

GMTH Proceedings 2008  
herausgegeben von | edited by  
Florian Edler, Markus Neuwirth und | and Derek Remeš

# Musiktheorie als interdisziplinäres Fach Music Theory and Interdisciplinarity

herausgegeben von | edited by  
Christian Utz

8. Kongress der | 8th Congress of the  
Gesellschaft für Musiktheorie  
Graz 2008

Band 4 der Schriftenreihe | Volume 4 of the Series

*musik.theorien der gegenwart*

herausgegeben von | edited by  
Christian Utz und | and Clemens Gadenstätter

Druckfassung | printed edition: Pfau-Verlag, Saarbrücken 2010  
(ISBN 978-3-89727-448-8)



Dieser Text erscheint im Open Access und ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

This is an open access article licensed under a  
Creative Commons Attribution 4.0 International License.

# Konsonanzempfinden und Periodizitätsanalyse im auditorischen System

Martin Ebeling

Since ancient times, regular pulses of the air beating against the ear have been regarded as the cause of pitch. Until the time of Leonhard Euler, theorists plotted point sequences to represent these regular pulses of the air. Two parallel point sequences symbolized an interval. The number of coinciding points of both point sequences determined the degree of consonance or dissonance. This so called »coincidence theory of consonance« lost its importance with the rise of modern science.

Georg Simon Ohm introduced Jean Baptiste Joseph Fourier's theorem to acoustics which allowed precise spectral analysis and calculation of any vibration. A tone was no longer described by a sequence of points symbolizing pulses of the air but by sine or cosine functions and their sums. Spectral analysis led to considerations in the frequency-domain. Combining it with the phenomenon of roughness, Hermann von Helmholtz developed a consonance theory based on the disturbance of harmony by roughness. Today, his idea forms the basis of the concept of sensory consonance.

In contrast to computations in the frequency domain, however, sound is neuronally processed in the time domain. A single tone, for example, is neuronally represented by a periodic pulse train. Musical intervals produce firing patterns in the auditory nerve with regularities depending on the vibration ratio of the fundamental pitches. A mathematical model can be described that makes it possible to define a value to calculate the degree of these regularities for each vibration ratio. It turns out that this value, called *Generalized coincidence function* (Allgemeine Koinzidenzfunktion) is quite similar to the degree of tonal fusion as described by Carl Stumpf. This finding makes it probable that tonal fusion is a consequence of certain properties of the neuronal periodicity detection mechanism. Together with the roughness of intervals, this neuronal mechanism may be regarded as the basis of consonance and dissonance.

## Einleitung

Die neuroakustische Forschung hat Einsichten in die Verarbeitungsmechanismen des auditorischen Systems gewonnen, die das Phänomen von Konsonanz und Dissonanz simultaner Intervalle neurophysiologisch erklärt. Ein zwischen Stamm- und Mittelhirn lokalisiertes neuronales Netz zur Periodizitätsdetektion führt eine zeitliche Schallanalyse auf der Grundlage von Verzögerungen und Koinzidenzen von Nervenimpulsmustern durch<sup>1</sup>, die in einem mathematischen Modell nachgebildet werden kann. Neben der qualitativen Beschreibung der Zeitanalyse erlaubt dieses Modell auch die Berechnung der Konsonanzgrade beliebiger Intervalle durch die eigens

1 Langner, *Die zeitliche Verarbeitung periodischer Signale im Hörsystem.*

definierte Allgemeine Koinzidenzfunktion.<sup>2</sup> Die Stufen der Tonverschmelzung von Carl Stumpf<sup>3</sup> werden durch dieses Modell bestätigt. Die Rangfolge der Intervalle der herkömmlichen Musiktheorie stimmt mit den mittels der Allgemeinen Koinzidenzfunktion berechneten Konsonanzgraden überein.

Die vorliegende Beschreibung des Modells verzichtet zur besseren Lesbarkeit auf den andernorts<sup>4</sup> entwickelten mathematischen Formalismus. Nur die Definition der Allgemeinen Koinzidenzfunktion ist im Anhang wiedergegeben.

## 1. Klassische Koinzidenztheorien: Töne als Luftstöße

Bereits seit in der Antike ist bekannt, dass die von Instrumenten auf die Luft übertragenen Schwingungen im Ohr ein Tonhöhenempfinden hervorrufen. Schwingungen sind regelmäßig wiederkehrende Bewegungen. Er klingt ein Ton, so bewegt sich die Luft regelmäßig hin und her und stößt nach dieser Vorstellung in immer gleichen Abständen gegen das Ohr, das diese Stöße als Ton wahrnimmt. Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Stößen entspricht der Periode des Tons, die gleich dem Kehrwert der Tonhöhenfrequenz (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) ist.

Früher stellten die Gelehrten diesen Zusammenhang grafisch durch Folgen von Punkten dar, die jeweils einer bestimmten Tonhöhe entsprechen, so auch Leonhard Euler 1739 in seinem Werk *Tentamen novae theoriae musicae* (Abb. 1). Der Abstand zwischen aufeinander folgenden Punkten einer Zeile bleibt dabei als Periode des Tones stets gleich. Bei hohen Tönen sind die Abstände kürzer als bei tiefen Tönen, weil hohe Töne eine größere Frequenz haben und daher die Periode als Kehrwert der Frequenz kleiner ist. Intervalle werden von Euler durch zwei parallele Punktfolgen mit ihrer jeweils eigenen Periode dargestellt (Abb. 1). Dadurch werden die ganzzahligen Verhältnisse veranschaulicht, durch welche die Intervalle in der spekulativen Musiktheorie seit der Antike beschrieben wurden. Es lässt sich leicht erkennen, dass die beiden Punktfolgen eines Intervalls auch zusammenfallende oder *koinzidierende* Punkte haben. Galileo Galilei nennt diese zusammentreffenden Stöße der Luft »battere insieme«<sup>5</sup>, Mersenne spricht von »collision ou battement d'air«<sup>6</sup> und Euler von »intervallis pulsuum«, »ictus« oder »pulsus«.<sup>7</sup> So fällt etwa bei der Quinte (Abb. 1: *fig. 5*) jeder zweite Punkt des tieferen Tones mit jedem dritten Punkt des hohen Tones zusammen, die Punktfolgen koinzidieren im Verhältnis 3:2.

