkeit zwischen dem Ton am linken und rechten Ohr zu (Husmann 1953, S. 29-30). Husmann bestreitet demzufolge also die Existenz von binauralen Schwebungen, was jedoch vollkommen dem derzeitigen Forschungsstand zu diesem Phänomen widerspricht und bereits Mitte des 19. Jahrhunderts beschrieben wird:

Bei Versuchen stellte sich heraus, „[...] dass man die Stösse deutlich hört, wenn man die eine Stimmgabel dicht vor das eine Ohr hält, die andere dicht vor das andere Ohr, sie also wahrnimmt, wo nur ein Trommelfell durch die Schwingungen des einen der Töne erschüttert wird.“ (Dove 1839, S. 404).

Binaurale Schwebungen sind am besten hörbar in einem kleinen Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 600 Hz. In diesem Bereich ist ein Ton mit fluktuierender Lautstärke hörbar, wenn zwei Töne einen Abstand von ca. 2 Hz bis 10 Hz aufweisen. Wenn die beiden Frequenzen ca. 20 Hz Unterschied erreichen, hat man einen rauen Klangeindruck, der sich bei noch größer werdenden Frequenzabstand wieder in zwei separate Töne aufteilt (Gelfand 1990, S. 424-425). Je weiter sich zwei Töne von diesem Bereich um 440 Hz herum entfernen, desto näher müssen sich auch die beiden Frequenzen kommen damit ein schwebender Ton hörbar ist (Oster 1973, S. 102). Es wird davon berichtet, dass die binauralen Schwebungen verschwinden, wenn die beiden Töne über 1000 Hz liegen, wobei je nach Literatur von dieser Grenzfrequenz leicht abgewichen wird (Oster 1973, S. 95).

Aufgrund der Erkenntnis, dass sich binaurale Schwebungen nicht ausschalten lassen und um die Relevanz der binauralen Schwebungen für die Versuche und Erkenntnisse von Husmann und die eigene Versuchsreihe, die in dieser Arbeit noch vorgestellt wird, zu prüfen, soll nun deren Einfluss auf das Konsonanz- und Dissonanzempfinden geklärt werden: Arbeitet man mit Sinustönen, so müssen diese unter 1000 Hz liegen damit die Primärtöne im binauralen Hören einen schwebenden Ton oder Rauigkeit erzeugen, wobei sich die Frequenzen näher als ca. 30 Hz kommen müssen. Diese Erkenntnis zeigt, dass vor allem kleinere Intervalle, wie etwa die Sekunden, diese Bedingungen am ehesten erfüllen, wenn die Primärtöne eine tiefere Frequenz als 1000 Hz aufweisen. Nimmt man den Ganzton (8:9) mit 800 Hz und 900 Hz, so würde der Abstand von 100 Hz zu groß sein für binaurale Schwebungen oder Rauigkeit. Wenn die Töne dieses Ganztons jedoch tiefer liegen, bei 100 Hz und 112,5 Hz, so wären binaurale Schwebungen hörbar. Wenn man nun die Obertöne der konsonanten und dissonanten Intervalle mit den bekannten Schwingungsverhältnissen betrachtet, so können auch diese untereinander nur in sehr speziellen Situationen, zumeist wenn die Grundtöne sehr tief liegen, Schwebungen hervorbringen, da ansonsten die Obertöne meist schon über 1000 Hz liegen oder sich nicht nahe genug kommen. Dasselbe gilt auch für die subjektiven Obertöne, die ebenfalls unter den eben genannten Bedingungen miteinander oder gemeinsam mit Primärtönen binaurale Schwebungen erzeugen können (Feeney 1997, S. 2333).

Man muss also die Kritik von Husmann an der Theorie von Helmholtz etwas relativieren: Weicht ein konsonantes Intervall geringfügig vom bekannten Schwingungsverhältnis ab, so können zumindest unter bestimmten Umständen auch bei binauraler Darbietung durch die Primärtöne selbst oder die Ohrpartialtöne Schwebungen (binaural beats) hervorgebracht werden. Wenn man bedenkt, dass die Helmholtzsche Theorie darauf beruht, dass die Konsonanzen besonders stark begrenzt sind, indem geringe Verstimmung durch Schwebungen hörbar werden, so stellt man fest, dass diese Theorie auch bei binauraler Darbietung ihre Grundlage nicht gänzlich verliert. Die Begrenzung durch Ohrpartialtöne fällt aber sicher schwächer aus und würde auch nur auf tiefere Lagen zutreffen. Grundsätzlich muss man also feststellen, dass gerade für die in der westlichen Musiktheorie festgelegten Schwingungsverhältnisse der konsonanten und dissonanten Intervalle besondere Bedingungen herrschen müssen damit binaurale Schwebungen einen relevanten Einfluss auf den Klangeindruck haben können. Diese Voraussetzungen für das Entstehen von binauralen Schwebungen sind auch in den später vorgestellten Versuchen zum Konsonanzempfinden nicht gegeben.

Betrachtet man vorerst die Unterscheidungsfähigkeit von Konsonanzen und Dissonanzen bei binauraler Darbietung von zwei Klängen, bestehend aus einem Grundton und objektiven Obertönen, so stellt Husmann nach seinen Versuchen fest, dass Schwebungen der Obertöne, die er für gänzlich ausgeschaltet hält und die in den meisten Fällen wohl tatsächlich keinen Einfluss auf den Klangeindruck haben, nicht der Grund für das Konsonanzempfinden sein können, da Konsonanzen und Dissonanzen richtig beurteilt wurden. Aber auch die Kombinationstöne, für deren Entstehen zwei Töne gemeinsam auf ein Ohr treffen müssen, werden nicht gebildet. Jedoch ist auch hiervon die Ausnahmestellung der Konsonanz nicht betroffen, solange objektiv Obertöne vorhanden sind: „Jedes Intervall behält auch im binauralen Hören (bei objektiv vorhandenen Obertönen) seinen Charakter vollständig und wird von jedem guten Musiker auch in dieser Darbietungsart mit genau derselben unfehlbaren Sicherheit erkannt wie beim normalen Hören.“ (Husmann 1953, S. 34-35). Dies ist ein Indiz dafür, dass die Obertöne, die in keiner Konsonanztheorie, die auf nichtlinearen Verzerrungsprodukten beruht, völlig ausgeklammert werden, eine wesentliche Rolle beim Konsonanzempfinden spielen.

Eine neue und völlig andere Situation ergibt sich, wenn nun Sinustöne herangezogen werden (folgendes nach Husmann 1953, S. 35-37): In den Versuchen von Husmann

konnten die Obertöne mittels der Versuchsanordnung nachgeschalteter Oktavsiebe aus- und eingeschaltet werden. Es zeigte sich, dass sobald die objektiven Obertöne nicht mehr vorhanden waren die Versuchspersonen die dargebotenen Intervalle nicht exakt beurteilen konnten, jedoch eine grobe Schätzung der Größe erhalten blieb. Darin sieht Husmann die Bestätigung, dass die Obertöne ausschlaggebend für die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen sind, wenn auch keine Kombinationstöne mehr entstehen können. Lediglich einige wenige Hörer, welche sehr geübte und professionelle Musiker waren, beurteilten die Intervalle richtig und konnten auch deren Größe bestimmen. Wie sich später zeigte, konnten fast alle Versuchspersonen durch Übung diese Fähigkeit erlangen.

Husmann wählt für seine Versuche neben einer einfachen Darbietung von aufeinander folgenden Sinustonintervallen schließlich auch noch ein Verfahren, bei dem einer der beiden Intervalltöne in eine Richtung bewegt wurde (folgendes nach Husmann 1952, S. 222-223): Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass auch ungeübte Probanden mit hoher Genauigkeit immer dann Bescheid gaben, sobald die beiden Töne in einem einfachen Schwingungsverhältnis zueinander standen. Die Versuchspersonen hoben die konsonanten Intervalle Oktave, Quinte, Quarte, große und kleine Terz sowie große und kleine Sexte als Lichtblicke heraus. Es ist jedoch erstaunlich, dass sich auch einige in der Harmonielehre als dissonant bekannte Intervalle für die Probanden von den restlichen abhoben. Sowohl der Ganzton (8:9) als auch die kleine Septime (5:9) und der Tritonus (von Husmann mit dem einfachsten Schwingungsverhältnis von 5:7 angenommen) wurden von den Versuchspersonen aufgrund ihres einfachen Schwingungsverhältnisses den Konsonanzen gleichgestellt. Die Schwingungsverhältnisse vom Halbton mit 15:16 sowie von der großen Septime mit 8:15 sind hingegen schon zu kompliziert, um als konsonant gewertet werden zu können.

Im Gegensatz zu den anderen herausgehörten Intervallen hob sich der Ganzton zwar von den verstimmtten Intervallen ab, jedoch wurde dieser als schön und hässlich zugleich empfunden. Die restlichen Intervalle wurden als gleich befriedigend bzw. gleich wohlklingend empfunden (Husmann 1953, S. 36-37).

Warum diese Intervalle zwischen den verstimmtten Intervallen als Lichtblicke wahrnehmbar waren und warum der Tritonus sich in den Versuchen, wenn auch nicht besonders positiv, ebenso abhob wie die Konsonanzen, der Halbton jedoch nicht mehr,

erklärt Husmann mit den subjektiven Obertönen (folgendes nach Husmann 1953, S. 39): Sowohl die subjektiven als auch die objektiven Obertöne verbinden zwei Intervalltöne mit einfachen Zahlenverhältnissen miteinander, indem diese an einer bestimmten Position zusammenfallen. Je niedriger die gemeinsamen Obertöne liegen, desto konsonanter ist das Intervall. Bei der binauralen Darbietung von Intervalltönen, die keine Obertöne mit sich tragen, ergibt sich jedoch eine Grenze: Die Nichtlinearitäten des Ohres reichen nur aus, um Ohrpartialtöne bis zum ca. neunten Oberton zu erzeugen. Somit erklärt sich auch warum der Tritonus (5:7), bei dem der fünfte Teilton von 7 und der siebte Teilton von 5 zusammenfallen, und der Ganzton (8:9) in den Versuchen herausgehört wurden. Beim Halbton (15:16), der großen Septime (8:15) und weiteren als dissonant geltenden Intervallen hingegen reicht die Nichtlinearität des Gehörs nicht aus, um die Ohrpartialtöne noch hervorzubringen, die zusammenfallen würden.

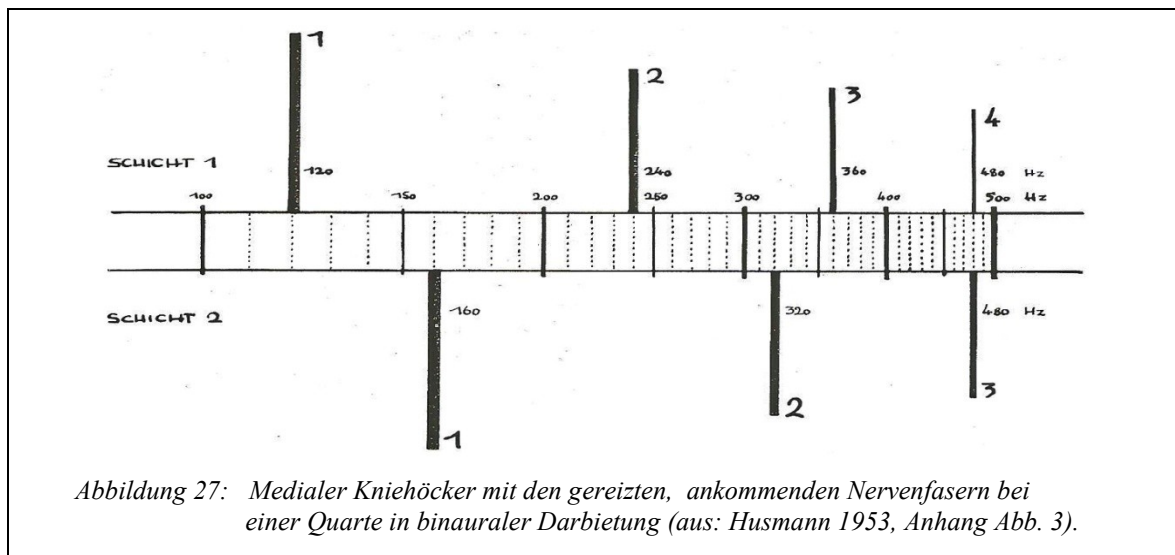
Da der Ganzton, die kleine Septime und der Tritonus im binauralen Hören konsonant sind, im normalen Hören jedoch dissonant, muss Husmann die Einschätzung der Intervalle für beide Hörsituation getrennt erklären, was schließlich zu getrennten Theorien für Konsonanz und Dissonanz führt (folgendes nach Husmann 1952, S. 223): Die Konsonanz wird laut Husmann durch zusammenfallende Obertöne, die im Gehirn verarbeitet werden, zu einer Erscheinung dieser Art. Die Dissonanz hingegen definiert sich durch periphere Störungen, die bereits in den Reiz aufnehmenden Sinnesorganen und Nerven entstehen. Da diese Störungen (Schwebungen und Rauigkeit) bei binauraler Darbietung wegfallen, zählen für die Intervalleinschätzung in dieser Hörsituation nur noch die koinzidierenden Obertöne, in denen Husmann die ursprünglichste Ursache für die Konsonanz sieht.

Folgt man diesen Ansichten, so liefert Husmann eine Theorie zur Konsonanz, Helmholtz mit seiner Störungstheorie hingegen eine Theorie zur Dissonanz. Trotz der Kritik von Husmann an der Konsonanztheorie von Helmholtz, deckt sich diese mit seiner Definition der Dissonanz. Lediglich der negativen Begründung der Konsonanz durch Ausbleibende Störungen stimmt Husmann nicht zu.

5.3.3 Neuropsychologische Erklärungsversuche

Eine neuropsychologische Erklärung für seine Konsonanztheorie, die sowohl auf objektiven als auch subjektiven Obertönen beruht und somit auch nichtlineare Verzerrungsprodukte miteinbezieht, sucht Husmann in der Hörbahn. Das Konsonanzempfinden beim binauralen Hören lässt sich durch den binauralen Vergleich zwischen den Höreindrücken am linken und rechten Ohr erklären. Dieser Vergleich ist bekannt aus der Richtungswahrnehmung, bei der Zeitunterschiede, Pegelunterschiede und auch spektrale Unterschiede zwischen dem am linken und rechten Ohr eintreffenden Schall eine Rolle spielen. Dass man nun bei den binauralen Versuchen mit Intervallen keine Richtungswahrnehmung eines einzigen Schallereignis hat, liegt an der Bedingung, dass die Tonhöhe und die Klangfarbe ziemlich gleich sein müssen, damit der Eindruck nicht in zwei getrennte Töne zerfällt (Husmann 1953, S. 52-53).

Als Organ in der Hörbahn, welches für den binauralen Vergleich verantwortlich ist, legt sich Husmann auf den medialen Kniehöcker (Corpus geniculatum mediale) fest (folgendes nach Husmann 1953, S. 54-55): Husmann stellt sich den Aufbau des mittleren Kniehöckers in zwei Schichten vor, wobei in der einen Schicht die Nervenfasern des linken Ohres, in der anderen die des rechten Ohres münden. In den beiden Schichten ist laut Husmann eine tonotopische Anordnung der Tonhöhen zu finden, wobei sich Nervenfasern übereinstimmender Tonhöhen des rechten und linken Ohres jeweils gegenüberliegen. Zwischen den beiden Schichten bestehen Verbindungen an Stellen gleicher Tonhöhe, die einen Vergleich ermöglichen. Wenn nun gegenüberliegende Tonhöhen in beiden Schichten gereizt werden, so stellt sich ein einheitlicher Eindruck auch beim binauralen Hören ein, der in die Hirnrinde weitergegeben wird. Husmann stellt sich die Intervallerkennung so vor, dass beim normalen Hören beide Intervalltöne und somit auch deren gemeinsame Obertöne in der selben Schicht liegen, was den konsonanten Klangeindruck bestimmter Intervalle stärker ausfallen lässt. Wenn die gemeinsamen Obertöne jedoch in verschiedenen Schichten liegen und nur durch die Kreuzungen der Hörbahn, die Husmann direkt zwischen den medialen Kniehöckern vermutet, erkannt werden können, so fällt der Konsonanzeindruck schwächer aus.



In Abbildung 27 ist der mediale Kniehöcker bei einer Quarte mit den Frequenzen 120 Hz und 160 Hz nach den Vorstellungen Husmanns zu sehen. Beim binauralen Hören kommt der tiefere Ton und seine subjektiven oder objektiven Obertöne in Schicht eins an, der höhere Ton in Schicht zwei. Die punktierten Linien repräsentieren die Verbindungen zwischen den beiden Schichten bei gleicher Tonhöhe. Bei der Quarte mit dem Schwingungsverhältnis 3:4 fallen der vierte Teilton von 3 und der dritte Teilton von 4 zusammen, was in diesem konkreten Beispiel bei 480 Hz der Fall ist. Durch den binauralen Vergleich über die Verbindungen der Schichten, entsteht ein konsonanter Klangeindruck, der stärker ausgeprägt ist, wenn objektive Obertöne vorhanden sind und etwas schwächer ausfällt, wenn Sinustöne verwendet werden bei denen nur subjektive Obertöne entstehen können.

Grundsätzlich ist diese Vorstellung der sich kreuzenden Hörbahnen und der tonotopen Anordnung der Frequenzen von Husmann sicher nicht falsch und die Ursache des Konsonanzempfindens beim binauralen Hören wohl in der Hörbahn zu suchen. Jedoch sind Husmanns Vorstellungen über den Aufbau der Hörbahn und deren Kreuzungen, in denen Reize des linken und rechten Ohres verglichen werden, zum Teil unvollständig und falsch, was sich aus dem damaligen Forschungsstand ergibt. Auch der Aufbau des medialen Kniehöckers in zwei Schichten mit einfacher tonotoper Anordnung der Frequenzen, sieht nach aktuelleren Erkenntnissen viel komplexer aus. Ohne an dieser Stelle zu genau auf den Aufbau der Hörbahn eingehen zu wollen, soll doch in aller Kürze beschrieben werden, wo nach heutiger Vorstellung dieser Austausch zwischen linkem und rechtem Ohr passiert und somit die Ursache für das Konsonanzempfinden beim binauralen Hören zu suchen ist

(folgendes nach Hellbrück/Ellermeier 2004, S. 97-98): Die aufsteigenden Hörbahnen der beiden Ohren kreuzen sich mehrmals, jedoch schon vor den medialen Kniehöckern. Sowohl der darunter liegende Colliculus inferior als auch der obere Olivenkern (Nucleus olivaris superior) erhalten bereits Informationen von beiden Ohren. Am wichtigsten für den binauralen Vergleich im Hinblick auf das Konsonanzempfinden, also dem Vergleich von Tonhöhen, ist jedoch die Vierhügelregion, in der sich die Colliculi inferiores der linken und rechten Hörbahn befinden, welche neuronal miteinander verbunden sind.

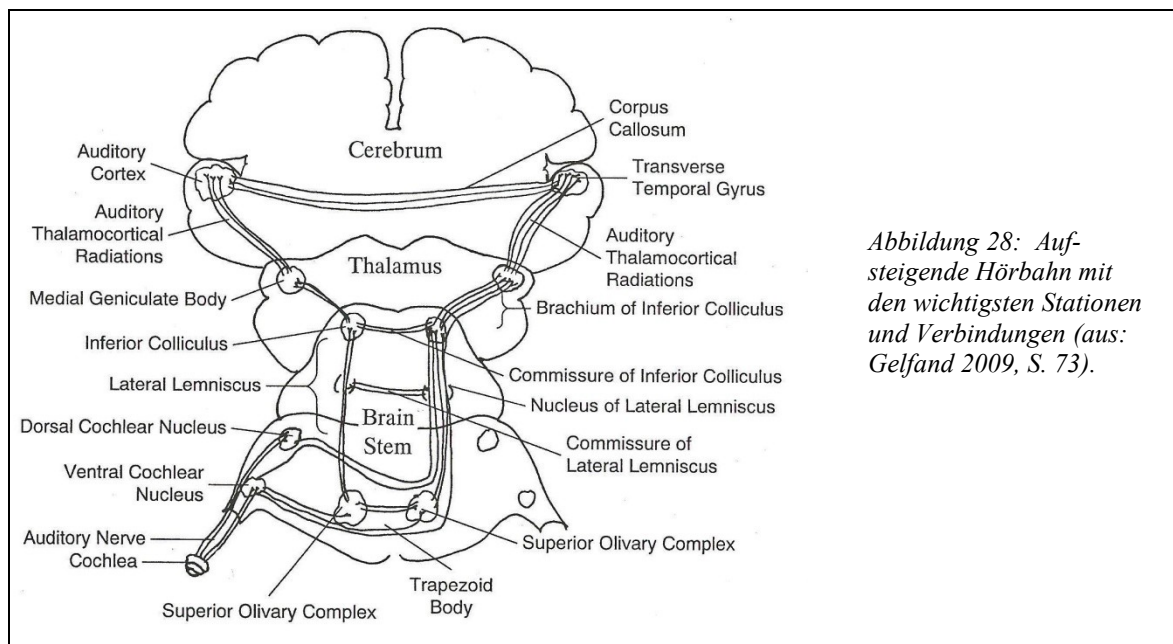


Abbildung 28: Aufsteigende Hörbahn mit den wichtigsten Stationen und Verbindungen (aus: Gelfand 2009, S. 73).

Die Kritik an Husmann ergibt sich somit daraus, dass die medialen Kniehöcker vermutlich zwar auch Informationen von beiden Ohren aus darunter liegenden Kreuzungen erhalten, jedoch keine direkte verbindende Bahn zwischen ihnen selbst besteht. Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, beginnt die bilaterale Repräsentation in der Hörbahn bereits bei den oberen Olivenkernen, die mit den Nuclei cochleares beider Ohren verbunden sind. Direkte verbindende Nervenbahnen vor dem auditorischen Cortex bestehen zwischen den Nuclei des Lemniscus lateralis, und wie bereits erwähnt, den Colliculi inferiores, jedoch nicht zwischen den medialen Kniehöckern: „However, communication does not occur between the medial geniculate bodies on the two sides.“ (Gelfand 2009, S. 74). Auch die tonotope Anordnung der Frequenzen, von der Husmann ausgeht, zieht sich zwar durch alle Stationen der Hörbahn, ist jedoch laut neueren Erkenntnissen viel komplexer als von Husmann angenommen und in seiner schematischen Abbildung dargestellt (Gelfand 2009, S. 75).

Nichtsdestotrotz ist die Erklärung für die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen bei binauraler Darbietung mit Sicherheit in solchen Kreuzungen der Hörbahnen zu suchen, da diese die einzigen Verbindungen der zwei Intervalltöne darstellen und erst dadurch die Möglichkeit für die Bewertung des Zusammenklangs gegeben wird. Ein Zusammenhang muss also bestehen, auch wenn dieser noch nicht genau geklärt ist und es sicher noch weiterer Forschungen bedarf, um alles restlos aufarbeiten zu können.

Zusammenfassend lässt sich über die Konsonanztheorie von Heinrich Husmann sagen, dass die Kombinationstöne wohl vorerst ein wichtiger Bestandteil seiner Theorie sind, aber schlussendlich nicht die Ursache für das Konsonanzempfinden. Durch seine Hörversuche mit binauraler Darbietung, von der das Konsonanzempfinden zumindest teilweise unbeeinflusst bleibt, scheint bewiesen, dass die Obertöne, seien sie nun objektiver oder subjektiver Art, das Wesen der Konsonanz ausmachen: „Da im binauralen Hören alle Teile des Klanges auseinanderfallen bis auf die gemeinsamen Obertöne, die Konsonanz aber weiterbesteht, ist gerade durch das binaurale Hören aber auch auf's allergenaueste bewiesen, daß die Konsonanz an der Gemeinsamkeit der Obertöne liegt.“ (Husmann 1953, S. 56). Dieser Erkenntnis zufolge muss man also davon ausgehen, dass Husmann anhand der Kombinationstöne nur aufzeigen wollte, dass auch sie sich in eine harmonische Reihe einfügen und dadurch Einzeltonähnlichkeit erzeugen, sie jedoch als alleinige Grundlage einer Konsonanztheorie nicht ausreichen. Das schwächere und häufig vernachlässigte nichtlineare Verzerrungsprodukt der Ohrpartialtöne nimmt hingegen eine wichtigere Stellung ein, da diese als Einzige bei binauralen Versuchen mit Intervalltönen ohne objektive Obertöne erhalten bleiben. Mit der Erkenntnis, dass beim binauralen Hören die Kombinationstöne wegfallen und auch Schwebungen (binaural beats) nur unter bestimmten Bedingungen auftreten, das Konsonanzempfinden aber erhalten bleibt, entzieht Husmann, Helmholtz und Hindemith, die sich nur auf diese Phänomene verlassen und die Ohrpartialtöne völlig ausklammern, die Grundlage. Die Vernachlässigung der Ohr-obertöne geschieht womöglich aus dem Grund, dass die subjektiven Obertöne nur sehr schwache Verzerrungsprodukte sind und die anderen Theoretiker diese deshalb für nicht relevant halten.

6. Kritik an den Konsonanztheorien und alternative Erklärungen

An der Konsonanztheorie von Helmholtz, die vor allem auf Schwebungen bei verstimmt Konsonanzen und dissonanten Intervallen beruht und deshalb auch „Störungstheorie“ (Fricke 2009, S. 96) oder „Störtheorie“ (Ebeling 2008, S. 507) genannt wird, übt Husmann Kritik, indem er aufzeigt, dass die Unterscheidungsfähigkeit von Konsonanz und Dissonanz auch bei seinen Versuchen mit dichotischer Darbietung, bei der Schwebungen und Rauigkeiten nicht entstehen, erhalten bleibt. Was dieser Kritik jedoch fehlt, ist ein praktischer Zugang:

In der praktischen Musikausübung findet man nur selten jene stationären Klänge, die von Helmholtz, Hindemith und auch Husmann als Grundlage angenommen werden. In der Praxis hat man es nahezu ständig mit natürlichen Frequenz- und Amplitudenfluktuationen, oder auch bewusst erzeugtem Vibrato zu tun. Dadurch fluktuieren auch Rauigkeiten und Schwebungen, was diese schwächt oder sogar gänzlich unterdrückt. Ein weiteres Argument gegen die Störungstheorie ist, dass auch geringfügig verstimmt Intervalle, wie Helmholtz sie verwendet um Schwebungen aufzuzeigen, in der musikalischen Praxis nicht als dissonant wahrgenommen werden. Im Gegenteil: Schwebungen durch eine leichte Verstimmung sind durch die typische ungenaue Realisation in der Praxis sogar die Regel und werden meist sogar als angenehmer empfunden als zu starre und stationäre Klänge (Fricke 2009, S. 96-97).

Neuere Untersuchungen bestätigen diese aus der Praxis bekannte Annahme auch unter Laborbedingungen (folgendes nach Miskiewicz/Rogala 2003, S. 422-424): In Versuchen wurden Töne mit einer harmonischen Teiltonreihe in Zweiklängen abgespielt und die Intervalle in temperierter und reiner Variante hinsichtlich ihrer Rauigkeit bewertet (siehe Abbildung 29). Wie sich gezeigt hat, wurden die temperierten Intervalle durchwegs als weniger rau empfunden, was darauf hinweist, dass langsame Schwebungen einen positiven Einfluss auf den Klangeindruck eines Intervalls haben und zu einer Abnahme der Rauigkeitsempfindung führen. Wenn man Konsonanz direkt mit Rauigkeit in Verbindung setzt, wie das in vielen Konsonanztheorien zu finden ist, führen langsame Schwebungen direkt zu einer Verbesserung des Wohlklanges.

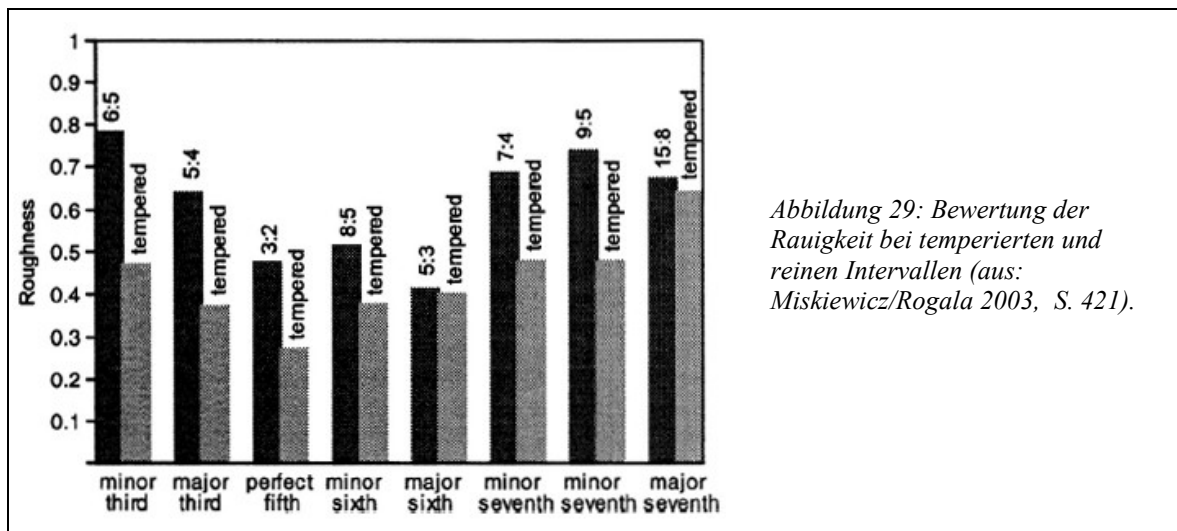


Abbildung 29: Bewertung der Rauigkeit bei temperierten und reinen Intervallen (aus: Miskiewicz/Rogala 2003, S. 421).

In den Ausführungen von Miskiewicz und Rogala wird nur die Rauigkeitsempfindung bei der Verwendung von komplexen Tönen untersucht und somit Rauigkeit zwischen harmonischen Teiltönen. Bei Sinustönen können bei ausreichender Lautstärke der Primärtöne die nichtlinearen Verzerrungsprodukte für einen rauen Klangeindruck sorgen. Das heißt wiederum, dass auch bei der Verwendung von Sinustönen leichte Abweichungen von den Schwingungsverhältnissen der reinen Intervalle als positiv empfunden werden können.

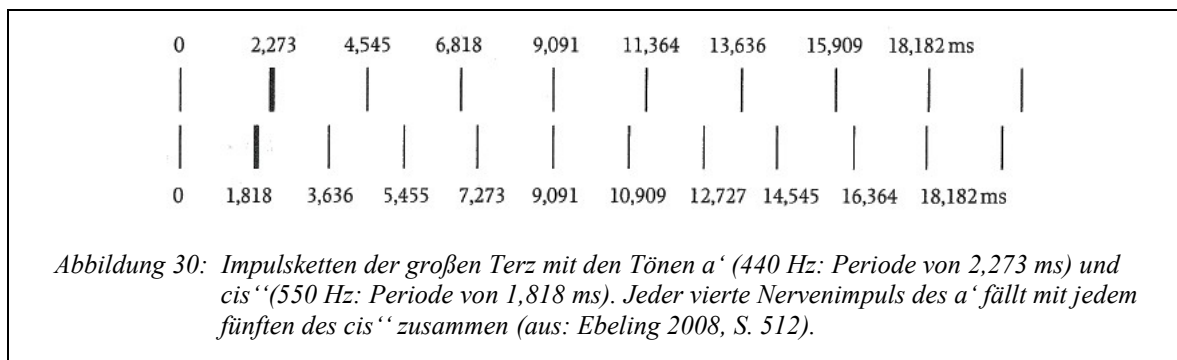
Neben der Kritik an dieser konkreten Konsonanztheorie, die auf Störungen des Zusammenklangs beruht, muss wohl auch an den Konsonanztheorien aufgrund von nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs allgemein Kritik geübt werden. Generell wird das Phänomen der Kombinationstöne und in weiterer Folge auch die musiktheoretischen Ansätze die darauf beruhen, fast ausschließlich unter Laborbedingungen und absolut praxisfern betrachtet. Die eingangs erwähnten Eigenschaften der unterschiedlichen Verzerrungsprodukte sowie die Konsonanztheorien von Helmholtz, Hindemith und Husmann beschäftigen sich ausschließlich mit stationären Klängen ohne Fluktuationen, wie sie aber in der Praxis üblich sind. Es steht außer Frage, dass nichtlineare Verzerrungsprodukte unseren Höreindruck beeinflussen können, dies ist aber nur unter bestimmten Gegebenheiten der Fall, die in der praktischen Musikausübung häufig nicht vorzufinden sind. Die Kombinationstöne werden, ähnlich wie Rauigkeit und Schwebungen, durch die in der musikalischen Praxis üblichen Schwankungserscheinungen und durch Vibratotöne geschwächt oder sogar unhörbar. Sind die Tonhöhen eines Intervalls zu einem gewissen Grad instationär bzw. handelt es sich um ungleichmäßige

Schwingungen, so wird die Ausbildung eines regelmäßig schwingenden Kombinationstons im Gehör verhindert. Durch Raumnachhall sowie chorische Effekte werden die nichtlinearen Verzerrungsprodukte in Orchester- und Ensemblesmusik zusätzlich geschwächt (Fricke 1996, Sp. 483-484). Weiters wurde in Hörversuchen festgestellt, dass selbst bei der Verwendung von Sinustönen Differenztöne erst bei sehr großen Lautstärken der Primärtöne auftreten und bei normalen Lautstärkeverhältnissen gar nicht wahrgenommen werden können. Versucht man die Differenztöne beispielsweise mit Geigentöne hörbar zu machen, so können diese selbst bei möglichst gleichmäßiger Tonerzeugung nur noch mit Mühe wahrgenommen werden (Voigt 1985, S. 68).

Es gibt also je nach Herangehensweise in den einzelnen Theorien, die auf nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs beruhen, unterschiedliche spezifische Kritikpunkte: Ein Punkt der jedoch auf alle vorgestellten Theorien zutrifft, ist, dass die Kombinationstöne und auch die sehr schwachen Ohrpartialtöne eindeutig überbewertet wurden. Dabei wird deutlich, dass man die musikalische Praxis ausgeklammert hat und jede Theorie für sich ein rein theoretisches Konstrukt aufgebaut hat, welches zwar in sich stimmig und schlüssig wirkt, jedoch völlig praxisfern ist. Was eine Konsonanztheorie zu leisten vermag, muss in erster Linie davon abhängen, wie diese einen Erkenntnisgewinn in der Untersuchung von praktischer Musikausübung darstellt. Das wurde weder von Helmholtz noch von Hindemith oder Husmann in einem zufriedenstellenden Ausmaß erreicht, weshalb auch stetig weitergeforscht wurde und zum derzeitigen Forschungsstand auch neuere und aufschlussreichere Konsonanztheorien existieren, die viele Ungereimtheiten aufklären.

Eine dieser Theorien ist die Autokorrelationstheorie (folgendes nach Ebeling 2007, S. 58-59): Als Voraussetzung für diese Theorie sind die aktuelleren Erkenntnisse zur Schallverarbeitung zu sehen, welche zusätzlich zur Analyse des Frequenzbereichs auch die Analyse des Zeitbereichs miteinbeziehen. Die Schallverarbeitung im Frequenzbereich bedeutet, dass jede hörbare Frequenz einem Ort auf der Basilarmembran entspricht (Tonotopie) und die Sinneszellen an einer bestimmten Stelle besonders empfindlich auf bestimmte Frequenzen reagieren, was zu einer Kodierung der Tonhöhe führt. Für die Autokorrelationstheorie von noch größerer Bedeutung ist aber die Tonhöhenverarbeitung im Zeitbereich. Die Frequenzinformation im Zeitbereich wird durch periodische, neuronale Feuermuster in den Nerven des Hörsystems übermittelt. Darunter versteht man, dass die Sinneszellen der Basilarmembran Nervenimpulse im Takt der anliegenden Schwingung abgeben und somit die Frequenz eines Signals in zeitliche Impulsmuster kodiert wird.