Die Zahlenverhältnisse geben zunächst das Schwingungsverhältnis der beiden Intervalltöne an. Dieses zeigt sich dann auch im Verhältnis der Punktabstände beider Punktfolgen und gibt hier an, wie oft ein Punkt der einen Reihe mit einem Punkt der anderen Reihe zusammenfällt (koinzidiert). Aus dem Schwingungsverhältnis wird bei der Punktreihendarstellung das Koinzidenzmaß.

2 Ebeling, *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation*, S. 102.

3 Stumpf, *Tonpsychologie*, Bd. 2, S. 135.

4 Ebeling, *Neuronal periodicity detection*, Ebeling, *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation*.

5 Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche*, S. 90.

6 Mersenne, *Harmonie Universelle*, S. 3.

7 Euler, *Tentamen*, S. 35f.



## 2. Fourier-Analyse und Töne als Sinusschwingung: Betrachtungen im Frequenzbereich

Der Physiker Georg Simon Ohm (1789–1854) veröffentlichte 1843 seine Überlegung, dass einem Ton eine sinusförmige Schwingung entspricht.<sup>8</sup> Damit ermöglichte er eine exakte mathematische Beschreibung des Phänomens Tonhöhe anhand der Frequenz der zugehörigen Sinusschwingung. Das tatsächliche Verhältnis von Tonhöhenempfinden und Frequenz ist nach dem heutigen Wissensstand allerdings komplizierter<sup>9</sup>, doch legte Ohm mit seiner Definition der Tonhöhe das Fundament zur mathematischen Behandlung akustischer Phänomene, weil sie es ermöglichte, eine kurz zuvor entwickelte mathematische Theorie auf Schwingungen anzuwenden.

Zur Lösung eines Wärmeleitungsproblems hatte nämlich Jean Baptiste Joseph Fourier 1822 in seiner *Théorie analytique de la chaleur* mathematische Überlegungen veröffentlicht, die Grundlage der »Fourier-Analyse« sind. Jede periodische Funktion lässt sich demnach in der Fourier-Reihe als Summe von sinusförmigen Funktionen schreiben. Eine Funktion ist periodisch, wenn sich ihre Funktionswerte regelmäßig und im immer gleichen Abstand, der Periodendauer, wiederholen. Die Häufigkeit dieser Wiederholung pro Zeiteinheit bezeichnet man als *Frequenz*. Die Frequenz ist dabei der Kehrwert der Periodendauer und umgekehrt.

Durch Projektion der Zeitfunktion auf den mit verschiedenen Frequenzen durchlaufenen Einheitskreis wird in der Fourier-Analyse für jede Frequenz der zugehörige *Fourier-Koeffizient* ermittelt. Er ist die Amplitude der jeweiligen Teilschwingung mit der fraglichen Frequenz und gibt an, wie stark diese als Komponente in der zu untersuchenden Funktion enthalten ist. Außerdem wird ermittelt, zu welchem Zeitpunkt jede Frequenzkomponente ihren Schwingungsdurchlauf beginnt, wie stark also ihre Phase gegenüber den anderen Teilschwingungen verschoben ist. Für alle in der Funktion enthaltenen Frequenzkomponenten kann nach der Fourier-Analyse deren Stärke und Phasenlage angegeben werden.<sup>10</sup> In etwas abstrakterer Form lässt sich dieses Analyseverfahren, das nach der Stärke und Phasenlage der enthaltenen Frequenzkomponenten fragt, auch auf nichtperiodische Funktionen übertragen. Die Periode der Funktion wird dann als unendlich lang angenommen.<sup>11</sup>

Durch die Fourier-Analyse wird die Funktion aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen: Statt der Zeit ist jetzt die Frequenz die Variable, über die die Funktion vollständig beschrieben wird. Beide Darstellungen sind äquivalent. Je nach Fragestellung kann die eine oder die andere Form gewählt werden. Wird nach der Stärke (Energie) der enthaltenen Frequenzkomponenten gefragt, so ist die Beschreibung der Funktion mittels der Frequenzvariablen sinnvoll, und man erhält statt des zeitlichen Verlaufs der Funktion ihr Frequenzspektrum (Spektralanalyse).

Dieses exakte mathematische Verfahren der Fourier-Analyse bzw. Fourier-Transformation liefert mehr Informationen als etwa die Punktreihendarstellung Eulers und ist bis heute das etablierte Werkzeug zur exakten Analyse von Schwingungen

8 Ohm, *Definition des Tones*.

9 Vgl. Zwicker/Fastl, *Psychoacoustics*, S. 111f.

10 Vgl. Papoulis, *Fourier Integral*, S. 42f.

11 Vgl. Hartmann, *Signal, Sound, and Sensation*, S. 161ff.

geblieben. Für eine Spektralanalyse fast in Echtzeit ist in vielen Audioanwendungen für den PC der Algorithmus der Fast-Fourier-Transformation (FFT) implementiert. Die Fourier-Transformation ermöglichte neuartige Betrachtungen im Frequenzbereich und beeinflusste so auch die Theorien der Konsonanz- und Dissonanzwahrnehmung.

### 3. Autokorrelation und Periodizitätsanalyse: Betrachtungen im Zeitbereich

Aus dem Zeitverlauf kann normalerweise nicht abgelesen werden, aus welchen Komponenten eine Schwingung besteht. Zur genauen Bestimmung der Komponenten stellt daher die Fourier-Transformation das gängige Verfahren in Wissenschaft und Technik dar. Dagegen wird von der völlig gleichwertigen harmonischen Analyse im Zeitbereich durch Autokorrelation<sup>12</sup> weniger Gebrauch gemacht. Das mag vor allem historische Gründe haben, denn die Äquivalenz der Spektralanalyse mittels Fourier-Transformation und der harmonischen Analyse mittels Autokorrelation wurde erst 1930 durch Norbert Wiener<sup>13</sup> bewiesen («Wiener-Khintchine Relation»<sup>14</sup>), also zu einer Zeit, als die Analyse durch Fourier-Transformation längst etabliert war.