Bei einem Intervall wird also jeder Primärtön durch eine periodische Impulskette repräsentiert, wobei das menschliche Gehör in der Lage ist, Gleichzeitigkeit, also Koinzidenz von Impulsen innerhalb eines Zeitfensters, zu erkennen. Betrachtet man beispielsweise die Impulsketten eines konsonanten Intervalls, wie etwa der großen Terz *a' - cis'* mit dem Schwingungsverhältnis 4:5, so stellt man fest, dass die Impulse dem Schwingungsverhältnis entsprechend oft koinzidieren (siehe Abbildung 30). Bei einfachen, ganzzahligen Schwingungsverhältnissen, wie sie vor allem bei den Konsonanzen zu finden sind, koinzidieren die Impulse der Primärtöne öfter, als bei Dissonanzen oder verstimmten Intervallen. Die bereits seit der Antike bekannte Regel, dass sich Konsonanzen durch einfache ganzzahlige Schwingungsverhältnisse auszeichnen, bewahrheitet sich also auch in der Autokorrelationstheorie (Ebeling 2008, S. 512).



Bei der Vorstellung, dass der Verschmelzungsgrad zweier Töne von Koinzidenzen abhängt, die sich aus den beteiligten Schwingungen ergeben, handelt es sich um keine neuere Theorie. Bereits Euler (1739, S. 36-37) stellt die Schwingungsverhältnisse von Intervallen mit Punktreihen dar, an denen man die Koinzidenz der Schwingungen ablesen kann. Je einfacher das Schwingungsverhältnis eines Intervalls, desto häufiger fallen die Punkte, die die Schwingungen repräsentieren, auf die gleiche Position.

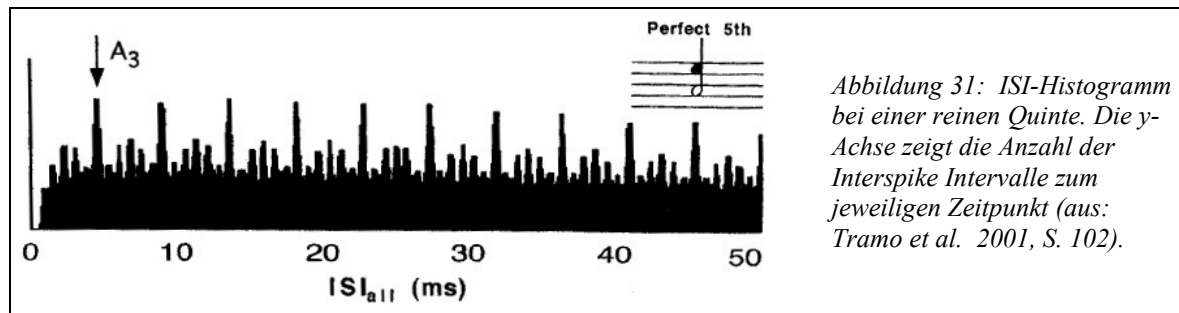
Diese rein mathematische Herangehensweise an das Wesen der Konsonanz von Leonhard Euler, die sich mit der Koinzidenz von Luftschwingungen beschäftigt, ist als Grundlage für die Mikrorhythmus-Theorie zu verstehen (folgendes nach Lipps 1899, S. 28-29): Die Mikrorhythmus-Theorie geht davon aus, dass die physikalischen Schwingungen im Gehör als Rhythmen weiterverarbeitet werden. Dadurch wird der physikalische Rhythmus einer Schwingung in einen psychischen Rhythmus umgewandelt, was in der Autokorrelationstheorie unter Berücksichtigung der neueren Erkenntnisse der Hörphysiologie aufgegriffen wird.

Die natürliche Präferenz für bestimmte harmonische Intervalle, lässt sich der Autokorrelationstheorie zufolge mit der Periodizitätsanalyse des menschlichen Hörsystems erklären (folgendes nach Langner 2007, S. 18): Neuronen reagieren als Konsequenz der Korrelationsanalyse nicht nur auf den Grundton eines komplexen Tones sondern auch auf Frequenzen, die in einer harmonischen Beziehung zu diesem stehen (Obertöne oder weiterer Ton eines Zusammenklanges). Das Erkennen solcher harmonischen Beziehungen funktioniert auch bei musikalischen Intervallen, was dazu führt, dass Intervalle mit einfachen Schwingungsverhältnissen als musikalisch sinnvoll eingeordnet werden. Die harmonischen Muster eines Tones werden im Kurzzeitgedächtnis gespeichert, weshalb auch aufeinander folgende Töne in einem musikalischen Zusammenhang gehört werden können.

In der Erkenntnis allein, dass sich die Konsonanzen durch häufiger koinzidierende Nervenimpulse von den Dissonanzen abheben und nicht allein durch koinzidierende Obertöne, wie das in der Theorie Husmanns erklärt wird, ist die Überlegenheit der Autokorrelationstheorie jedoch noch nicht auszumachen. Erst die Unschärfe der Gleichzeitigkeit in der Autokorrelation erklärt das Problem, warum leicht verstimmte Konsonanzen zurechtgehört werden können und nicht als dissonant wahrgenommen werden: Die Nervenimpulse, der jeweilig anliegenden Frequenz entsprechend, werden mit einer bestimmten Ungenauigkeit, die mit 0,05 bis 1,0 ms angenommen werden kann, abgegeben. Auch die Neuronen, die bei Koinzidenz von Impulsen feuern, arbeiten mit einer Latenzzeit von 0,25 bis 0,33 ms (Fricke 2009, S. 115).

Es gibt auch experimentelle Untersuchungen zur neuronalen Koinzidenz von Nervenimpulsen bei bestimmten Schwingungsverhältnissen, die die Autokorrelationstheorie stützen (folgendes nach Tramo et al. 2001, S. 101): Um den Luftschwingungen entsprechende Muster von Nervenimpulsen nachweisen zu können, wurde die neuronale Kodierung von Intervallen in Versuchen mit auditorischen Nervenfasern von Katzen untersucht. Die daraus gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass die Impulsketten der Nervenfasern und deren Koinzidenz bei konsonanten Intervallen ein regelmäßiges Muster aufweisen. In Abbildung 31 ist ein ISI-Histogramm (*Interspike Intervall Histogram*) bei einer reinen Quinte als Stimulus zu sehen. Unter *Interspike Intervall* versteht man den zeitlichen Abstand zwischen zwei Nervenimpulsen. Ein daraus gebildetes Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Intervalle bzw. die Häufigkeit der Koinzidenz von

Impulsen. Wie in Abbildung 31 zu sehen ist, fallen bei der reinen Quinte in regelmäßigen zeitlichen Abständen Nervenimpulse zusammen, was sich an den hohen Spitzen des Diagramms ablesen lässt. Laut Autokorrelationstheorie ist diese Koinzidenz für den konsonanten Charakter dieses Intervalls verantwortlich.



In den Untersuchungen von Tramo et al. ergibt sich aus den einfachen Zahlenverhältnissen und den Interspike Intervallen der Konsonanzen ein weiterer Faktor, der für die Einschätzung eines Intervalls von Bedeutung ist (folgendes nach Tramo et al. 2001, S. 98): Im Beispiel in Abbildung 31 wurde die Quinte mit den Frequenzen 440 Hz und 660 Hz verwendet. Das regelmäßige Muster dieses Intervalls, welches sich sowohl in der Wellenform als auch in den ISI-Histogrammen zeigt, wiederholt sich alle 4,55 ms. Diese Periode entspricht einer Frequenz von 220 Hz, die als der virtuelle Grundton der beiden Intervalltöne verstanden und tatsächlich wahrgenommen werden kann.

Die Konsonanzen zeichnen sich also auch durch Basstöne bzw. virtuelle Grundtöne (Residualtöne) aus, die von den Intervalltönen selbst impliziert werden und die in einem harmonischen Grundtonverhältnis zu diesen stehen. Bei den dissonanten Intervallen lässt sich hingegen kein so regelmäßiges zeitliches Muster in den Wellenformen und der Autokorrelationsfunktion finden. Es wird dadurch auch kein stark repräsentierter Basston gebildet, der in einem günstigen harmonischen Verhältnis zu den Intervalltönen steht (Tramo et al. 2001 S. 100). Dass es sich bei den eben beschriebenen Tönen, die in ihrer Frequenz tiefer liegen als die Intervalltöne, nicht um Differenztöne handelt sondern um virtuelle Töne, die sich aus der zeitlichen neuronalen Kodierung von Intervallen ergeben, konnte durch Versuche bewiesen werden. Houtsma und Goldstein haben gezeigt, dass auch bei dichotischer Darbietung ohne Kombinationstöne virtuelle Grundtöne von Musikern zur Identifizierung von Intervallen genutzt werden (Houtsma/Goldstein 1972, S. 522-524).

Neben der Autokorrelationstheorie führen auch frühere Untersuchungen mit anderen Herangehensweisen und Erklärungsversuchen schon zu der Erkenntnis, dass leichte Abweichungen von den Schwingungsverhältnissen der reinen Intervalle nicht als störend empfunden werden oder sogar bevorzugt werden (folgendes nach Stumpf/Meyer 1898, S. 125-126): Die Versuche von Stumpf und Meyer zur Einschätzung von Intervallen haben ergeben, dass die physikalisch reinen Intervalle häufig gar nicht als rein eingeschätzt werden. Viel mehr tendieren die Versuchspersonen dazu die vergrößerten Intervalle als rein einzuschätzen, weshalb Stumpf zwischen objektiv reinen und subjektiv reinen Intervallen unterscheidet. Auffällig ist auch, dass sich die Neigung zur Vergrößerung der Intervalle von der großen Terz zur Quinte und schließlich zur Oktave steigert.

Je vollkommener also eine Konsonanz ist, desto eher werden Verstimmung toleriert bzw. desto häufiger wird das vergrößerte Intervall für das reine gehalten (Stumpf/Meyer 1898, S. 132). Dies widerspricht der Konsonanztheorie von Helmholtz, nach der die vollkommensten Konsonanzen am stärksten begrenzt sein müssten und Abweichungen von dem reinen Intervall am deutlichsten durch Schwebungen hörbar werden müssten.

In der Definition der Konsonanz von Carl Stumpf finden sich auch einige Parallelen zu jener von Husmann (folgendes nach Stumpf 1911, S. 118): Auch Stumpf erklärt sich die Konsonanz dadurch, dass zwei gleichzeitig erklingende Töne mit einem einfachen Schwingungsverhältnis zueinander verschmelzen und sich dem Eindruck eines einzigen Tones annähern. Die Verschmelzung ist umso größer, je kleiner die beiden Verhältniszahlen sind. Demnach nimmt der Verschmelzungsgrad in folgender Reihenfolge der konsonanten Intervalle ab: Oktave, Quinte, Quarte, Terzen und Sexten. Darauf folgen dann die in der Musiktheorie als dissonant bekannten Intervalle mit einem noch geringerem Verschmelzungsgrad.

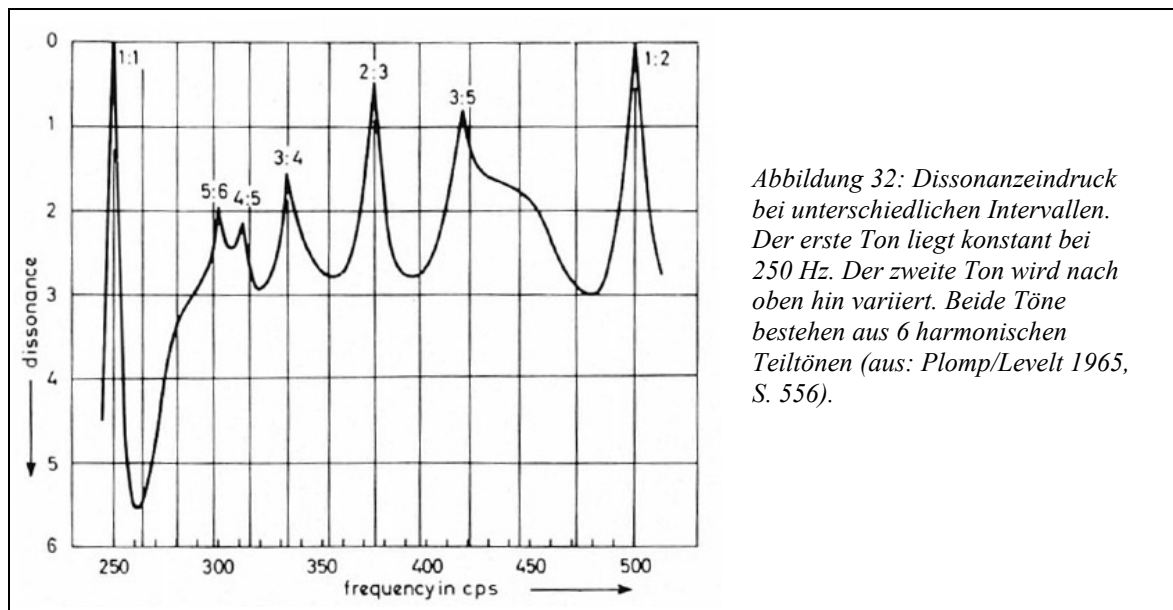
Jedoch hängt der Verschmelzungsgrad nach Carl Stumpf nicht von der Reinheit des Schwingungsverhältnisses der objektiven Tonhöhen ab, sondern von den physiologischen Tonhöhen, also den subjektiv wahrgenommenen und deren Verhältnis zueinander. Der Verschmelzungsgrad (also der Konsonanzeindruck) ist nach Stumpf als eine subjektive Empfindung aufzufassen, wohingegen Schwebungen und Kombinationstöne von den objektiven Tonhöhen abhängen (Stumpf 1911, S. 120-121). Aus dieser Definition und den oben erwähnten Versuchsergebnissen von Stumpf lässt sich ableiten, dass Schwebungen und Kombinationstöne eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen. Diese Erscheinungen beeinflussen die Verschmelzung von subjektiv reinen Intervallen in den

Versuchen von Stumpf nicht, auch wenn durch Abweichungen von den einfachen Schwingungsverhältnissen die Kombinationstöne in einem ungünstigen Verhältnis zu den Primärtönen stehen oder Schwebungen bzw. Rauigkeit auftreten.

Untersuchungen zur Intonation in praxisorientierten Versuchen bestätigen ebenfalls, dass die als richtig empfundene Intonation nicht in erster Linie mit den bekannten einfachen Schwingungsverhältnissen zusammenhängen muss. In der praktischen Musikausübung bzw. in der Wahrnehmung von Musik, spielt der funktionale musikalische Zusammenhang die entscheidende Rolle für die Intonation (Fricke 1973, S. 400).

Dass die Rauigkeit eines Zusammenklanges doch einen Einfluss auf die Einschätzung eines Intervalls haben kann, darauf weisen die Ergebnisse der später vorgestellten Versuche zum Konsonanzempfinden hin. Auch andere Untersuchungen stützen die Störtheorie von Hermann von Helmholtz, wenn auch in abgeänderter Art und Weise. Plomp und Levelt führen den Begriff *tonal consonance* ein, worunter sie verstehen, dass die Konsonanz mit einer speziellen sensorischen Erfahrung einhergeht, die mit einfachen Schwingungsverhältnissen in Verbindung steht (Plomp/Levelt 1965, S. 548). Ob ein Intervall als dissonant oder konsonant eingeschätzt wird, hängt dieser Theorie zufolge davon ab, welchen Frequenzabstand zwei Töne zueinander aufweisen und ob diese in eine gemeinsame Frequenzgruppenbreite fallen oder nicht (dies und folgendes nach Plomp/Levelt 1965, S. 555): Maximale sensorische Dissonanz wird erreicht wenn zwei Töne einen Frequenzabstand von 25 % der Frequenzgruppenbreite aufweisen. Der maximale sensorische Konsonanzeindruck wird hingegen erreicht, wenn zwei Töne einen größeren Frequenzabstand zueinander haben als die Frequenzgruppenbreite. Bei obertonreichen Tönen ergibt sich demzufolge eine Kurve die den Dissonanz- bzw. Konsonanzgrad anzeigt (siehe Abbildung 32) in Abhängigkeit davon, ob die Grundtöne in eine Frequenzgruppenbreite fallen und ob bzw. in welchem Ausmaß Obertöne Rauigkeit hervorbringen.

Bei starren Sinustönen, wie diese in den eigenen Versuchen zum Konsonanzempfinden verwendet wurden, können neben den Primärtönen auch die Kombinationstöne- und Ohrpartialtöne ausreichend stark auftreten, um den Konsonanz- bzw. Dissonanzgrad eines Intervalls mitzubestimmen, wenn diese in gemeinsame Frequenzgruppenbreiten fallen.

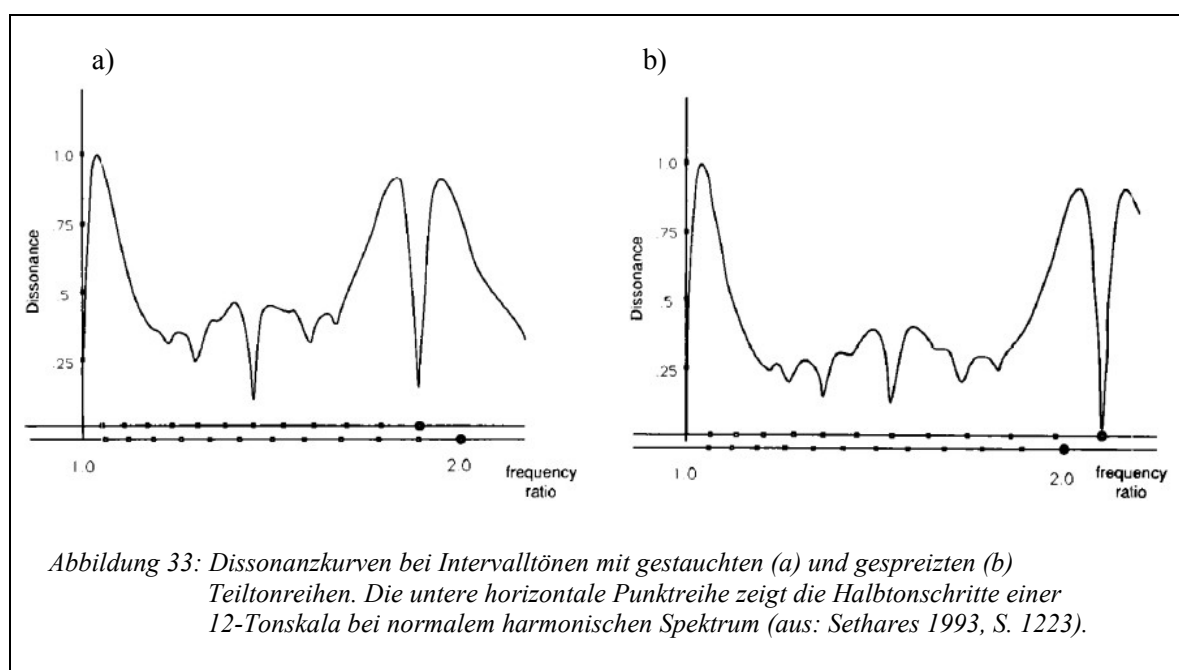


Die Bedeutung der Obertöne für die Konsonanz wurde im Laufe dieser Arbeit schon mehrfach hervorgehoben und Untersuchungen zur Intonation von Intervallen mit unterschiedlichen Teiltonspektren scheinen deren herausragende Rolle zu bestätigen (folgendes nach Terhardt/Zick 1975, S. 273): Wie ein Intervall intoniert wird bzw. ob das normale, das gespreizte oder das gestauchte Intervall bevorzugt wird, hängt auch vom Spektrum eines komplexen Tones ab. Wenn zwei Töne bzw. deren Obertöne in einem Zusammenklang nicht interagieren können, etwa weil die Intervalltöne nacheinander gespielt werden oder die Teiltonfrequenzen der beiden Töne durch den spektralen Aufbau zu weit voneinander entfernt sind, dann wird eine gespreizte Intonation bevorzugt. Wenn nur manche Spektralkomponenten interagieren können bzw. Schwebungen oder Rauigkeit hervorbringen können, dann wird eine normale Intonation nach der temperierten Stimmung bevorzugt. Töne mit einem sehr komplexen Spektrum, welches starke Interaktion zwischen den Klangkomponenten zulässt, verlangen zum Teil sogar nach einer gestauchten Intonation.

In diesen Erkenntnissen von Terhardt und Zick wird bereits deutlich, dass das jeweilige Teiltonspektrum einen enormen Einfluss auf das Konsonanzempfinden zu haben scheint. Deshalb werden die Obertöne auch in neueren Theorien, welche in diesem Kapitel noch angesprochen werden, zu einem wesentlichen Faktor für die Unterscheidungsfähigkeit von Konsonanz und Dissonanz erklärt.

Durch Untersuchungen von Zusammenklängen von zwei komplexen Tönen mit normalen, gespreizten und gestauchten Teiltonspektren wird die Rolle der Obertöne erneut bekräftigt (folgendes nach Sethares 1993, S. 1222 - 1223): Verwendet man Intervalltöne mit normalem harmonischen Teiltonspektrum, so entsteht der größte Konsonanzeindruck bei den bekannten einfachen Schwingungsverhältnissen der konsonanten Intervalle. Werden hingegen die Teiltonreihen um einen bestimmten Faktor gespreizt oder gestaucht, so verändern sich auch die Schwingungsverhältnisse zweier Töne, bei denen ein konsonanter Klangeindruck entsteht.

Bei welchen Schwingungsverhältnissen unter Verwendung der jeweiligen Teiltongerüste minimale Dissonanz auftritt, wurde nach ähnlichen Kriterien ermittelt wie bei Plomp und Levelt (1965), nach denen minimale Dissonanz immer dann auftritt, wenn Grundtöne und Obertöne möglichst wenig interagieren, also Schwebungen oder Rauigkeit hervorbringen (Sethares 1993, S. 1219).



Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, weichen die Punkte bei denen der geringste Dissonanzeindruck entsteht entsprechend des Teiltonspektrums von der normalen 12-Tonskala bei normalem harmonischem Spektrum ab. In Abbildung 33 a) werden Töne mit einem gestauchten Teiltonspektrum verwendet, wodurch auch die gestauchte Oktave und Quinte als die reinsten Konsonanzen wahrgenommen werden. Die Dissonanzkurve bei

gespreizten Teiltonreihen hingegen zeigt den geringsten Dissonanzeindruck bei der gespreizten Oktave und Quinte, wie der Abbildung 33 b) entnommen werden kann.

Wie diese und weitere Untersuchungen zeigen, scheint das tonale Bezugssystem und somit auch die Einschätzung eines Intervalls als konsonant oder dissonant zu einem großen Teil von den Teiltönen abzuhängen (folgendes nach Keuler 1997, S. 223): Das Hörsystem analysiert die Töne bzw. deren Teiltonspektrum und kreiert daraus ein tonales Bezugssystem. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass auch aus Tönen mit inharmonischem (gespreizten oder gestauchten) Teiltonreihen ein Tonsystem hergeleitet wird. Das beweist auch eine Komposition von Jenő Keuler, in der die temperierten großen Septimen aufgrund des entsprechend veränderten Teiltonspektrums als Oktaven dienen.

Obwohl diese Konsonanztheorien, die vieles mit dem Teiltonspektrum erklären, nicht direkt an den später abgehandelten Versuchsergebnissen angewandt werden können, da in den Versuchen nur Sinustöne verwendet werden, können mit ihnen zumindest mögliche Probleme in der Intervalleinschätzung aufgrund von fehlenden Obertönen erklärt werden.

7. Versuche zum Konsonanzempfinden

7.1 Fragestellung

Durch die bereits beschriebenen Kreuzungen der Hörbahnen müsste die Feststellung von Gleichzeitigkeit innerhalb zweier Impulsketten auch bei dichotischer Darbietung eines Intervalls funktionieren. Jedoch zeigen die Versuche von Husmann, bei denen die meisten Versuchspersonen ohne Obertöne, Kombinationstöne und Schwebungen die Intervalle nicht mehr richtig bestimmen konnten, zum Teil ein völlig anderes Bild. Lediglich bei einem einregelnden Versuchsverfahren heben sich die Intervalle mit einfachen Zahlenverhältnissen deutlich von den restlichen ab. Bei normaler Darbietung ohne die Möglichkeit des Einregelns gelingt eine korrekte Bewertung hingegen nur bei sehr wenigen Versuchspersonen ohne Übung (Husmann 1953, S. 36). Man findet bei Husmann nur sehr vage Angaben zu den Versuchspersonen, deren Anzahl und musikalische Vorbildung sowie dazu, wieviele von ihnen tatsächlich auch ohne Einregeln richtige Intervallbenennungen vornehmen konnten. Die Fragen, die also offenbleiben und mit diesen Versuchen, die zum Teil als Replikationsstudie gesehen werden können, untersucht werden sollen, sind, ob die Versuchspersonen bei einfachen Tönen (ohne Obertöne) in dichotischer Darbietung tatsächlich schlechter abschneiden in der Intervallbewertung und ob es Unterschiede bei den verschiedenen Intervallen gibt.

Als Vergleich zu dieser dichotischen Hörsituation, wird vorab die Unterscheidungsfähigkeit von Konsonanz und Dissonanz bei obertonlosen Tönen in normaler nicht dichotischer Darbietung untersucht, in der die Möglichkeit besteht, dass Kombinationstönen und Schwebungen auftreten. Dies ist eine sehr interessante Situation, die Husmann in seinen Versuchen, obwohl die Kombinationstöne sehr intensiv in seiner Theorie behandelt werden, vollkommen ausklammert. Dabei ist eine zentrale Frage im Bezug auf alle Konsonanztheorien, die auf nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs beruhen, ob die Kombinationstöne und Schwebungen bzw. Rauigkeit, in ihrer Stärke überhaupt ausreichen, um die Dissonanz deutlich von der Konsonanz abzugrenzen. Dass dies in der Praxis ohnehin meistens nicht der Fall ist, wurde bereits geklärt. Trotzdem soll dies auch in einer Laborsituation mit stationären Sinustönen untersucht werden, um die theoretischen Vorstellungen von Helmholtz, Hindemith und Husmann zu prüfen. Natürlich

begibt man sich damit in eine völlig praxisferne Klangwelt, in der es aber sehr interessant ist nachzusehen, wie die Versuchspersonen damit zurechtkommen und ob nicht bereits in dieser ungewohnten Situation ohne Obertöne erste Schwierigkeiten auftreten.

Da Husmann seine Konsonanztheorie auf den Obertönen aufbaut, soll auch noch deren Relevanz in einer Hörsituation überprüft werden. Die Ursache für die Konsonanz-Dissonanz-Unterscheidungsfähigkeit bei dichotischer Darbietung von Sinustönen, zumindest nach gewisser Übung bzw. beim Einregeln der Frequenzen, sieht Husmann im nichtlinearen Verzerrungsprodukt der Ohrpartialtöne. Laut Husmann bleiben diese nämlich in jeder Hörsituation bestehen: „Die Bildung der subjektiven Obertöne läßt sich also niemals mit irgendwelchen Mitteln ausschalten.“ (Husmann 1953, S. 34). Husmann sieht seine Theorie darin bestätigt, dass die Ohrpartialtöne der einzige Stimulus in dieser speziellen Hörsituation sind, der neben den Primärtönen existiert. Was Husmann jedoch nicht beachtet, sind die spezifischen Eigenschaften dieses nichtlinearen Verzerrungsprodukts des Gehörs. Wie eingangs im Detail beschrieben, arbeitet das Ohr bei geringen Schalldruckpegeln linear, was wiederum heißt, dass unter diesen Umständen auch keine Ohrpartialtöne erzeugt werden. Abgesehen davon, dass die Ohrpartialtöne auch bei Schalldrücken, bei denen das Ohr bereits verzerrt in den meisten Fällen äußerst schwach ausfallen und durch die Verdeckung häufig unhörbar bleiben, beachtet Husmann also keineswegs, dass diese auch gänzlich fehlen können. In die folgenden Untersuchungen soll also auch eine Hörsituation ohne Ohrpartialtöne Einzug finden, um auch diese speziellen Umstände und in weiterer Folge Husmanns Theorie zu überprüfen. Vorab ist jedenfalls klar, dass nur noch die Autokorrelationstheorie (zumindest theoretisch) bestehen kann, wenn nur zwei Sinustöne ohne Schwebungen, Kombinationstöne, objektive und auch subjektive Obertöne in einem Intervall zusammenklingen. Auch die Erkenntnisse von Tramo et al. (2001) sowie Houtsma und Goldstein (1972), welche besagen, dass auch bei dichotischer Darbietung durch die Töne eines konsonanten Intervalls ein virtueller Grundton impliziert wird, bieten eine mögliche Erklärung für das Konsonanzempfinden in dieser speziellen Hörsituation.

An dieser Stelle sei jedoch noch angemerkt, dass nur weil ein bestimmter Faktor in einer bestimmten Hörsituation keinen Einfluss haben kann, dies nicht bedeutet, dass eine gesamte Konsonanztheorie zu verwerfen ist. Je nach Hörsituation können unterschiedliche Indikatoren eine Rolle spielen und sich unterschiedliche Theorien bewahrheiten.

Es ist also Ziel dieser Studie den Einfluss der nichtlinearen Verzerrungsprodukte auf die Unterscheidungsfähigkeit von dissonanten und konsonanten Intervallen zu untersuchen, die Theorie von Husmann in einer teilweisen Replikation seiner Studie zu überprüfen und die Ergebnisse hinsichtlich alternativer Erklärungen zu deuten.

7.2 Messungen, Versuchsdesign & Durchführung

Bei den Versuchen von Husmann findet man keine genauen Angaben zu den Schalldruckpegeln der Primärtöne. Dadurch lässt sich auch nicht bestimmen mit welcher Intensität Kombinationstöne oder Ohrpartialtöne bei diesen Versuchen aufgetreten sind. Gerade bei den sehr schwachen Ohrpartialtönen kann man also aufgrund der mangelnden Transparenz nicht nachvollziehen, ob diese wahrnehmbar waren bzw. ob diese überhaupt erst gebildet wurden.

Da die Schalldruckpegel der Primärtöne also ein äußerst wichtiger Faktor für die Bildung und Intensität nichtlinearer Verzerrungsprodukte des Gehörs sind, wurden diese für die in dieser Arbeit vorgestellten Versuche genau gemessen: Da in dieser Studie ausschließlich Sinustöne verwendet werden, wurde auch ein Sinuston mit einer Frequenz von 1 kHz als Messton herangezogen. Um den Schalldruckpegel des Testtons am Trommelfell zu messen, wurde eine Konstruktion gebaut, die den äußeren Gehörgang näherungsweise nachbildet. Dazu wurde aus schallabsorbierendem Schaumstoff ein Loch herausgeschnitten, welches eine Tiefe von ca. 2,5 cm und einen Durchmesser von ca. 7 mm aufwies. Dieses Loch wurde dann mit kleinerem Durchmesser komplett durch den Schaumstoffwürfel geschnitten. Von der engeren Lochseite her konnte so ein Schalldruckpegel-Messgerät auf die passende Tiefe in den Schaumstoff eingeführt werden, sodass die Membran des Messmikrofons den nachgebildeten Gehörgang abschloss, wie das sonst durch das Trommelfell passiert. Verwendet wurde das Schalldruckpegel-

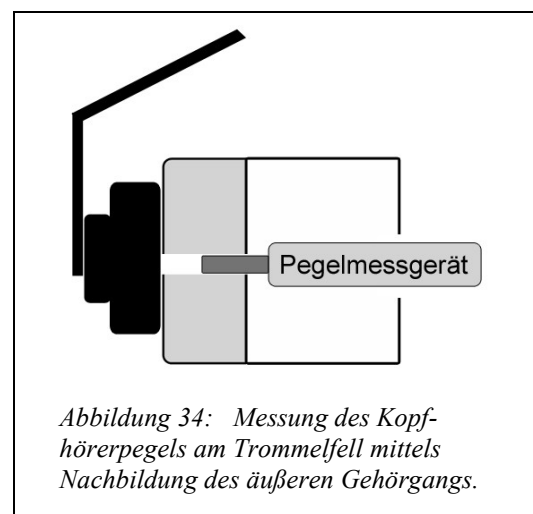


Abbildung 34: Messung des Kopf-
hörerpegels am Trommelfell mittels
Nachbildung des äußeren Gehörgangs.

messgerät mit der Bezeichnung *AZ8922 Digital Sound Level Meter*, welches einen Messbereich von 30-130 dB bei einer Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ dB erfasst.

Für die Messung der Schalldruckpegel sowie für die Versuche selbst wurde ein Studio-Stereo-Kopfhörer des Typs *AKG K-271 MKII* verwendet. Dieser arbeitet selbst bei sehr hohen Schalldruckpegeln mit äußerst geringen Verzerrungen, die den Höreindruck zumindest bei jenen Pegeln, die für diese Versuche verwendet wurden, nicht maßgeblich beeinflussen, wobei ein Klirrfaktor von $< 0,3$ % für dieses Gerät vom Hersteller angegeben wird. Durch die geschlossene, ohrmschließende Bauweise dieses Modells wird gesichert, dass bei dichotischer Darbietung der Ton von einem Ohr nicht durch Luftschwingungen zum anderen gelangt. Natürlich kann für diesen Kopfhörer kein absolut linearer Frequenzgang angenommen werden und so ist es durchaus möglich, dass manche Sinustöne in den Versuchen von den gemessenen Schalldruckpegeln des 1 kHz - Testtons geringfügig abweichen.

Die Sinustöne für die Versuche wurden mit der freien Audiosoftware *Audacity* erstellt. Die unterschiedlichen Tonzusammensetzungen für jedes Intervall, sowie die Sprachansagen wurden schließlich mit der Audioproduktionssoftware *Cubase 7* zusammengestellt. Alle Arbeitsschritte wurden bei einer Auflösung von 96 kHz und 24 bit über das Audiointerface *Focusrite Scarlett 18i20* durchgeführt und auch von digital nach analog für den Kopfhörerausgang gewandelt. Die hochqualitativen Wandler sowie Kopfhörerverstärker dieses Studiogeräts verhindern, dass Rauschen oder Verzerrungen die Versuche beeinflussen.

Für die Versuche wurden drei unterschiedliche Hörsituationen konstruiert, um zu überprüfen ob sich die Konsonanzwahrnehmung durch unterschiedliche Gegebenheiten verändert.

Hörsituation 1: In der ersten Hörsituation wird eine Situation konstruiert, die von Husmann völlig außer Acht gelassen wird. Beide Sinustöne, die das Intervall bilden, werden gemeinsam und gleichzeitig auf beiden Ohren dargeboten. Die Sinustöne werden mit einem gemessenen Schalldruckpegel von 85 dB abgespielt. Unter diesen Bedingungen treten sowohl gut hörbare Kombinationstöne als auch Ohrpartialtöne auf (siehe Absatz 4 *Subjektive Verzerrungsprodukte*). Weiters können auch deutliche Schwebungen und Rauigkeit durch nahe beieinanderliegende Töne auftreten. Obwohl den Kombinationstönen

zumindest in seinen theoretischen Überlegungen eine Rolle zugesprochen wird, untersucht Husmann in seinen Versuchen nicht deren Einfluss, wenn objektive Obertöne fehlen. Die Frage, die sich also stellt, ist, ob die Verzerrungsprodukte des Gehörs für die meisten Versuchspersonen überhaupt ausreichen, um eine korrekte Bewertung der Intervalle vornehmen zu können, oder ob bereits in dieser Hörsituation erste Schwierigkeiten auftreten. Dabei ist zu bedenken, dass die Probanden zwar praktisch geübte Musiker sind, jedoch den meisten Sinustönen nicht sehr geläufig sind.