Die Korrelationsanalyse stammt ursprünglich aus der Statistik. Durch Autokorrelation wird eine (Zeit-)Funktion mit der um einen Parameter verschobenen Version derselben Funktion verglichen. Durch Integralbildung über dem Produkt aus der ursprünglichen Funktion und der verschobenen Version der Funktion erhält man ein Maß für die Übereinstimmung beider Funktionen. Dieses Maß der Übereinstimmung kann für beliebige Verschiebungswerte berechnet werden. Ordnet man jedem Verschiebungswert das sich jeweils ergebende Maß der Übereinstimmung der ursprünglichen Funktion mit der verschobenen Funktion zu, so ergibt sich daraus die sogenannte *Autokorrelationsfunktion*.<sup>15</sup> Sie hat die Eigenschaft, dass sie für Verschiebungen um Werte, die genau einer Schwingungsperiode oder deren ganzzahligen Vielfachen entsprechen, ein lokales Maximum besitzt.<sup>16</sup> Aus den lokalen Maxima kann abgelesen werden, welche Perioden in der zu untersuchenden Funktion enthalten sind. Da die Periode genau der Kehrwert der Frequenz ist, kennt man damit auch alle ihre Frequenzkomponenten. Wie bei der Spektralanalyse mittels der Fourier-Transformation bleibt dabei die Information über die Stärke der Einzelkomponenten erhalten, die Phaseninformation geht verloren. Die Autokorrelationsfunktion  $a(\tau)$  zeigt die Perioden des Signals als Maxima an und hat außerdem dieselbe Periode wie das Eingangssignal  $f(t)$  (vgl. Abb. 2). Damit ist sie das geeignete mathematische Verfahren zur Periodizitätsanalyse.<sup>17</sup>

Die Fourier-Transformation liefert Informationen über die in einem Signal enthaltenen Frequenzen – eine Analyse im *Frequenzbereich*. Durch die Autokorrelationsfunktion dagegen erhält man einen Überblick über die in einem Signal enthalte-

12 Papoulis, *Fourier Integral*, S. 240f.

13 Wiener, *Generalized Harmonic Analysis*.

14 Hartmann, *Signals, Sound, and Sensation*, S. 334.

15 Vgl. Papoulis, *Fourier Integral*, S. 240f.

16 Ebda., S. 246.

17 Hartmann, *Signal, Sound, and Sensation*, S. 336.

nen Perioden, die den Schwingungsdauern entsprechen – eine Analyse im *Zeit*bereich. Die Punktfolgen der klassischen Koinzidenztheorie stellen anschaulich die Ketten der sich wiederholenden Perioden dar und können als Elementarform einer Autokorrelationsanalyse betrachtet werden.

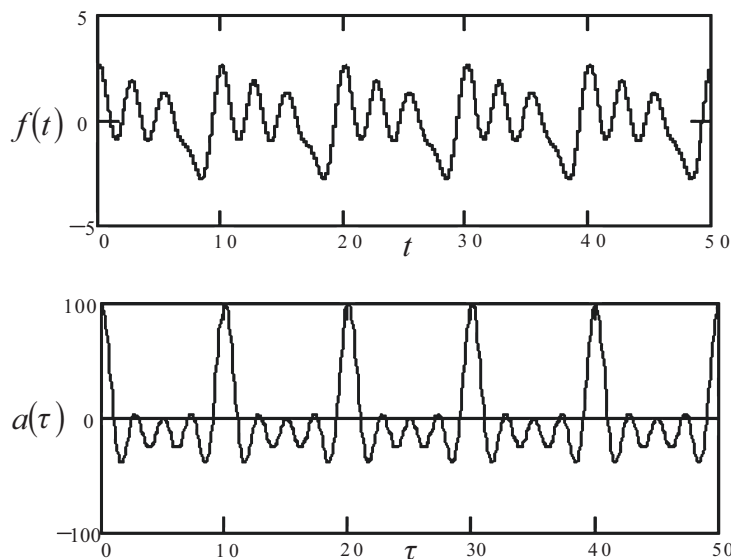


Abbildung 2: Die obere Kurve ist eine periodische Funktion mit der Periode  $\tau = 10$  ms, die untere Kurve ist ihre Autokorrelationsfunktion, aus der die Perioden der Funktion abgelesen werden können.

Notiert man bei einer sinusförmigen Schwingung jeden Nulldurchgang, etwa durch einen Pfeil wie in Abbildung 3, so erhält man eine den Punktfolgen völlig entsprechende Darstellung.

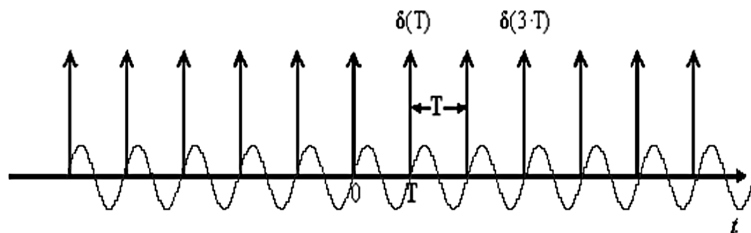


Abbildung 3: Eine Schwingung kann als periodische Impulsfolge aufgefasst werden. Die Pulse haben dieselbe Periode  $\tau$  wie die Schwingung.

Diese Darstellung verdeutlicht, dass jeder Ton als eine Folge äquivalenter Impulse gedacht werden kann. In der Mathematik kennt man solche Pfeile als »Dirac-Impulse« (oder  $\delta$ -Impulse), eine Verteilung<sup>18</sup>, die unendlich schmal, aber auch unendlich hoch ist. In der mathematischen Theorie erhält man aus einer Schwingung durch

18 Papoulis, *Fourier Integral*, S. 269f.

Überlagerung von harmonischen Teilschwingungen eine Reihe äquidistanter Dirac-Impulse: Addiert man zu einer sinusförmigen Schwingung alle (also unendlich viele) Obertöne und nimmt für alle dieselbe Amplitude und Phasenlage an, so ergibt sich eine Folge äquivalenter  $\delta$ -Impulse.<sup>19</sup>

Aus dem Theorem von Wiener-Khintchine folgt also, dass es vom mathematischen Standpunkt aus betrachtet völlig gleichgültig ist, ob ein Schallsignal durch Spektralanalyse (Frequenzbereich/Fourier-Transformation und Spektrum) oder durch Periodizitätsanalyse (Zeitbereich/Autokorrelation) untersucht wird. In beiden Fällen geht zwar die Phaseninformation verloren, die anderen Eigenschaften des Signals lassen sich aber aus beiden Analyseverfahren gewinnen.<sup>20</sup> Damit ist es denkbar, dass die physiologischen Vorgänge im auditorischen System Verarbeitungsmechanismen aufweisen, die dem einen oder dem anderen Analyseverfahren entsprechen. Tatsächlich findet man im Hörsystem Verarbeitungsprozesse sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich.