Hörsituation 2: Die zweite Hörsituation dieser Versuche ist als eine Replikation der Untersuchungen von Husmann zu verstehen. Es werden also obertonlose Intervalltöne verwendet, wobei diese auf das linke und rechte Ohr aufgeteilt werden (dichotische Darbietung). Die Sinustöne werden wiederum mit einem relativ hohen Schalldruckpegel von 85 dB simultan abgespielt, so dass Ohrpartialtöne hörbar werden können. Es soll überprüft werden, ob sich ähnliche Orientierungslosigkeit bei der Einschätzung der Intervalle einstellt, wie das bei den Untersuchungen von Husmann der Fall war, wenn die Möglichkeit des Einregels nicht gegeben ist, sondern zwischen konsonant und dissonant unterschieden werden muss. Weiters sollen die Ergebnisse dieser Hörsituation mit jenen der ersten Hörsituation verglichen werden, um festzustellen, ob sich die Empfindung einzelner Intervalle ändert, wenn plötzlich Kombinationstöne und Schwebungen fehlen.

Hörsituation 3: In der letzten Hörsituation wird noch eine Situation geschaffen, die von Husmann nicht untersucht wird. Die Sinustöne werden wie in der vorigen Hörsituation dichotisch dargeboten, jedoch sollen auch noch die Ohrpartialtöne ausgeschaltet werden. Wie bereits aufgezeigt treten Ohrpartialtöne erst ab gewissen Schalldruckpegelgrenzen für die Primärtöne auf: 35 dB bei 350 Hz, 50 dB bei 1000 Hz, 55 dB bei 5000 Hz (siehe Absatz 4.1 *Ohrpartialtöne*). Man kann also durch die Verwendung sehr geringer Schalldruckpegel, die Ohrobertöne ausschalten. Aus diesem Grund werden in dieser Hörsituation die Schalldruckpegel der Intervalltöne auf 40 dB gesenkt. Da die verwendeten Sinustöne in einem Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 1600 Hz liegen, ist bei fast allen verwendeten Tönen eine Bildung der Ohrpartialtöne völlig auszuschließen. Nur bei den tiefsten im Experiment verwendeten Sinustönen (ca. 400 Hz - 600 Hz) können Ohrpartialtöne bei einem Primärtonpegel von 40 dB auftreten, dies aber in einer so geringen Intensität, dass diese unhörbar bleiben und das Ergebnis nicht beeinflussen können. Den Schalldruckpegel der Sinustöne noch weiter zu reduzieren, um eine Bildung

der Ohrobertöne für alle Frequenzen ausschließen zu können, ist keine Option, da die Intervalltöne von den Versuchspersonen zur Bewertung noch deutlich gehört werden sollen.

Auch die Ergebnisse dieser Hörsituation sollen wiederum mit jenen der vorigen verglichen werden, um für jedes Intervall einzeln aufzeigen zu können, ob und wie sich die Intervalleinschätzung verändert, wenn auch noch die Ohrpartialtöne fehlen. Tritt jedoch keine veränderte Wahrnehmung bei bestimmten Intervallen im Vergleich zu den vorigen Hörsituationen auf, so lässt sich das durch die Überlegungen Husmanns, denen zufolge die subjektiven Obertöne die objektiven vertreten können, nicht mehr erklären.

Die Versuchspersonen wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt: Sie mussten Erfahrung in der praktischen Musikausübung haben und zumindest ein grundlegendes Verständnis für die klassische europäische Musiktheorie nachweisen können. Zur Überprüfung wurden den Versuchspersonen vor den eigentlichen Versuchen Intervalle am Klavier vorgespielt. Damit konnte auch sichergestellt werden, dass von einem einheitlichen Konsonanzbegriff ausgegangen wurde, demzufolge Oktave, Quinte, Quarte, große und kleine Terz, sowie große und kleine Sexte als konsonant und große und kleine Sekunde, große und kleine Septime sowie der Tritonus als dissonant gelten.

Es wurde also versucht nach den Definitionen von Stumpf die Wohlgefälligkeit zu überprüfen und nicht den bloßen Wohlklang (folgendes nach Stumpf 1911, S. 47-48): Unter dem Wohlklang versteht man die reine Sinnesempfindung eines Zusammenklanges. Zur Einschätzung der Wohlgefälligkeit ist hingegen eine intellektuelle Betätigung bzw. das Erfassen der Verhältnisse von Tönen zueinander notwendig, was nur musikalisch Ausgebildeten möglich ist. Die Auswahl der Versuchspersonen nach diesen Kriterien ist ein wichtiger Punkt, da beispielsweise ein Dur-Akkord bzw. die Dur-Terz grundsätzlich im Sinne des Wohlklanges als angenehmer empfunden wird als ein Moll-Akkord oder eine Moll-Terz, was die Versuchsergebnisse beeinflussen bzw. verfälschen könnte.

Bei den dissonanten Intervallen wurden in den Versuchen sowohl der große Ganzton (Schwingungsverhältnis 8:9), als auch der kleine (9:10) verwendet. Dasselbe gilt für die kleine Septime, die in ihrer weiten Variante (5:9; Oktave - kl. Ganzton) und ihrer engen Variante (9:16; Oktave - gr. Ganzton) dargeboten wurde. Der Tritonus wurde mit einem Schwingungsverhältnis von 32:45 angenommen (gr. Ganzton + gr. Ganzton + kl. Ganzton).

Konsonanzen				Dissonanzen			
Intervall	Verh.	Frequenzen		Intervall	Verh.	Frequenzen	
Oktave	1:2	440 Hz	880 Hz	gr. Ganzton	8:9	800 Hz	900 Hz
Quinte	2:3	1000 Hz	1500 Hz	kl. Ganzton	9:10	1400 Hz	1555,56 Hz
Quarte	3:4	1100 Hz	1466,67 Hz	kl. Sekunde	15:16	1300 Hz	1386,67 Hz
gr. Terz	4:5	600 Hz	750 Hz	gr. Septime	8:15	700 Hz	1312,5 Hz
kl. Terz	5:6	1200 Hz	1440 Hz	enge kl. Sept.	9:16	900 Hz	1600 Hz
gr. Sexte	3:5	800 Hz	1333,33 Hz	weite kl. Sept.	5:9	600 Hz	1080 Hz
kl. Sexte	5:8	500 Hz	800 Hz	Tritonus	32:45	400 Hz	562,5 Hz

Abbildung 35: Im Versuch verwendete konsonante und dissonante Intervalle mit deren Schwingungsverhältnissen und Frequenzen.

In den drei Hörsituationen wurden die Sinustöne der Intervalle zwei Mal für eine Dauer von zwei Sekunden simultan abgespielt, dazwischen folgte eine Pause von zwei Sekunden. Die Reihenfolge der Intervalle wurde in jeder Hörsituation unterschiedlich gewählt. Für die Intervalltöne wurden natürlich in jeder Hörsituation die gleichen Frequenzen herangezogen, was wiederum heißt, dass beispielsweise die Oktave in allen drei Hörsituationen mit den gleichen Tönen zusammengestellt wurde, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Jedes Intervall wurde mit zwei Sinustönen, die in ihrer Frequenz zwischen 400 Hz und 1600 Hz lagen, zusammengestellt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Intervalle in möglichst unterschiedlichen Lagen auftraten. Dadurch konnten die Versuchspersonen nicht von einem immer gleich bleibenden Grundton ausgehen, wodurch sie sich auch auf kein beständiges tonales Bezugssystem einstellen konnten und jeden Zusammenklang für sich bewerten mussten. Die Hörsituationen mit dichotischer Darbietung wurden so konstruiert, dass die Verteilung von hohen und tiefen Intervalltönen auf das linke und rechte Ohr von Intervall zu Intervall zufällig wechselte. Zwischen den unterschiedlichen Hörsituationen wurde eine kurze Pause zur Erholung eingefügt. Die Versuchspersonen mussten schließlich die Intervalle bewerten und erhielten dazu einen Fragebogen auf dem sie für jedes gehörte Intervall entweder *konsonant* oder *dissonant* ankreuzen konnten.

7.3 Statistische Auswertung der erhobenen Daten

Es wurden insgesamt 21 Versuchspersonen befragt, wobei es nur zwei Kategorien zur Auswahl für jedes Intervall gab: *konsonant* oder *dissonant*. Was nun mit Hilfe eines Hypothesentests bestimmt werden soll, ist jene Anzahl der Entscheidungen, entweder für den konsonanten oder dissonanten Charakter eines Intervalls, ab der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gesagt werden kann, dass es sich um keine zufällige Entscheidung mehr handelt. Was hier also zur Anwendung kommt, ist ein zweiseitiger Hypothesentest. Aus der Fragestellung der Versuchsreihe ergeben sich folgende Hypothesen:

H_0 : Die Entscheidung für die Bewertung eines Intervalls als konsonant oder dissonant liegt bei 50 % und ist somit zufällig ($p = 0,5$).

H_1 : Es handelt sich um keine zufällige Entscheidung bei der Bewertung eines Intervalls als konsonant oder dissonant ($p \neq 0,5$).

Was nun berechnet wird, sind der Annahme- und Ablehnungsbereich für die Nullhypothese bei einer Stichprobengröße von 21 Versuchspersonen ($n = 21$) und einem Signifikanzniveau (SN) von 5 %. Aus diesen Vorgaben ergibt sich folgender Erwartungswert (μ) sowie folgende Standardabweichung (σ):

$$\mu = n \cdot p = 21 \cdot 0,5 = 10,5$$

$$\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)} = \sqrt{10,5 \cdot (1 - 0,5)} \approx 2,29$$

Für die Bestimmung des Annahmebereichs von H_0 werden jene kritischen z-Werte aus der Standardnormalverteilungs-Tabelle herangezogen, die links bzw. rechts (zweiseitiger Test) 2,5 % der Standardnormalverteilung abschneiden: $z \approx \pm 1,96$. Daraus ergeben sich folgende gerundete Grenzwerte sowie Annahme- und Ablehnungsbereiche für H_0 :

$$\mu - z \cdot \sigma = 10,5 - 1,96 \cdot 2,29 \approx 6$$

$$\mu + z \cdot \sigma = 10,5 + 1,96 \cdot 2,29 \approx 15$$

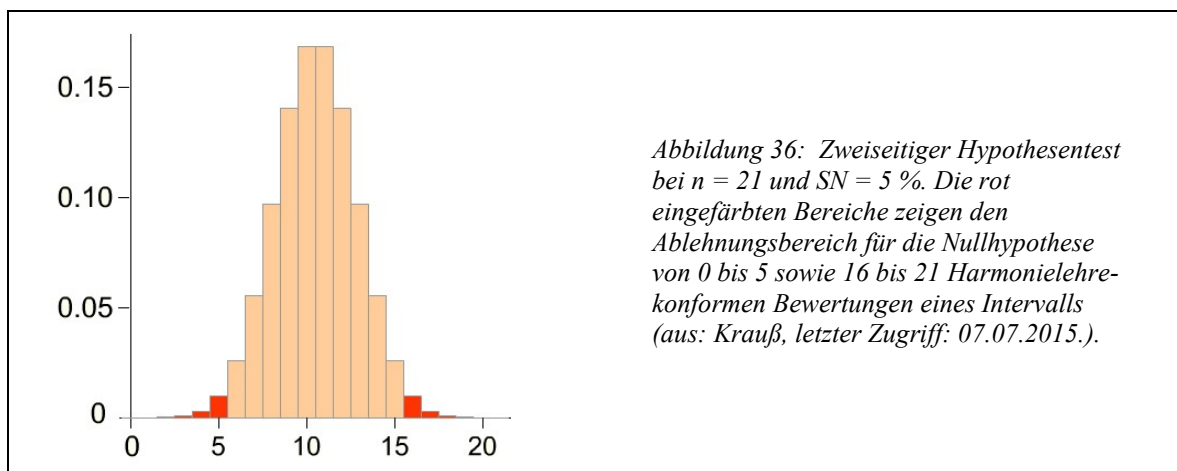
H_0 - Annahmebereich: $\{6 ; \dots ; 15\}$

H_0 - Ablehnungsbereich: $\{0 ; \dots ; 5\} \cup \{16 ; \dots ; 21\}$

In der Auswertung der erhobenen Daten, wird so vorgegangen, dass jene Bewertungen der Versuchspersonen als Harmonielehre-konform angesehen werden, bei denen sich der angekreuzte Charakter eines Intervalls mit jenem deckt, der in den bereits vorgestellten Musiktheorien bzw. Konsonanztheorien zu finden (siehe Abbildung 35: Aufteilung der Intervalle in die Kategorien *konsonant* und *dissonant*).

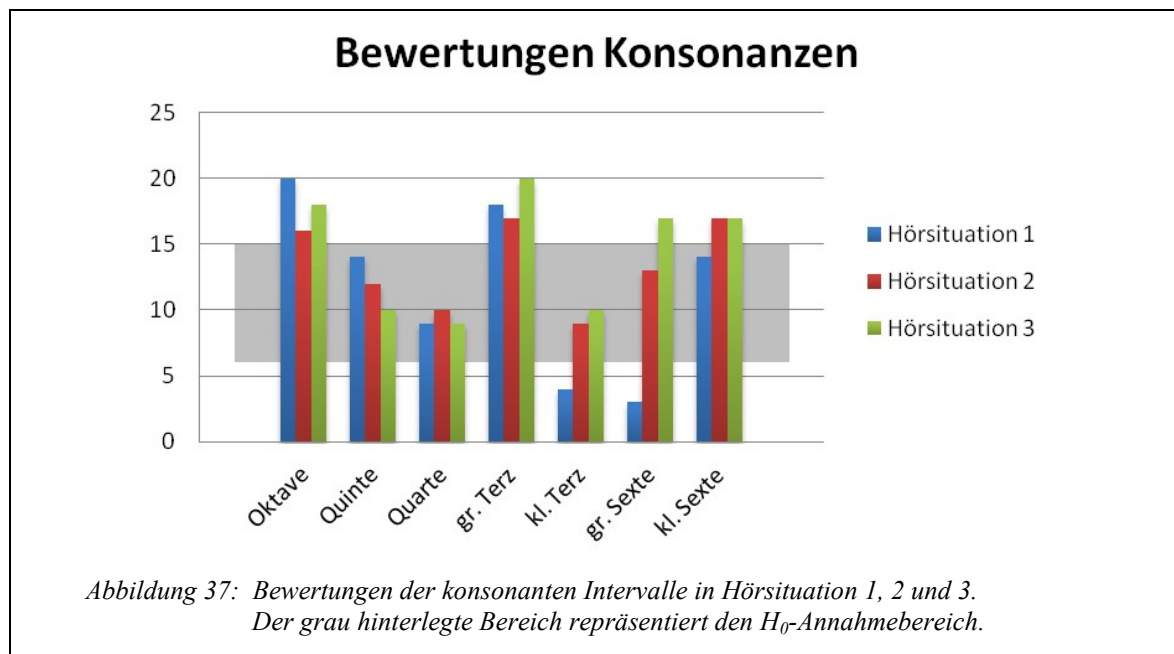
Aus dieser Vorgabe und dem errechneten Annahme- und Ablehnungsbereich für die Nullhypothese ergibt sich folgendes für die Auswertung der Konsonanzen: Haben nur 0 bis 5 Versuchspersonen ein konsonantes Intervall als solches wahrgenommen, wird H_0 verworfen und die Gegenhypothese, welche in diesem Fall besagt, dass dieses Intervall signifikant als dissonant wahrgenommen wurde, angenommen. Haben hingegen 16 bis 21 Versuchspersonen ein konsonantes Intervall tatsächlich auch als konsonant wahrgenommen, so wird dieses Intervall als signifikant konsonant gewertet.

Andersrum verhält es sich bei den Dissonanzen: Für nur 0 bis 5 Harmonielehre-konforme Bewertungen eines solchen Intervalls wird angenommen, dass dieses signifikant konsonant wahrgenommen wurde. Bei 16 bis 21 systemkonformen Bewertungen hingegen werden die Dissonanzen auch als signifikant dissonant wahrgenommen gesehen. Für 6 bis 15 entsprechende Bewertungen wird in beiden Fällen (Konsonanzen und Dissonanzen) H_0 , also dass es sich um eine zufällige Entscheidung handelt, weiterhin als richtig angenommen.



7.4 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen

Es handelt sich bei diesen Versuchen zum Konsonanzempfinden um eine Studie, in der untersucht wird, ob sich die Unterscheidungsfähigkeit zwischen konsonant und dissonant in den unterschiedlichen Situationen ändert. Aus diesen Ergebnissen können danach Rückschlüsse auf die möglichen Faktoren für die Intervalleinschätzungen gezogen werden. Mögliche Erklärungsansätze sollen zwar geliefert werden, jedoch bedarf es sicher weiterer Forschungen bzw. größerer Studien, um alles restlos aufzuklären und den Einfluss der unterschiedlichen Faktoren zu prüfen. In den folgenden Ausführungen wird auf jedes Intervall einzeln eingegangen, da auch jedes Intervall durch die unterschiedlichen Hörsituationen eine andere Veränderung erfährt. Es werden auch mehrere verschiedene Konsonanztheorien zu Erklärungs Zwecken herangezogen, da in den unterschiedlichen Hörsituation auch unterschiedliche Faktoren ins Zentrum der Untersuchungen rücken. Es ist demnach nicht zielführend sich auf eine Theorie zu fixieren, auch wenn die Autokorrelationstheorie in den weiteren Ausführungen eine zentrale Rolle einnimmt, da diese vor allem für die Deutung der Ergebnisse in der dritten Hörsituation am aufschlussreichsten erscheint.



Wie die Bewertungen der Oktave in den drei unterschiedlichen Hörsituationen zeigen, wurde dieses Intervall von den Versuchspersonen stets signifikant als konsonant wahrgenommen. In der ersten Hörsituation treten sowohl Kombinationstöne, als auch

Ohrpartialtöne auf, die natürlich die Oktave als reinste Konsonanz bestätigen. Aufgrund der Tatsache, dass durch die subjektiven Verzerrungsprodukte gegenüber den Teiltönen, wie sie bei Klängen mit harmonischen Teiltönspektrum auftreten, nichts Neues entsteht sondern wiederum nur dieser harmonische Aufbau, bleibt der Charakter dieses Intervalls auch bei der Verwendung von Sinustönen erhalten. Die Bewertung dieses Intervalls als konsonant in der zweiten Hörsituation, in der die Kombinationstöne durch die dichotische Darbietung nicht gebildet werden können, lässt sich nur mit der Koinzidenz der Ohrpartialtöne erklären, wenn man nach einer Erklärung mittels der nichtlinearen Verzerrungsprodukte sucht. Das Erkennen der Oktave als konsonantes Intervall in der dritten Hörsituation ohne Ohrpartialtöne, lässt sich hingegen nur noch mit der Oktavähnlichkeit der Sinustöne bzw. mit der Autokorrelationstheorie schlüssig erklären. Diese Theorie kommt als Einzige ohne Teiltöne, ausbleibende Schwebungen bzw. Rauigkeit und subjektive Verzerrungsprodukte aus und kann als Einzige in der dritten Hörsituation bestehen. Die subjektiven nichtlinearen Verzerrungsprodukte in Hörsituation 1 und 2 lassen zwar ein schwächeres „Teiltongerüst“ entstehen, das einem harmonischen Klang entspricht und somit den konsonanten Charakter unterstützt, wie Hörsituation 3 jedoch zeigt, funktioniert die Intervalleinschätzung bei der Oktav auch ohne deren Einfluss.

Ein ähnliches Bild wie bei der Oktave zeigt sich in den Ergebnissen für die große Terz. Auch dieses Intervall wurde in allen drei Hörsituationen signifikant als konsonant wahrgenommen. Da wiederum in der dritten Hörsituation weder Kombinationstöne noch Ohrpartialtöne auftreten können, lässt sich auch dieses Ergebnis am ehesten mit Hilfe der Autokorrelationstheorie, also der Koinzidenz von Nervenimpulsen, erklären. Auch die bereits angesprochene Bildung eines virtuellen Grundtons, der auch bei dichotischer Darbietung entstehen kann und sich förderlich auf den harmonischen Klangeindruck eines konsonanten Intervalls auswirkt, kann eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis sein. Das Komplementärintervall zur großen Terz, also die kleine Sexte, weicht leicht von diesen Ergebnissen ab: Die kleine Sexte wurde in der ersten Hörsituation nicht signifikant als konsonant wahrgenommen, in den anderen beiden jedoch schon. Da in Hörsituation 1 die Anzahl der korrekten Bewertungen nur knapp in den Bereich der zufälligen Entscheidung fällt, lässt sich diese Unregelmäßigkeit in den Ergebnissen am ehesten durch die geringe Anzahl an Versuchspersonen erklären. Grundsätzlich wurde das Intervall jedoch eher konsonant eingeschätzt, was sich wiederum mit der Autokorrelationstheorie erklären lässt.

Fehleinschätzungen wie bei der kleinen Sexte sind auch bei Quinte und Quarte zu finden, wobei sie bei diesen Intervallen in einem viel größerem Ausmaß festzustellen sind. Sowohl die Quinte als auch die Quarte wurden in keiner der drei Hörsituationen als signifikant konsonant wahrgenommen, sondern fallen in den Annahmebereich für H_0 (zufällige Entscheidung). Die Probleme bei der Beurteilung von Intervallen bei dichotischer Darbietung, entsprechend Hörsituation zwei dieser Versuche, beschreibt auch Husmann. Was sich jedoch nicht bestätigt, ist der von Husmann beschriebene Dissonanz-Charakter der Quinte, die in dessen Versuche häufig als Tritonus gehört wurde (Husmann 1953, S. 36). Da Husmann jedoch keinen Versuch mit Sinustönen bei normaler Darbietung konstruierte, wie dies in Hörsituation 1 der Fall ist, konnte er auch nicht feststellen, dass bereits in dieser Situation Probleme auftreten können. Hierfür kann es mehrere Gründe geben:

Natürlich handelt es sich für die Versuchspersonen um eine fremde Klangwelt, wenn nur ungewohnte Sinustöne verwendet werden. Wie die Ergebnisse für Quinte und Quarte deutlich zeigen, fällt die richtige Einschätzung um einiges schwerer, wenn das gewohnte Teiltonspektrum fehlt. Dies widerspricht natürlich ein Stück weit der Autokorrelationstheorie, welche die Konsonanz auch ohne Teiltöne erklärt. Die Gewohnheit, Töne mit Teiltonspektrum zu hören, scheint aber doch eine nicht unwesentliche Rolle zu spielen, was die Theorien, die darauf beruhen, bestätigt. Wie die Beurteilungen von Quinte und Quarte auch zeigen, reichen die nichtlinearen Verzerrungsprodukte in der ersten bzw. zum Teil auch in der zweiten Hörsituation (nur Ohrpartialtöne) wohl nicht aus, um den harmonischen Aufbau eines natürlichen Klanges mit Teiltonspektrum zu ersetzen.

Weiters werden Sinustöne generell meist als sehr unangenehm empfunden, wie das auch von Versuchspersonen mehrmals geäußert wurde. Dieses negative Empfinden wird, den Aussagen der Probanden zufolge, umso stärker, je lauter die Sinustöne dargeboten werden und je höher die Frequenzen sind. Dass die große Terz und kleine Sexte besser abgeschnitten haben als Quinte und Quarte, könnte also auch an den unterschiedlichen Frequenzen der Intervalltöne liegen: Die Frequenzen der Quinte und Quarte liegen zwischen 1000 Hz und 1500 Hz, jene von großer Terz und kleiner Sexte zwischen 500 Hz und 800 Hz. Dieser Umstand lässt sich mit dem Begriff der *sensorischen Konsonanz* nach Terhardt etwas näher erklären (folgendes nach Terhardt 1976/77, S. 122-123): Jedes Geräusch bzw. jeder Klang und jeder Ton kann hinsichtlich seines Wohlklanges beurteilt

werden. Neben der Rauigkeit, die ein Klang hervorbringen kann, sind auch dessen Stärke und Energieverteilung im Frequenzbereich ausschlaggebend für den Grad des Wohlklanges. Die höhere Lage der Quinte und der Quarte könnte also durchaus eine Auswirkung auf die Einschätzung des Intervalls gehabt haben. In der ersten und der zweiten Hörsituation spielt sicher auch die hohe Intensität der Sinustöne eine entscheidende Rolle für die Bewertung dieser Intervalle.

Auch könnte für die Fehleinschätzung verantwortlich sein, dass die konsonanten Intervalle, wenn die Klangbestandteile nicht interagieren können (was in diesem Fall zutrifft, da keine Obertöne vorhanden sind und die Intervalltöne in ihrer Frequenz zu weit voneinander entfernt sind) in einer gespreizten Intonation bevorzugt werden (Terhardt/Zick 1975, S. 273). Eine Abweichung der Intonation von den reinen Intervallen würde auch zu langsamen Schwebungen zwischen nichtlinearen Verzerrungsprodukten führen, was dem Wohlklang förderlich sein kann (Miskiewicz/Rogala 2003, S. 422).

Weiters könnte zumindest für die erste Hörsituation, in der Kombinationstöne entstehen können, die Intensität des quadratischen Differenztones eine Erklärung für die Einschätzung der Quinte und Quarte als nicht signifikant konsonant liefern. Wie im Kapitel 4.3 (*Quadratischer Differenzton*) angesprochen, ist die Intensität des D_{11} auch von der Frequenz der Primärtöne abhängig. Da die Intervalltöne der Quinte und Quarte über 1000 Hz liegen, weist auch der sonst meist hörbare quadratische Differenzton einen nur sehr geringen Pegel auf. Womöglich konnte dadurch der konsonante Charakter dieser Intervalle nicht ausreichend von der Position des D_{11} bekräftigt werden. Der quadratische Differenzton der großen Terz und der kleinen Sexte ist durch die Lage der Intervalltöne (unter 1000 Hz) deutlicher hörbar.

Noch deutlicher werden die Probleme bei der Bewertung der Intervalle bei der kleinen Terz und der großen Sexte. Beide Intervalle weisen ein einfaches Schwingungsverhältnis auf (5:6 bzw. 3:5), welches laut Autokorrelationstheorie zu häufig koinzidierenden Nervenimpulsen und in weiterer Folge zu einem konsonanten Charakter in allen drei Hörsituationen führen müsste. In der ersten Hörsituation, in welcher die subjektiven Verzerrungsprodukte am Klang beteiligt sind, weisen auch die Kombinations- bzw. Ohrpartialtöne eine günstige Lage auf bzw. bilden gemeinsam mit den Primärtönen einen harmonischen Aufbau. Trotzdem wurden gerade in dieser Hörsituation sowohl die kleine Terz als auch die große Sexte als signifikant dissonant wahrgenommen. Dieser Umstand ließe sich vielleicht mit der viel kritisierte Schwebungstheorie von Hermann von

Helmholtz bzw. mit der aktuelleren Version von Plomp und Levelt erklären: Die verwendeten Sinustöne der kleinen Terz liegen bei 1200 Hz und 1440 Hz, was eine Mittenfrequenz von 1320 Hz ergibt. Berechnet man daraus die Frequenzgruppenbreite mit 20 % der Mittenfrequenz, so erhält man einen Wert von 264 Hz. Die beiden Primärtöne fallen also in eine Frequenzgruppenbreite, können sich dadurch gegenseitig beeinflussen und Rauigkeit erzeugen. Das Gleiche gilt für die große Sexte, für die die Frequenzen 800 Hz und 1333,33 Hz verwendet wurden. Da in Hörsituation 1 auch Ohrpartialtöne in nicht geringer Lautstärke produziert werden, ist davon auszugehen, dass der erste Oberton des tieferen Primärtons (1600 Hz) einen rauen Klangeindruck gemeinsam mit dem höheren Primärton (1333,33 Hz) des Intervalls hervorbringt. Beide Töne fallen wiederum in eine Frequenzgruppenbreite, die in diesem Fall 293,33 Hz beträgt.

Wie bereits erwähnt, führen auch die Untersuchungen von Plomp und Levelt (1965, S. 555) zur Erkenntnis, dass Klangkomponenten, die in eine gemeinsame Frequenzgruppenbreite fallen, zu einem dissonanten Charakter eines Intervalls führen. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, ist der Grad der Konsonanz bzw. Dissonanz abhängig vom Frequenzabstand zweier Töne zueinander. Nimmt man wieder die kleine Terz mit den Frequenzen 1200 Hz und 1440 Hz aus den Versuchen als Beispiel, so weisen diese einen Frequenzabstand von ca. 90 % der Frequenzgruppenbreite auf. Zwar ist man in diesem Bereich bereits weit entfernt von der maximalen Dissonanz bei ca. 25 % der Frequenzgruppenbreite, jedoch ist ein unbeeinflusstes Konsonanzempfinden erst festzustellen, wenn der Frequenzabstand die Frequenzgruppenbreite überragt.

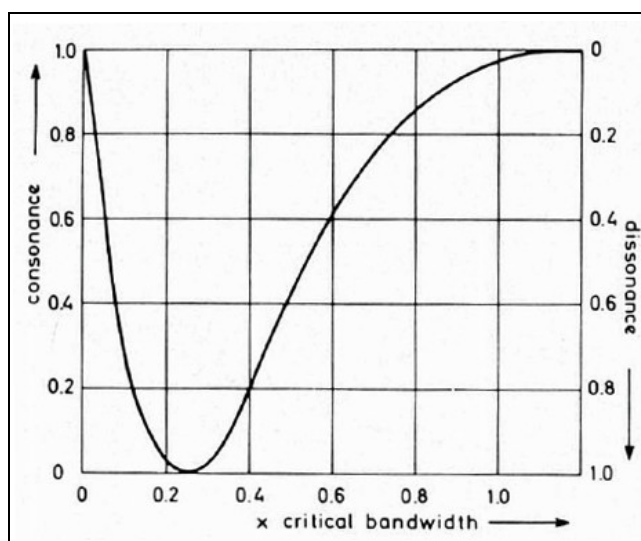
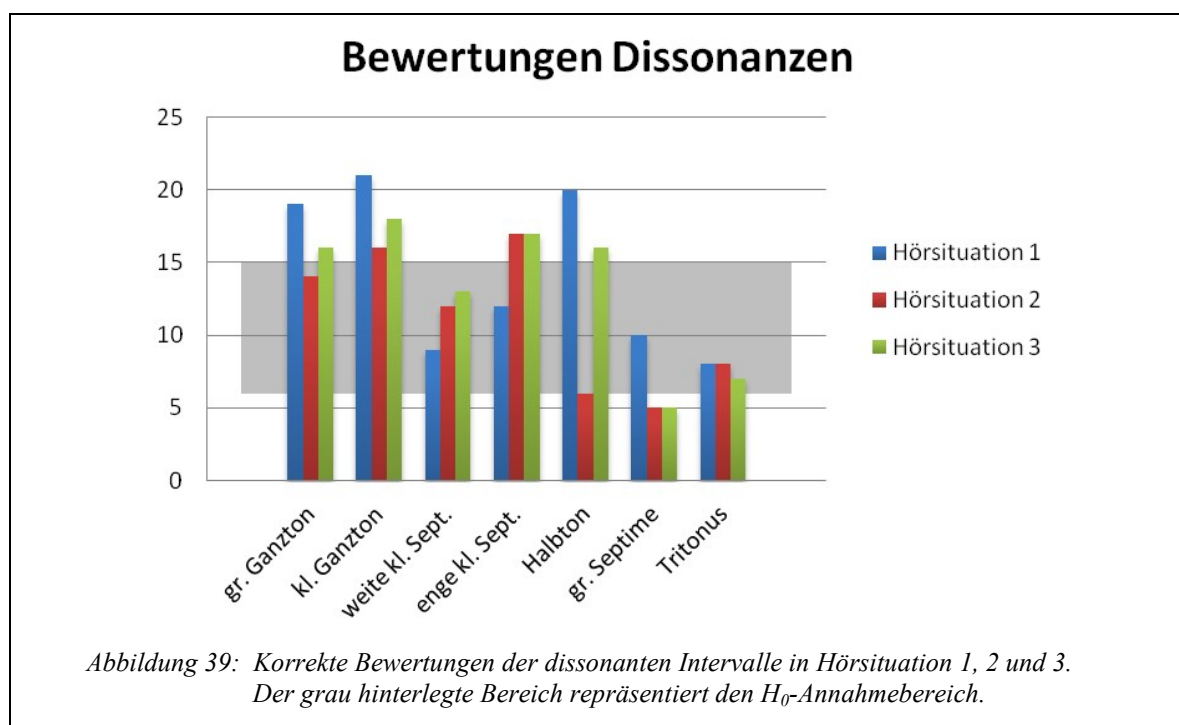


Abbildung 38: Dissonanz- bzw. Konsonanzkurve von einem Sinustonintervall in Abhängigkeit vom Frequenzabstand. Als Einheit für den Frequenzabstand dient die Frequenzgruppenbreite (aus: Plomp/Levelt 1965, S. 556).

Da Schwebungen und Rauigkeit bei einer dichotischen Darbietung nicht entstehen können, wird klar, warum die kleine Terz und die große Sexte nur in der ersten Hörsituation signifikant als dissonant bezeichnet wurden. Beide Intervalle verbessern sich in der zweiten und dritten Hörsituation: Die Bewertungen der kleinen Terz fallen nur noch in den Bereich der zufälligen Entscheidung, wie das auch bei Quinte und Quarte in allen Hörsituationen der Fall ist. Die große Sexte wird in der dritten Hörsituation sogar signifikant als konsonant empfunden. Wie diese Ergebnisse zeigen, ist die Frequenzgruppenbreite ein Orientierungspunkt für die Versuchspersonen, wenn das gewohnte harmonische Teiltongerüst nicht mehr vorhanden ist. Mit Rauigkeit wird automatisch Dissonanz assoziiert, wenn andere Orientierungspunkte, die auf eine Konsonanz hinweisen könnten, zu schwach ausfallen oder gänzlich fehlen.

Da die nichtlinearen Verzerrungsprodukte des Gehörs, die bei der konsonanten kleinen Terz und großen Sexte eine günstige Lage im Verhältnis zu den Primärtönen aufweisen, in der ersten Hörsituation zu keinem Konsonanzempfinden geführt haben, wird deren Position in den Konsonanztheorien natürlich weiter geschwächt.

Schwebungen und Rauigkeit spielen zwar in der musikalischen Praxis, wie bereits beschrieben, häufig nur eine untergeordnete Rolle, trotzdem sind diese aber für viele ein ständiger Begleiter beim Stimmen von Instrumenten. Diese Gewohnheit könnte ebenfalls ein Grund dafür sein, warum Schwebungen und Rauigkeit als Indikator für Dissonanz bzw. Verstimmung so vertraut sind.