#### 4. Quasi Fourier-Analyse des Innenohres und Tonotopie

Beim menschlichen Hörvorgang wird das vom Ohr aufgenommene Signal im Innenohr in seine Frequenzkomponenten zerlegt, vergleichbar einer Spektralanalyse mittels Fourier-Transformation. Dabei löst die mechanische Übertragung des Schalls vom Trommelfell über das Mittelohr<sup>21</sup> Wanderwellen in der Perilymphe der Schnecke aus. Dort befindet sich die mit den Hörrezeptoren ausgestattete Basilarmembran, auf der die Wanderwellen »stranden«. Abhängig von der Frequenz des Tones wird die Basilarmembran an verschiedenen Orten angeregt: Hohe Frequenzen führen zum Feuern der Hörzellen im vorderen Teil der Basilarmembran, Wanderwellen tiefer Frequenzen laufen weiter in die Schnecke hinein und regen die Hörzellen des hinteren Teils der Basilarmembran an.<sup>22</sup> Die Basilarmembran ist demnach nach Frequenzen (und zwar logarithmisch) skaliert.<sup>23</sup> Der empfangene Schall wird durch diese physiologische Fourier-Analyse in verschiedene Frequenzkanäle getrennt<sup>24</sup>, wodurch eine sogenannte »tonotope Organisation« entsteht, die auf allen Stufen des auditorischen Systems zu finden ist.<sup>25</sup>

#### 5. Neuronale Impulsketten als zeitlicher Code der Tonhöhe

Die von einer Wanderwelle angeregten Hörzellen auf der Basilarmembran produzieren Nervenimpulse, die zu Impulsketten gebündelt über den Hörnerv an die höheren Verarbeitungsstationen im Hörsystem weitergeleitet werden. Der neuronale

19 Hartman, *Signal, Sound, and Sensation*, S. 155.

20 Woschni, *Informationstechnik*, S. 59.

21 Yost, *Fundamentals of Hearing*, S. 65f.

22 v. Békésy, *Hearing*, S. 485ff.

23 Ebda., S. 91f.

24 de Cheveigné, *Seperation machine*.

25 Romani et al., *Tonotopic organisation*.



Code dieser Impulsketten ist eine Schallrepräsentation im Zeitbereich. Die Nervenimpulsketten lassen sich mit aufeinander folgenden  $\delta$ -Impulsen vergleichen (vgl. Abb. 3). Um diese Impulsfolgen zu untersuchen, misst man in der Neurophysiologie die Abstände zwischen den einzelnen Nervenimpulsen. Dieser Abstand wird als ISI (*interspike interval*) bezeichnet.<sup>26</sup> Man unterscheidet dabei den Abstand zwischen benachbarten Impulsen (*first-order ISI*) und den Abstand zwischen beliebig entfernten Impulsen (*all-order ISI*). Nach dem Vermessen und Zählen der ISI, also der Abstände zwischen den Nervenimpulsen, wird die Häufigkeit, mit denen die ISI auftreten, in Histogrammen erfasst.<sup>27</sup> Wird dem Ohr ein Sinuston mit einer bestimmten Frequenz präsentiert, so findet man *first-order ISI* der Periodendauer dieses Tones und *all-order ISI* von ganzzahligen Vielfachen dieser Periodendauer (Abb. 4).

Als Stimuli der in Abbildung 4 dargestellten Messungen dienten Sinustöne verschiedener Frequenzen, die für die Dauer einer Sekunde präsentiert wurden. Deutlich ist zu erkennen, dass Töne hoher Frequenzen in Impulsketten mit kurzen ISI umgesetzt werden und Töne mit niedrigeren Frequenzen Impulsketten mit langen ISI auslösen. Da der Stimulus jeweils nur eine Sekunde lang präsentiert wurde, kommen *all-order ISI* höherer Ordnung, bei denen zwischen dem das ISI bildende Intervall mehrere andere Impulse liegen, seltener vor.

Nicht nur Sinustöne lösen eine Tonhöhenempfindung aus. Deshalb haben Peter A. Cariani und Bertrand Delgutte verschiedene weitere Stimuli getestet, die ein Tonhöhenempfinden verursachen, z.B. komplexe Klänge, Clicksequenzen, amplitudenmodulierte Töne oder amplitudenmoduliertes Rauschen.<sup>28</sup> Zur statistischen Auswertung der im Hörnerv ermittelten ISI benutzten sie ein der Autokorrelation äquivalentes Verfahren und stellten ihre Ergebnisse in so genannten Autokorrelogrammen (einer bestimmten Form von Histogrammen) dar. Stets zeigen diese Autokorrelogramme ein absolutes Maximum für Perioden, die der gehörten Tonhöhe entsprechen.<sup>29</sup> Also tritt diese Periode am häufigsten als ISI in der Nervenimpulskette auf.

Die Codierung der Tonhöhen über die ISI neuronaler Impulsketten dürfte auch bei der Intervallwahrnehmung eine Rolle spielen. Deshalb haben Tramo et al.<sup>30</sup> die von Intervallen hervorgerufenen Feuermuster im Hörnerv im Rahmen von Versuchen mit Katzen mit Hilfe von Autokorrelogrammen untersucht (Abb. 5).