Dass jedoch Schwebungen bzw. Rauigkeit nicht alleine dafür verantwortlich sein können, dass sich die konsonanten Intervalle von den dissonanten abheben, zeigen die Versuchsergebnisse bei den Ganztönen. In der ersten Hörsituation werden sowohl der große (8:9) als auch der kleine Ganzton (9:10) signifikant als dissonant wahrgenommen. Hier fällt es noch schwer einen eindeutigen Grund für diese deutliche Einschätzung dieser Intervalle zu finden, da bei der normalen Darbietung sowohl Rauigkeit als auch Kombinations- und Ohrpartialtöne entstehen können. Da beide Faktoren in diesem Fall auf ein dissonantes Intervall hinweisen, können auch beide für den Dissonanzcharakter verantwortlich sein. In der zweiten Hörsituation fallen Schwebungen und Kombinationstöne jedoch weg, was sich auch in einer leichten Abnahme der korrekten Einschätzungen dieser Intervalle zeigt. Der kleine Ganzton bleibt weiterhin signifikant dissonant, während der große Ganzton knapp in den Bereich der zufälligen Entscheidung rutscht. Diese Ergebnisse kann man mit der Theorie Husmanns dahingehend erklären, dass die Verzerrungen des Gehörs gerade noch ausreichen, um die koinzidierenden Ohrpartialtöne des großen Ganztones zu produzieren, und dass dadurch manchen Versuchspersonen dieses Intervall als schwache Konsonanz erscheint (Husmann 1953, S. 39). Aber auch die Theorie der koinzidierenden subjektiven Obertöne versagt, genauso wie die Schwebungstheorie, wenn man die Ergebnisse der dritten Hörsituation betrachtet. Sowohl der große als auch der kleine Ganzton werden in dieser Situation ohne Rauigkeit und ohne subjektive nichtlineare Verzerrungsprodukte als dissonant erkannt. Dieses Ergebnis spricht für die Autokorrelationstheorie, die in diesem Fall dahingehend zu deuten ist, dass die im Takt der Schwingungen abgegebenen Nervenimpulse nicht oft genug koinzidieren, um ein Konsonanzempfinden hervorzurufen. Weiters lässt sich nur durch die Autokorrelationstheorie erklären, warum sich die kleine Terz und die große Sexte nach Wegfall der Rauigkeit in Richtung Konsonanz hin verbessern und zumindest in den Bereich der zufälligen Entscheidung fallen, während die Ganztöne weiterhin als Dissonanzen erkannt werden.

Ein sehr interessantes Bild zeigt sich auch bei den Einschätzungen der weiten kleinen Septime mit einem Schwingungsverhältnis von 5:9 und dem Tritonus mit 32:45. Beide Intervalle fallen in ihrer Bewertung in allen drei Hörsituationen in den Bereich der zufälligen Entscheidung, werden also weder signifikant als dissonant noch als konsonant wahrgenommen. Da die Ergebnisse in Hörsituation 3 nicht erheblich von jenen in Hörsituation 1 und 2, das heißt mit Kombinationstönen bzw. nur mit Ohrpartialtönen,

abweichen, ist davon auszugehen, dass die nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs wiederum keine wesentliche Rolle spielen. Das Schwingungsverhältnis der weiten kleinen Septime ist im Grunde genommen ein relativ einfaches, bei dem Koinzidenzen der Nervenimpulse häufiger auftreten. Darin ist wohl auch der Grund dafür zu sehen, dass dieses Intervall von vielen Versuchspersonen nicht als dissonant wahrgenommen wurde. Hingegen weicht das Schwingungsverhältnis 32:45 auf den ersten Blick erheblich von einem einfachen Zahlenverhältnis ab, was eigentlich zwangsläufig zu einem Dissonanzempfinden führen müsste. Warum jedoch auch dieses Intervall in allen drei Hörsituationen in den H_0 -Annahmebereich fällt und daher nicht als eindeutige Dissonanz zu werten ist, lässt sich mit der bereits angesprochenen Unschärfe der Autokorrelation erklären: Da die Koinzidenzprüfung von Impulsketten mit einer gewissen Unschärfe erfolgt, kann das Schwingungsverhältnis 32:45 als 5:7 gewertet werden. Demzufolge ist dieses Verhältnis sogar einfacher als jenes der kleinen Sexte (5:8) und daher als schwache Konsonanz zu werten (Fricke 2009, S. 113).

Auch beim Halbton sprechen die Einschätzungen der Versuchspersonen für die Autokorrelationstheorie und gegen die nichtlinearen Verzerrungsprodukte. Vergleicht man die Bewertungen des Halbtons in Hörsituation 1 und 3, so stellt man fest, dass dieses Intervall in beiden Hörsituationen als dissonant eingestuft wurde. Wären Verzerrungsprodukte oder Schwebungen bzw. Rauigkeit die Ursache für diese Einschätzung, so würden diese beiden Ergebnisse voneinander abweichen. Nur in den Ergebnissen der zweiten Hörsituation, in der die Anzahl der korrekten Bewertungen knapp in den Bereich der zufälligen Entscheidung und beinahe sogar in den Konsonanzbereich fällt, ist ein Ausreißer festzustellen. Diese Fehleinschätzung weicht völlig von den erwarteten Werten ab, was sich nur dadurch erklären lässt, dass in der zweiten Hörsituation (dichotische Darbietung) der Halbton als erstes Intervall dargeboten wurde. Durch die plötzliche Änderung der Darbietung und dem damit verbundenen Verlust von Schwebungen und Rauigkeit als Orientierungshilfe, mussten sich die Versuchspersonen auf diese fremde Klangwelt erst einstellen. Da der Halbton das erste Intervall in dieser neuen Situation war, hatten die Probanden noch keine Intervalle zum Vergleich gehört, was die Einschätzung natürlich erheblich erschwert. Zur genauen Überprüfung dieser These sind aber sicher weitere Versuche, in denen man die Position des Halbtons in der zweiten Hörsituation verändert, notwendig.

Etwas schwieriger zu interpretieren sind die Versuchsergebnisse der engen kleinen Septime (9:16) und der großen Septime (8:15). Dass die enge kleine Septime in Hörsituation 2 und 3 signifikant als dissonant wahrgenommen wurde, entspricht vollkommen den Erwartungen und kann wiederum auf die Koinzidenzprüfung von Nervenimpulsen, die aufgrund des komplizierten Schwingungsverhältnis nicht so häufig zusammenfallen, zurückgeführt werden. Warum die Einschätzung dieses Intervalls jedoch gerade in der ersten Hörsituation, in der Rauigkeit und auch die ungünstige Lage der nichtlinearen Verzerrungsprodukte den dissonanten Charakter eigentlich unterstützen, in den Bereich der zufälligen Entscheidung fällt, widerspricht den anderen Ergebnissen und ist wohl als Ausreißer zu werten. Die große Septime hingegen, wird entgegen der Autokorrelationstheorie, die uns dieses Intervall aufgrund ihres Schwingungsverhältnisses als dissonant einstufen lässt, in der zweiten und dritten Hörsituation signifikant als Konsonanz gehört. Nur in der ersten Hörsituation liegt die Anzahl der Harmonielehre-konformen Bewertungen zumindest im Annahmehereich für eine zufällige Entscheidung, was sich wohl auf den raueren Klangeindruck bei normaler Darbietung zurückführen lässt. Sowohl die Einschätzungen der großen Septime als auch jene der engen kleinen Septime weichen also in einigen Hörsituationen von den Erwartungen ab und es wird wohl notwendig sein, diese Intervalle in einer größer angelegten Versuchsreihe noch einmal zu überprüfen, um eine schlüssige Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen.

Zusammenfassend kann man nach der genauen Betrachtung der Ergebnisse dieser Versuchsreihe sagen, dass wohl mehrere Faktoren für die Einschätzung eines Intervalls eine Rolle spielen. Was zur Bewertung eines Intervalls als konsonant führt, ist abhängig von der jeweiligen Hörsituation und den damit verbundenen noch wahrnehmbaren Orientierungspunkten. Der Umstand, dass sich die Versuchspersonen bereits in der ersten Hörsituation, in der sich Schwebungen bzw. Rauigkeit und nichtlineare Verzerrungsprodukte bilden können, zum Teil sehr schwer getan haben, weist darauf hin, dass das harmonische Teiltongerüst schon eine wichtige Rolle für die Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen spielt. Darauf weisen auch die bereits angesprochenen Untersuchungen der Konsonanzempfindung bei inharmonischen Teiltonspektren von William A. Sethares (1993) sowie Jenő Keuler (1997) hin. Wenn durch Spreizung oder Stauchung der Teiltonreihe die Schwingungsverhältnisse der als konsonant empfundenen Intervalle verändert werden können, so muss das Teiltonspektrum einen Einfluss auf das Konsonanzempfinden haben. Da in dieser

Versuchsreihe ausschließlich Sinustöne verwendet wurden, muss man für die zum Teil weiterbestehende Unterscheidungsfähigkeit von konsonanten und dissonanten Intervallen jedoch auf andere Konsonanztheorien zurückgreifen.

Nichtlineare Verzerrungsprodukte können zwar ein unterstützender Faktor sein, indem diese bei einfachen Schwingungsverhältnissen wieder nur mit den Obertönen oder Primärtönen zusammenfallen bzw. in einem harmonischen Verhältnis zu diesen stehen; die wirkliche Ursache für die Konsonanz sind sie aber nicht. Es scheint sogar die Frequenzgruppenbreite bzw. Rauigkeit eine wichtigere Orientierungshilfe zu sein als die Kombinationstöne, sobald die objektiven Obertöne fehlen. Das wird bei der Einschätzung der kleinen Terz deutlich, die signifikant als dissonant wahrgenommen wurde, solange eine normale Darbietung gewählt wurde und Rauigkeit entstehen konnte. Wären die Kombinationstöne in ihrer Wichtigkeit für die Konsonanzerkennung über die Frequenzgruppenbreite zu stellen, so hätten die Versuchspersonen wohl erkannt, dass die stärksten Verzerrungsprodukte (quadratischer und kubischer Differenzton) einen Dur-Akkord gemeinsam mit den Primärtönen bilden, was den Konsonanzcharakter fördert.

Auch die Koinzidenz von Ohrpartialtönen bei dichotischer Darbietung durch die sich kreuzenden Hörbahnen sind wohl nicht, wie von Husmann angenommen, entscheidend für die Trennung der konsonanten Intervalle von den Dissonanzen. Das legen auch die Versuchsergebnisse nahe: Die Anzahl der Harmonielehre-konformen Intervallbewertungen in der dritten Hörsituation, ohne jegliche nichtlineare Verzerrungsprodukte, weicht für diese Annahme in zu geringem Ausmaß von der zweiten Hörsituation mit Ohrpartialtönen ab. Generell sind die interessantesten Ergebnisse dieser Versuche wohl jene der dritten Hörsituation, in der alle Anhaltspunkte für eine Intervalleinschätzung, die in den unterschiedlichen Konsonanztheorien sogar als Ursache für die Konsonanz gewertet werden, ausgeschaltet sind. Wenn weder objektive Obertöne noch Kombinationstöne, Rauigkeit oder subjektive Obertöne entstehen, so können diese Konsonanztheorien nicht für diese Hörsituation zur Erklärung herangezogen werden. Eine Theorie die weiter bestehen kann und für die weitestgehend auch die Versuchsergebnisse sprechen, ist die Autokorrelationstheorie.

Es kann aber auch sein, dass es sich bei der Erkennung von konsonanten Intervallen, auch in der dritten Hörsituation, um einen gelernten Mustererkennungsprozess handelt (folgendes nach Terhardt 1976/77, S. 132): Durch die Wahrnehmung von komplexen

Tönen mit harmonischem Teiltonspektrum erlernt das Hörsystem das Erkennen von konsonanten Intervallen. Nur bei den Konsonanzen wird auch ein virtueller Grundton (Residualton) entsprechend eines harmonisch aufgebauten Klanges gebildet, der zur Abhebung dieser Intervall von den Dissonanzen führt.

Das Erlernen des harmonischen Obertonaufbaus sowie der Intervalle zwischen den Obertönen beruht größtenteils auf der Analyse von Sprachlauten (folgendes nach Terhardt 1982, S. 33): Vor allem in der auditiven Verarbeitung von Sprache wird das Gehör immer vor die Aufgabe gestellt die Spektraltonhöhen und die dazwischen liegenden Intervalle der stimmhaften Sprachlaute zu untersuchen. Dabei werden diese Intervalle vom Hörsystem gespeichert und in weiterer Folge auf die Verarbeitung von musikalischen Klängen angewendet.

Dass manche Intervalle in allen drei Hörsituationen nicht systemkonform erkannt wurden, was eigentlich auch der Autokorrelationstheorie widerspricht, liegt wohl an den für die Versuchspersonen sehr ungewohnten Sinustönen. Die Erfahrung lehrt uns, dass Obertöne ein wichtiger Indikator für den Charakter eines Intervalls sind, auch wenn diese nicht die alleinige Ursache für die Konsonanz sein können, wie die Experimente mit Sinustönen zeigen. Dasselbe gilt für Rauigkeit und Schwebungen, die als Indikator für Dissonanz bekannt sind. Zwar haben sie in der praktischen Musikausübung keinen wesentlichen Einfluss auf das Konsonanzempfinden, jedoch erlernen viele das Stimmen von Instrumenten, wo bewusst möglichst stationären Töne erzeugt werden, anhand von Schwebungen und Rauigkeit. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, klammern sich die Probanden in diesen ungewohnten Hörsituationen an jene bekannten Anhaltspunkte, die noch vorhanden sind. Dass Erfahrung und auch Übung ein weiterer wichtiger Faktor ist, stellt auch Husmann bei seinen Versuchen zum Konsonanzempfinden bei dichotischer Darbietung fest (Husmann 1953, S. 37). Man kann also durch Übung die richtige Einschätzung von Intervallen in vorerst fremden Hörsituationen erlernen.

Außerdem sind auch die reinen Intervalle mit den einfachen Schwingungsverhältnissen nicht immer diejenigen, die am angenehmsten empfunden werden. Dass die temperierten Konsonanzen im direkten Vergleich meist sogar besser abschneiden als die reinen (Miskiewicz/Rogala 2003, S. 424), könnte ein weiterer Grund dafür sein, dass in den Versuchen mit ausschließlich reinen Intervallen manche als konsonant bekannte Intervalle nicht systemkonform eingeschätzt wurden.

Weiters ist es wohl auch notwendig die strenge Dichotomie zwischen Konsonanz und Dissonanz zu überdenken. Eine Abstufung der Konsonanzen nach deren Reinheitsgrad wird zwar in fast allen Konsonanztheorien vorgeschlagen, aber dass auch als dissonant bekannte Intervalle aufgrund ihres Schwingungsverhältnisses im Sinne der Autokorrelationstheorie durchaus als schwache Konsonanz eingestuft werden können, ist noch nicht etabliert. Dazu bedarf es aber sicher noch weiterer Forschungen und auch Studien, die eine genauere Bewertung in mehrstufigen Skalen zulassen.

8. Conclusio

Wie die Untersuchungen dieser Arbeit gezeigt haben, können die nichtlinearen Verzerrungsprodukte des Gehörs die musikalische Wahrnehmung durchaus beeinflussen. Gerade die stärksten Verzerrungsprodukte, also der quadratische und der kubische Differenzton, können einen durchaus wahrnehmbaren Pegel annehmen. Auch die Ohrpartial- und die Summationstöne können hörbar sein und somit das Gesamtklangbild beeinflussen. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass diese Verzerrungsprodukte nur unter gewissen Voraussetzungen entstehen können. Neben den Schalldruckpegeln und den Frequenzen der Primärtöne spielen vor allem die Verdeckung, Schwebungen, sowie die ebenmerkliche Pegeländerung eine zentrale Rolle für die Hörbarkeit der Kombinations- und Ohrpartialtöne.

Ebenso wichtig wie die spezifischen Eigenschaften jedes nichtlinearen Verzerrungsproduktes des Gehörs unter Laborbedingungen ist aber auch die Untersuchung, wie sich diese unter den Umständen normaler praktischer Musikausübung verhalten und welchen Einfluss sie in diesen Situationen auf die Wahrnehmung haben. Die vorgestellten Konsonanztheorien von Hermann von Helmholtz, Paul Hindemith und Heinrich Husmann beschäftigen sich wenig mit diesen natürlichen Bedingungen, was zu einer Überschätzung der Bedeutung der Kombinations- und Ohrpartialtöne führt. Die theoretischen Ausführungen dieser drei Wissenschaftler ergeben zwar ein klares, in sich stimmiges Bild, welches den Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz schlüssig zu erklären scheint, jedoch geht man meist von starren Klängen aus, die in der musikalischen Praxis nur selten vorkommen. In der Praxis werden die Verzerrungsprodukte nämlich durch natürliche Fluktuationen geschwächt oder können erst gar nicht entstehen, was natürlich die Frage aufwirft, ob diese überhaupt die Ursache für die Ausnahmestellung der Konsonanz sein können. Der möglichen Kritik, dass die nichtlinearen Verzerrungsprodukte sehr schwach ausfallen können, scheinen sich Helmholtz, Hindemith und Husmann durchaus bewusst zu sein und so betonen alle drei die Bedeutung der Obertöne. Die Obertöne bzw. das Teiltonspektrum bilden auch die Grundlage mancher anderer Konsonanztheorien. Untersuchungen von Intervalleinschätzungen bei gestauchten und gespreizten Teiltonreihen scheinen diese Grundlage zu bestätigen (Sethares 1993; Keuler 1997).

Auch in der Theorie Husmanns nehmen die Obertöne schließlich die zentrale Rolle ein, wobei die subjektiven Obertöne die objektiven bei Zusammenklängen mit Sinustönen ersetzen. Das muss natürlich auch kritisch gesehen werden, da diese noch schwächer sind als die Kombinationstöne oder, wenn der Grad der Verzerrung nicht ausreicht, gar nicht entstehen, was Husmann in seinen Versuchen zum Konsonanzempfinden nicht beachtet. Trotz dieser Kritikpunkte ist jedoch klar, dass die Kombinationstöne und subjektiven Obertöne, wenn diese denn entstehen können und hörbar sind, den konsonanten Charakter von Intervallen mit einfachen Schwingungsverhältnissen fördern, da sie unter diesen Umständen immer in einer günstigen, harmonischen Beziehung zu den Primärtönen stehen.