Als Stimulus präsentierten sie die konsonanten Intervalle reine Quinte und reine Quarte sowie die Dissonanzen kleine Sekunde und Tritonus. (Es sei angemerkt, dass zwar im klassischen Kontrapunkt die Quarte als Dissonanz aufgefasst wird und aufgelöst werden muss. In der frühen Mehrstimmigkeit galt die Quarte jedoch als konsonant und bedurfte keiner Auflösung; so wurden im Quartorganum des 9. Jahrhunderts beide Stimmen im Abstand einer Quarte parallel geführt. In der Psychoakustik gilt die Quarte schon bei Hermann von Helmholtz<sup>31</sup> und Stumpf<sup>32</sup> als Konsonanz). Jeder der Intervalltöne bestand aus den ersten sechs Partialtönen mit

26 Rhode, *Interspike Intervals*.

27 Yost, *Fundamentals of Hearing*, S. 132f.

28 Cariani/Delgutte, *Neural correlates*.

29 Ebda., S. 1709.

30 Tramo et al., *Neurobiological Foundations*.

31 Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, S. 315.

32 Stumpf, *Tonpsychologie*, Bd. 2, S. 167.

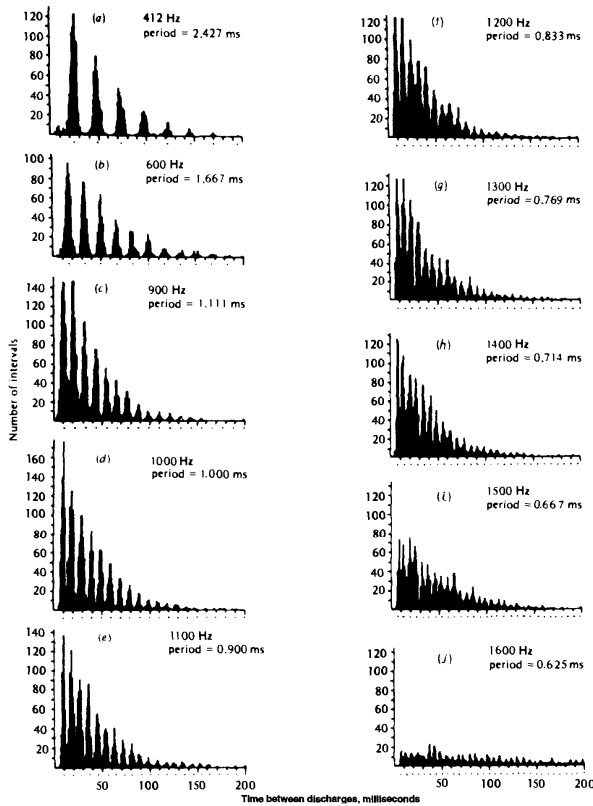


Abbildung 4: Die Intervall-Histogramme zeigen die periodische Verteilung der ISI (beim Totenkopffächchen) für reine Töne unterschiedlicher Frequenz, die für eine Dauer von einer Sekunde mit einem Schalldruckpegel von 80 dB dargeboten wurden (aus: Rose, *Phase-locked response to low-frequency tones*, vgl. Yost, *Fundamentals of Hearing*, S. 134).

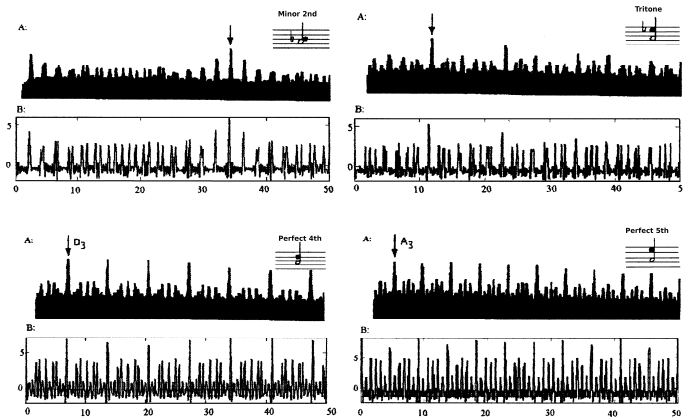


Abbildung 5: Der Vergleich zwischen experimentell ermitteltem Autokorrelogramm (jeweils oben) und berechneter Autokorrelationsfunktion (jeweils unten) zeigt für die dargebotenen Intervalle eine gute Übereinstimmung (aus: Tramo et al., *Neurobiological Foundations*). Oben sind die Grafiken für die dissonanten Intervalle kleine Sekunde (links) und Tritonus (rechts), unten die Abbildungen für die Konsonanzen reine Quarte (links) und reine Quinte (rechts) dargestellt.

gleich großen Amplituden. Der Vergleich zwischen den Autokorrelogrammen und den aus den Funktionsgleichungen der Stimuli berechneten Autokorrelationsfunktionen zeigt eine verblüffende Übereinstimmung der Muster. Daraus kann gefolgert werden, dass die Tonhöhendcodierung in den Periodizitätsmustern der ISI von Intervallen erhalten bleibt.

## 6. Neuronale Autokorrelation im Hörsystem

Ließe sich ein neuronales Autokorrelationsverfahren zur Periodizitätsanalyse finden, so könnten das Tonhöhenempfinden und die Intervallwahrnehmung damit erklärt werden. Ein neuronales Netz zur Autokorrelationsanalyse hat Joseph Carl Robnit Licklider<sup>33</sup> bereits 1951 spekulativ vorgeschlagen.

Mit einem solchen neuronalen Netz können die ISI einer Impulskette bestimmt werden. Das eingehende Signal wird in zwei parallele Kanäle geleitet (Abb. 6). Der eine Kanal besteht aus einer Kette von Verzögerungsneuronen, die das Signal stufenweise immer mehr verzögern. Der zweite Kanal erhält das Signal unverzögert. Jeder verzögerte Wert wird mit dem ursprünglichen Signal in einem Koinzidenzneuron zusammengeführt. Das Koinzidenzneuron feuert nur, wenn es sowohl vom ursprünglichen Signal als auch vom verzögerten Signal einen Impuls erhält. Feuert das Koinzidenzneuron, so entspricht der Verzögerungswert dem Abstand zwischen zwei Impulsen der zu analysierenden Impulskette. Alle Ausgänge zusammengefasst ergeben eine dem Integral entsprechende Aufsummierung. Der von Licklider vorgeschlagene Autokorrelator ist allerdings unphysiologisch, da er eine sehr lange Verzögerungskette enthalten müsste, um einen weiten Frequenzbereich abdecken zu können. Lange Neuronenketten lassen sich aber nicht bilden.

Auf der Grundlage elektrophysiologischer Messungen hat Gerald Langner<sup>34</sup> 1983 ein Neuronenmodell entworfen, das simultan eine doppelte Korrelationsanalyse durchführt (Abb. 7). Eine Bank von neuronalen Schaltkreisen prüft das Signal sowohl auf die enthaltenen kurzen Perioden, welche hohen Frequenzen bzw. den Trägerfrequenzen bei amplitudenmodulierten Tönen entsprechen, als auch auf lange Perioden für die tiefen Grundfrequenzen bzw. die Hüllkurvenfrequenzen bei amplitudenmodulierten Tönen.

Jeder dieser Schaltkreise besteht aus vier Elementen. Ein Trigger, bestehend aus einem On-Neuron, synchronisiert einen Oszillatorkreis und einen parallel dazu arbeitenden Integrator mit der Hüllkurve des Signals. Sowohl der Oszillatorkreis als auch der Integrator arbeiten auf das Koinzidenzneuron, das nur feuert, wenn es sowohl vom Integrator als auch vom Oszillator einen Impuls erhält. Der Integrator hat die Aufgabe, eine Verzögerung des Signals zu bewirken. Wegen der unterschiedlichen Integrationszeiten der Spindelzellen, die die Integratoren der einzelnen Schaltkreise bilden, produziert jeder Schaltkreis eine spezifische Latenz. Darüber hinaus synchronisieren sich die Integratoren mit der Feinstruktur des Signals, die der Trägerperiode eines amplitudenmodulierten Tones entspricht. Der Oszillatorkreis

33 Licklider, *Duplex Theory*.

34 Langner, *Evidence for Neuronal Periodicity Detection*.

wird von »Chopper-Neuronen« gebildet, die bei jeder Wiederkehr der Hüllkurvenperiode eine kurze Salve regelmäßiger Impulse auf das Koinzidenzneuron leiten. Dadurch wird das Koinzidenzneuron innerhalb eines kurzen Zeitfensters in Feuerbereitschaft versetzt, feuert aber nur, wenn es innerhalb dieser Zeitspanne einen Impuls vom Integrator erhält.<sup>35</sup>

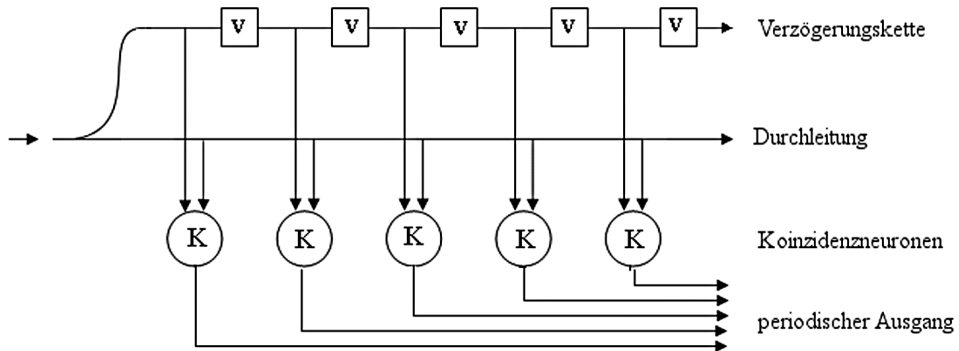


Abbildung 6: Schematische Darstellung des neuronalen Autokorrelationsmodells von Licklider. Das Signal wird in den Verzögerern V stufenweise immer mehr verzögert und nach jeder Verzögerung mit dem unverzögerten Signal zur Prüfung auf gleichzeitige Impulse in den Koinzidenzeinheiten K zusammengeführt.

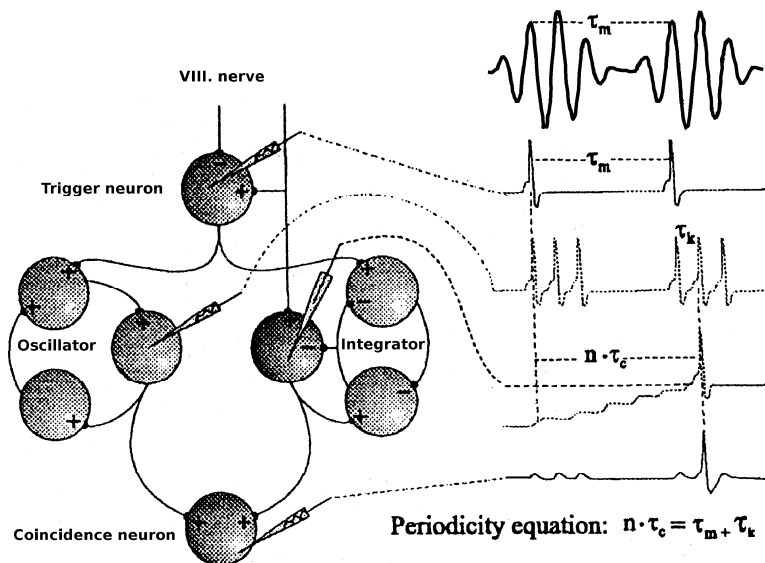


Abbildung 7: Der neuronale Schaltkreis des Koinzidenzmodells nach Gerald Langner.