Nicht zuletzt aufgrund der angesprochenen Kritikpunkte, konnten sich die Konsonanztheorien auf der Basis von nichtlinearen Verzerrungen des Gehörs nicht bis heute halten und es rückten andere Theorien, die auf dem heutigen Wissensstand der Neurophysiologie und Psychoakustik beruhen, ins Zentrum der musikwissenschaftlichen Untersuchungen zur musikalischen Wahrnehmung. Eine der bedeutendsten aktuellen Konsonanztheorien ist die Autokorrelationstheorie, welche auch ohne objektive Obertöne und nichtlineare Verzerrungsprodukte den Unterschied zwischen konsonanten und dissonanten Intervallen erklärt und dadurch gegenüber den Theorien von Helmholtz, Hindemith und Husmann klar im Vorteil ist. Weiters lassen sich auch Phänomene der praktischen Musikausübung, wie etwa das Zurechthören von leicht verstimmtten Intervallen, mit der Autokorrelationstheorie erklären.

Auch die in dieser Arbeit vorgestellten Versuche zur Intervalleinschätzung legen nahe, dass die nichtlinearen Verzerrungsprodukte nicht die Ursache für die Unterscheidungsfähigkeit zwischen konsonanten und dissonanten Intervallen sein können. Das Gehör scheint sich je nach Hörsituation immer an jene Anhaltspunkte zu klammern, die noch vorhanden sind. Somit ist auch die Frequenzgruppenbreite bzw. die Rauigkeit von Zusammenklängen eine wichtige Orientierungshilfe, solange keine dichotische Darbietung gewählt wird. Wenn aber fast alle Anhaltspunkte durch die Art der Darbietung ausgeschaltet werden, wie das in einer Hörsituation in den Versuchen der Fall war, und weder Rauigkeit noch Kombinationstöne, subjektive oder objektive Obertöne am Zusammenklang beteiligt sind, liefert vor allem die Autokorrelationstheorie brauchbare Erklärungen. Die Ursache für die Ausnahmestellung der Konsonanz ist laut Autokorrelationstheorie in den Nervenimpulsen der Hörbahn zu finden, deren häufige

Koinzidenz bei einfachen Schwingungsverhältnissen erkannt wird. Die Versuchsergebnisse lassen die Autokorrelationstheorie als besonders wahrscheinlich erscheinen.

Zusammenfassend lässt sich über den Einfluss der subjektiven nichtlinearen Verzerrungsprodukte auf die musikalische Wahrnehmung sagen, dass diese, in Abhängigkeit von der jeweiligen Situation und der daraus resultierenden Intensität, den Höreindruck eines Zusammenklanges beeinflussen können. Jedoch wäre es nach heutigem Forschungsstand falsch, ihnen zu große Bedeutung zuzusprechen und sie zur Grundlage einer Konsonanztheorie zu erheben.

9. Literaturverzeichnis

Sämtliche Abbildung im Text sind als Bildzitate zu verstehen und mit dementsprechenden Quellenangaben versehen. Ich habe mich bemüht die Bildrechte der jeweiligen Inhaber zu wahren. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Békésy, Georg von: „Zur Physik des Mittelohres und über das Hören bei fehlerhaftem Trommelfell.“ In: *Akust. Z.*, 1, 1936, S. 13-23.

Békésy, Georg von: „The variation of phase along the basilar membrane with sinusoidal vibrations.“ In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19 (3), 1947, S. 452-460.

Bergeijk, Willem Andre Maria van / Pierce, John Robinson / David, Edward Mill: „Die Schallwellen und wir. Wie und was wir hören.“ In: *Natur und Wissen*, Band 5, Desch, München u.a. 1960.

Dove, Heinrich Wilhelm u.a.: „Akustik, Theoretische Optik, Meteorologie.“ In: Dove, Heinrich Wilhelm (Hrsg.): *Repertorium der Physik*, 3. Band, Veit & Comp., Berlin 1839.

Ebeling, Martin: „Verschmelzung und neuronale Autokorrelation als Grundlage einer Konsonanztheorie.“ Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main 2007.

Ebeling, Martin: „Konsonanz und Dissonanz.“ In: Bruhn, Herbert u.a. (Hrsg.): *Musikpsychologie. Das neue Handbuch*, Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2008, S. 499-521.

Euler, Leonhard: „Tentamen novae theoriae musicae.“ Typogr. Academiae Scientiarum, St. Petersburg 1739.

Fastl, Hugo / Zwicker, Eberhard: „Psychoacoustics. Facts and Models.“ In: *Springer series in information sciences*, Band 22, 3. Aufl., Springer, Berlin u.a. 2007.

Feeney, M. Patrick: „Dichotic beats of mistuned consonances.“ In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102 (4), Oktober 1997, S. 2333-2342.

Fricke, Jobst Peter: "Über subjektive Differenztöne höchster hörbarer Töne und des angrenzenden Ultraschalls im musikalischen Hören." In: Fellerer, Karl Gustav (Hrsg.): *Kölner Beiträge zur Musikforschung*, Band 16, Bosse, Regensburg 1960.

Fricke, Jobst Peter: „Die Relativität optimaler Intervallgrößen.“ In: *Bericht über den musikwissenschaftlichen Kongreß Bonn*, 1973, S. 397-400.

Fricke, Jobst Peter: „Kombinationstöne.“ In: Finscher, Ludwig (Hrsg.): *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, 2. neu bearb. Ausgabe, Sachteil, Band 5/1, Bärenreiter, Kassel u. a. 1996, Sp. 482-486.

Fricke, Jobst Peter: „Neuronale Koinzidenz mit Unschärfe löst das Problem unbefriedigender Konsonanztheorien.“ In: *Musikpsychologie*, Band 20, Hogrefe, Göttingen 2009, S. 94-122.

Gelfand, Stanley A.: „Hearing. An Introduction into psychological and physiological Acoustics.“ 2. überarb. und erw. Aufl., Dekker, New York u.a. 1990.

Gelfand, Stanley A.: „Essentials of Audiology.“ 3. Aufl., Thieme, New York u.a. 2009.

Hall, Donald E.: „Musikalische Akustik. Ein Handbuch.“ Goebel, Johannes (Hrsg.), Übersetzung aus dem Amerikanischen von Troge, Thomas A., Schott, Mainz u.a. 2008.

Hellbrück, Jürgen / Ellermeier, Wolfgang: „Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie.“ 2. aktualis. u. erw. Aufl., Hogrefe, Göttingen u.a. 2004.

Helmholtz, Hermann von: „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik.“ 3. umgearb. Aufl., Vieweg, Braunschweig 1870.

Hindemith, Paul: „Unterweisung im Tonsatz I. Theoretischer Teil.“ Neue erw. Ausg., Schott, Mainz 1940.

Houtsma, A.J.M. / Goldstein, J.L.: „The Central Origin of the Pitch of Complex Tones: Evidence from Musical Interval Recognition.“ In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51 (2), 1972, S. 520-529.

Husmann, Heinrich: „Eine neue Konsonanztheorie.“ In: *Archiv für Musikwissenschaft*, 9. Jahrgang, Heft 3/4, Franz Steiner Verlag, 1952, S. 219-230.

Husmann, Heinrich: „Vom Wesen der Konsonanz.“ In: Besseler, Heinrich (Hrsg.): *Musikalische Gegenwartsfragen*, Heft 3, Müller-Thiergarten, Heidelberg 1953.

Keuler, Jenő: „Problems of Shape and Background in Sounds with Inharmonic Spectra.“ In: Leman, Marc (Hrsg.): *Music, Gestalt and Computing: Studies in Cognitive and Systematic Musicology*, Springer, Berlin u.a. 1997, S. 214-224.

Krüger, Felix: „Zur Theorie der Combinationstöne.“ In: Wundt, Wilhelm (Hrsg.): *Philosophische Studien*, Band 17, 1901, S. 185-310.

Langner, Gerald: „Die zeitliche Verarbeitung periodischer Signale im Hörsystem: Neuronale Repräsentation von Tonhöhe, Klang und Harmonizität.“ In: *Zeitschrift für Audiologie*, 46 (1), 2007, S. 8-21.

Lipps, Theodor: „Tonverwandtschaft und Tonverschmelzung.“ In: Ebbinghaus, Herm. / König, Arthur (Hrsg.): *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, Bd. 19, Johann Ambrosius Barth Verlag, 1899, S. 1-40.

Miskiewicz, Andrzej / Rogala, Tomira: „Roughness and dissonance of musical dyads.“ In: Kopiez, Reinhard u.a. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th Triennial ESCOM Conference*, epOs-Music, 2003, S. 420-424.

Oster, Gerald: „Auditory beats in the brain.“ In: *Scientific American*, 229 (4), Oktober 1973, S. 94-102.

Plomp, Reinier / Levelt, Willem Johannes Maria: „Tonal Consonance and Critical Bandwidth.“ In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 38 (4), Oktober 1965, S. 548-560.

Roederer, Juan G.: „Introduction to the physics and psychophysics of music.“ In: *Heidelberg science library*, Vol. 16, The English Universities Press u.a., London u.a. 1973.

Sethares, William A.: „Local consonance and the relationship between timbre and scale.“ In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94 (3), September 1993, S. 1218-1228.

Stumpf, Carl / Meyer, Max: „Maßbestimmungen über die Reinheit consonanter Intervalle.“ In: Stumpf, Carl (Hrsg.): *Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft*, Nr. 2, Barth, 1898, S. 84-167.

Stumpf, Carl: „Beobachtungen über Kombinationstöne.“ In: Stumpf, Carl (Hrsg.): *Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft*, Nr. 5, Barth, 1910, S. 1-142.

Stumpf, Carl: „Konsonanz und Konkordanz. Nebst Bemerkungen über Wohlklang und Wohlgefälligkeit musikalischer Zusammenklänge.“ In: Stumpf, Carl (Hrsg.): *Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft*, Nr. 6, Barth, 1911, S. 116-150.

Stumpf, Carl: „Tonpsychologie.“ Band 2, Lizenzausg. d. Hirzel-Verl. Leipzig 1883/1890, Knuf, Bonset, Amsterdam u.a. 1965.

Supper, Martin: "Elektroakustische Musik." In: Finscher, Ludwig (Hrsg.): *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, 2. neu bearb. Ausgabe, Sachteil, Band 2/2, Bärenreiter, Kassel u. a. 1996, Sp. 1722.

Terhardt, Ernst / Zick, M.: „Evaluation of the Tempered Tone Scale in Normal, Stratched, and Contracted Intonation.“ In: *Acustica*, Vol. 32, 1975, S. 268-274.

Terhardt, Ernst: „Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz.“ In: *Acustica*, Vol. 36, 1976/77, S. 121-137.

Terhardt, Ernst: „Die psychoakustischen Grundlagen der musikalischen Akkordgrundtöne und deren algorithmische Bestimmung.“ In: Dahlhaus, C. / Krause, M. (Hrsg.): *Tiefenstruktur der Musik*, Berlin 1982, S. 23-50.

Tramo, Mark Jude / Cariani, Peter A. / Delgutte, Bertrand / Braid, Louis D.: „Neurobiological Foundations for the Theory of Harmony in Western Tonal Music.“ In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 930, Juni 2001, S. 92-116.

Voigt, Wolfgang: „Dissonanz und Klangfarbe. Instrumentationsgeschichtliche und experimentelle Untersuchungen.“ In: Vogel, Martin (Hrsg.): *Orpheus-Schriftenreihe zu Grundfragen der Musik*, Band 41, Verlag für systematische Musikwissenschaft GmbH, Bonn 1985.

White, Harvey E. / White, Donald H.: „Physics and Music. The Science of Musical Sound.“ In: *Dover Books on Physics*, Philadelphia 1980, Reprint: Dover Publications, New York 2014.

Zwicker, Eberhard / Feldtkeller, Richard: "Das Ohr als Nachrichtenempfänger." In: *Monographien der elektrischen Nachrichtentechnik*, Band 19, 2. Auflage, Hirzel, Stuttgart 1967.

Zwicker, Eberhard: „Psychoakustik.“ Springer, Berlin u.a. 1982.

Online-Quellen:

Krauß, Harald: „Hypothesentest“, <http://www.hutschdorf.de/flash/hypotest.htm>, letzter Zugriff: 07.07.2015.

10. Anhang

10.1 Zusammenfassung

Neben den Grundtönen und Obertönen können auch Komponenten an einem Zusammenklang beteiligt sein, die durch das Gehör selbst hinzugefügt werden. Hierbei handelt es sich um Verzerrungsprodukte, die durch Nichtlinearitäten im Übertragungsweg des Gehörs hervorgebracht werden und in Kombinations- und Ohrpartialtöne unterteilt werden können. Ob diese nichtlinearen Verzerrungsprodukte in ausreichender Intensität auftreten, um die musikalische Wahrnehmung zu beeinflussen, hängt jedoch von mehreren Faktoren, wie etwa den Schalldruckpegeln und den Frequenzen der dem Ohr präsentierten Tönen, ab.

Kombinations- und Ohrpartialtöne bilden auch die gemeinsame Grundlage einiger Konsonanztheorien, wobei diese aber sehr unterschiedlich verwendet werden, um die Ausnahmestellung der Konsonanz zu erklären: Hermann von Helmholtz verweist auf ausbleibende Schwebungen bei konsonanten Zusammenklängen, die sich bei Klängen ohne Obertönen nur mit den Kombinationstönen aufzeigen lassen. Paul Hindemith sagt hingegen, dass die Intervalle durch die Lage der Kombinationstöne unterschiedlich stark belastet sind und sich dadurch eine Reihung ergibt. Heinrich Husmann sieht die Obertöne als den entscheidenden Faktor für den besonderen Charakter der Konsonanzen und bei obertonlosen Klängen nehmen die Ohrpartialtöne deren Stellung ein. In all diesen Theorien wird jedoch zu wenig auf die Charakteristika der Verzerrungsprodukte eingegangen und deren Relevanz für die musikalische Wahrnehmung in den unterschiedlichen Situationen geprüft. Gerade in der musikalischen Praxis können diese nämlich häufig durch natürliche Fluktuationen der Töne gar nicht entstehen.

Die Verzerrungsprodukte des Ohres sind also ein weit instabilerer Faktor als von Helmholtz, Hindemith und Husmann angenommen und so stellt sich schließlich die Frage, ob sich die Konsonanzen weiterhin von den Dissonanzen abheben, wenn die nichtlinearen Verzerrungsprodukte gar nicht am Zusammenklang beteiligt sind. Der Vergleich von Intervalleinschätzungen in unterschiedlichen Hörsituationen mit Sinustönen und wechselnd mit und ohne Schwebungen (bzw. Rauigkeit) sowie Kombinations- und Ohrpartialtönen haben gezeigt, dass die nichtlinearen Verzerrungsprodukte des Gehörs nicht die Ursache für die Ausnahmestellung der Konsonanz sein können. Eine schlüssige Erklärung ist mit

Hilfe der aktuellen Erkenntnisse der Psychoakustik und der Neurophysiologie sowie unterschiedlichen alternativen Konsonanztheorien möglich.

10.2 Abstract

Besides the fundamental tones and the harmonics there also can be components involved in a dyad, that are added by the ear itself. These are distortion products, which arise from nonlinearities in the transmission path of the ear and can be divided in combination tones and aural harmonics. Whether these nonlinear distortion products arise with an intensity they can affect the musical perception, depends on several factors, like the sound pressure levels and the frequencies of the tones that are presented to the ear.

Combination tones and aural harmonics also form the common fundament of some consonance theories, but they are used in very different ways to explain the special position of the consonance: Hermann von Helmholtz refers to absent beats at the consonances, what can be shown only with the combination tones, if there are no harmonics involved. Paul Hindemith says, on the other hand, that every interval is burdened to a different degree by its combination tones, what leads to different ranks of the intervals. To Heinrich Husmann the harmonics are the main factor for the special character of the consonances and if tones are used without natural harmonics, the aural harmonics assume their role. In all these theories, however, the characteristics of the distortion products and their impact on the musical perception in different situations are discussed insufficiently. Especially in the common musical practice they often cannot even emerge, because of natural fluctuations of the tones.

So the ear's distortion products are a far less stable factor than assumed by Helmholtz, Hindemith and Husmann, and the question arises, whether the consonances stay in contrast to the dissonances, if the nonlinear distortion products are not involved in a dyad. The comparison of the assessment of intervals in different hearing situations with sinusoidal tones and alternating with and without beats (respectively roughness) as well as combination tones and aural harmonics, have shown that the nonlinear distortion products of the ear cannot be the reason for the special position of the consonance. Finally a coherent explanation can only be achieved with the help of the actual knowledge of psychoacoustics, neurophysiology and different alternative consonance theories.

10.3 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Philipp Wiedl
Wohnort:	Salzburg / Wien
Nationalität:	Österreich

Schulische Ausbildung

1996 - 2000	Volksschule Weißpriach
2000 - 2008	Bundesgymnasium Tamsweg
Juni 2008	Matura

Präsenzdienst

Sept. 2008 - März 2009	Militärkommando Salzburg, Schwarzenbergkaserne
------------------------	--

Universitäre Ausbildung

WS 2009 - SS 2012	Universität Wien: Bachelorstudium Musikwissenschaft
WS 2012 - SS 2013	Paris Lodron Universität Salzburg: Beginn des Masterstudiums Musikwissenschaft sowie Abschluss der Studienergänzung „Medienpass“
SS 2014	Universität Wien: Fortsetzung des Masterstudiums Musikwissenschaft

Sonstige Ausbildung

1998 - 2006	Unterricht in klassischem Schlagwerk am Musikum Salzburg sowie Privatunterricht bei mehreren Lehrern
Jän. & Febr. 2013	Kurse am WIFI Wien: „Live-Tontechnik I & II für Konzerte, Events und Sprachbeschallung“
Oktober 2013	Lehrgang an der Bauakademie Salzburg: „Grundkenntnisse in Rechts- und Betriebswirtschaft“