Deutet man die durch die Trägerperiode eines amplitudenmodulierten Tones beschriebenen Perioden als die klangfarblich relevanten, hohen Anteile eines komplexen Klanges und die Periode der spezifischen Latenz als den Grundton, so erhält

35 Langner, *Zeitliche Verarbeitung*, S. 13.

man eine doppelte Korrelationsanalyse sowohl der Klangfarbe als auch der Tonhöhe. Aufgrund der spezifischen Latenz jedes Schaltkreises schlägt sich die doppelte Korrelationsanalyse auch in einer zweidimensionalen räumlichen Repräsentation der Koinzidenzneuronen im *colliculus inferior* im Mittelhirn nieder. Die eine Dimension zeigt die Anordnung der Neuronen nach der Tonhöhe (Periodotopie) und die andere senkrecht dazu die Anordnung nach der Klangfarbe (Tonotopie).<sup>36</sup> Diese Struktur ist auch beim Menschen nachgewiesen worden.<sup>37</sup> Die Periodizitätsanalyse nach der Tonhöhe stellt eine Autokorrelation unter Berücksichtigung eines Zeitfensters dar.<sup>38</sup>

## 7. Mathematisches Modell neuronaler Autokorrelation für Intervalle

Neuronal sind Tonhöhen durch äquidistante Impulsketten repräsentiert, die mathematisch durch Reihen von Dirac-Impulsen beschreibbar sind (vgl. Abb. 3). Da das Koinzidenzneuron ein kurzes Zeitfenster öffnet, in dem der Impuls des Integrators mit einer Impulsalve der Oszillatorneuronen koinzidieren kann, ist es sinnvoll, dieses mathematische Modell zu modifizieren und statt eines Dirac-Impulses eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu wählen, welche die Koinzidenzwahrscheinlichkeit angibt.<sup>39</sup> Im einfachsten Fall verwendet man zu diesem Zweck einen Rechteckimpuls mit der halben Breite des Zeitfensters, den das Koinzidenzneuron öffnet. Damit ist ein Ton neuronal durch eine Reihe von Rechteckimpulsen repräsentiert.

Die Autokorrelationsfunktion des Rechteckimpulses ist ein Dreiecksimpuls.<sup>40</sup> Die Autokorrelationsfunktion einer einen Ton repräsentierenden Rechteckimpulsfolge ist somit eine Folge von Dreiecksimpulsen.<sup>42</sup> Geht man nun von zwei gleichzeitigen Tönen, also einem simultanen Intervall aus, dann sind zwei Rechteckimpulsketten zu betrachten, mit jeweils einer eigenen Periode als Abstand zwischen den einzelnen Rechteckimpulsen (siehe Anhang, Gleichung 2). Die tonotope Organisation des Hörnervs sorgt dafür, dass sie in verschiedenen Frequenzkanälen repräsentiert sind, sofern das Intervall nicht kleiner als eine Kopplungsbreite ist. Dabei ist die Kopplungsbreite die Breite des Abschnittes auf der Basilarmembran, der durch einen Stimulus bestimmter Frequenz miterregt wird und einem kleinen Frequenzbereich, der Frequenzgruppe, entspricht.<sup>41</sup>

Bei der Analyse der Periodotopie (Grundtöne) müssen die Breiten des Zeitfensters der Koinzidenzneuronen berücksichtigt werden. Zur mathematischen Beschreibung dieser Analyse bildet man also die Summe beider Rechteckimpulsfolgen, die dann das Intervall repräsentieren, und wendet darauf die Periodizitätsanalyse an, indem man die Autokorrelationsfunktion dieser Summe bildet (siehe Anhang, Gleichung 3). Diese Autokorrelationsfunktion ist eine Summe von Dreiecksimpulsen, die sich mehr oder weniger überlappen.<sup>42</sup> Dadurch werden insbesondere – analog zu

36 Ebd., S. 15.

37 Langner/Braun, *Orthogonale Repräsentation*.

38 Borstel et al., *Neural Network*.

39 Ebeling, *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation*, S. 84/169.

40 Ebd., S. 184.

41 Zwicker/Feldkeller, *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. 93.

42 Ebeling, *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation*, S. 96 und 100.

den Betrachtungen mit Hilfe der Punktreihen, wie sie die alten Theoretiker durchführten – Perioden, die beide Intervalltöne gemeinsam haben, sichtbar. Auch hier erkennt man koinzidierende Impulse. Allerdings sind die durch das Zeitfenster der Koinzidenzneuronen bedingten Wahrscheinlichkeiten durch die Breite der Impulse mit berücksichtigt. Bemerkenswert ist auch, dass das Analyseverfahren als Autokorrelation keine Phaseninformation beinhaltet. Daher spielen Laufzeitdifferenzen oder andere Verschiebungen der beiden Impulsreihen gegeneinander keine Rolle.

Die alten Theoretiker haben aus dem ganzzahligen Schwingungsverhältnis auf das mehr oder weniger gute Zusammenpassen der Intervalltöne geschlossen. Das Schwingungsverhältnis bestimmt dabei, wie oft Punkte der einen Reihe mit Punkten der anderen Reihe koinzidieren. Analog dazu habe ich aus der Autokorrelationsfunktion der Summe beider Rechteckimpulsfolgen den Grad des Koinzidierens durch Quadrieren und Integrieren bestimmt (siehe Anhang, Gleichungen 4 und 5). Das Quadrieren sorgt dafür, dass koinzidierende Bereiche überproportional verstärkt werden. Der Bereich, über den integriert wird, betrifft Perioden zwischen 0 und 50 ms. Das ist der Periodenbereich hörbarer Töne. Die höchsten von Menschen wahrnehmbaren Töne haben eine Frequenz von etwa 20.000 Hz. Dem entspricht als Kehrwert eine Periode von  $1/20 \text{ ms} \approx 0 \text{ ms}$ . Die tiefsten hörbaren Töne liegen bei Frequenzen von etwa 20 Hz, denen eine Periode von  $1000/20 \text{ ms} = 50 \text{ ms}$  entspricht. Der so definierte Koinzidenzgrad hängt nur vom Schwingungsverhältnis des jeweiligen Intervalls ab.

Also definiere ich auf der Grundlage der quadrierten Autokorrelationsfunktion die Allgemeine Koinzidenzfunktion (»Generalized Coincidence Function«, GCF)<sup>43</sup>, die nur von der Variablen  $s$ , dem Schwingungsverhältnis, abhängt (siehe Anhang, Gleichung 5). Sie hat die Eigenschaft, dass sie für beliebige Schwingungsverhältnisse  $s$  einen Koinzidenzgrad berechnet. Damit besteht das aus den alten Koinzidenztheorien bekannte Problem der leicht verstimmten konsonanten Intervalle mit ihren »komplizierten« Schwingungsverhältnissen nicht mehr. Da sich nun für jedes beliebige Schwingungsverhältnis ein Konsonanzgrad berechnen lässt, können beliebige Intervalle bezüglich ihres Konsonanzgrades miteinander verglichen werden.

Der Graph der Allgemeinen Koinzidenzfunktion in Abbildung 8 zeigt verblüffende Übereinstimmung mit dem »System der Verschmelzungsstufen in einer Curve«, das der Musikpsychologe Carl Stumpf veröffentlicht hat.<sup>44</sup> Diese Übereinstimmung ergibt sich auch dann, wenn man von anderen Impulsformen als dem Rechteckimpuls ausgeht, also eine andere Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Koinzidenz annimmt.

## 8. Stumpfs Verschmelzungslehre versus Helmholtz' Störtheorie

Stumpf griff die schon von Aristoteles beschriebene Beobachtung auf, dass konsonante Intervalle, insbesondere die Oktave, bei simultaner Präsentation einen eher einheitlichen Höreindruck hervorrufen und nicht nur als Einzeltöne wahrgenom-

43 Ebeling, *Neuronal periodicity detection*.

44 Stumpf, *Tonpsychologie*, Bd. 2, S. 176.

men werden. Stumpf argumentierte, dass die Töne eines Intervalls in Abhängigkeit vom Konsonanzgrad mehr oder weniger stark zu einer Wahrnehmungsqualität verschmelzen (»Tonverschmelzung«) und Konsonanzen deshalb eher als eine Einheit erlebt werden.<sup>45</sup> In umfangreichen Hörversuchen bestimmte Stumpf experimentell diesen Verschmelzungsgrad<sup>46</sup>, den er für alle Intervalle innerhalb einer Oktave in einer Kurve skizzierte (Abb. 8). Stumpfs Methode stellt eine Form der experimentellen Psychologie im Sinne der Phänomenologie<sup>47</sup> dar, verlor aber im Laufe der Zeit in Folge des Psychologismusstreits immer mehr an Bedeutung, auch weil ihr eine ergänzende psychoakustische und physiologische Erklärung fehlte, obwohl sich Zeitgenossen Stumpfs wie Theodor Lipps<sup>48</sup> darum bemühten.

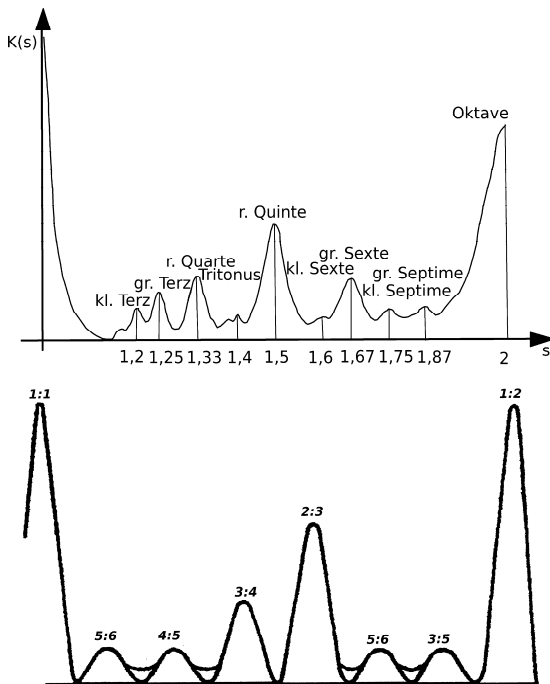


Abbildung 8: *Generalized Coincidence Function* für alle Intervalle innerhalb einer Oktave, berechnet auf der Grundlage von Rechteckimpulsen (oben) und die Darstellung »der Verschmelzungsstufen in einer Curve« nach Carl Stumpf (aus: *Tonpsychologie*, Bd. 2, S. 176). Die Kurven erstrecken sich über eine Oktave. An den Orten der höchsten Verschmelzung sind die Schwingungsverhältnisse bzw. die Intervalle angegeben.

Stattdessen wurde die von Helmholtz begründete Störtheorie favorisiert. Helmholtz hatte das psychoakustische Phänomen der Rauigkeit eingehend untersucht. Schallfluktuationen mit niedrigen Frequenzen zwischen 4 Hz und höchstens 100 Hz lösen eine unangenehme und störende Hörempfindung aus. Ursache dieser Fluktuationen können z.B. Schwebungen von Tönen mit kleiner Frequenzdifferenz (»Beats«) oder

45 Ebd., S. 65.

46 Stumpf, *Neueres zur Tonverschmelzung*.

47 Kaiser-el-Safti, *Der »Witz« (in) der Tonpsychologie Carl Stumpfs*.

48 Lipps, *Tonverwandtschaft*.

amplituden- bzw. frequenzmodulierte Töne und Klänge sein. Insbesondere die durch Schwebungen nahe beieinanderliegender Töne verursachten Rauigkeiten sind nach Helmholtz<sup>49</sup> der Grund für das Dissonanzempfinden. Bilden zwei komplexe Klänge, also aus mehreren Partialtönen zusammengesetzte Töne, ein Intervall, so kommt es zu Interaktionen zwischen den Partialtönen. Im Fall einer Dissonanz liegen aufgrund des im Vergleich zu konsonanten Intervallen ungünstigeren Schwingungsverhältnisses mehr Obertöne so nahe beieinander, dass zwischen ihnen Schwebungen im kritischen Frequenzbereich entstehen, die dann Rauigkeiten verursachen. Bei Dissonanzen wird also der Zusammenklang stärker durch Obertonrauigkeiten gestört als bei Konsonanzen.

Helmholtz' Überlegungen sind Grundlage akzeptierter Konsonanztheorien geworden<sup>50</sup>, die auf der *Sensorischen Konsonanz* beruhen. Die Attraktivität der Störtheorie liegt insbesondere darin, dass sie mit dem eingehend untersuchten psychoakustischen Phänomen der Rauigkeit begründet wird, das seinerseits mit dem Konzept der auditorischen Filter<sup>51</sup> und kritischen Bandbreiten<sup>52</sup> erklärbar ist. Ideengeschichtlich interessant ist, dass die Störtheorie mit eng beieinanderliegenden Frequenzen argumentiert, also eine Fourier-Analyse voraussetzt. Auch das Konzept der auditorischen Filter und kritischen Bandbreiten gründet auf der quasi Fourier-Analyse des Innenohrs.<sup>53</sup> Die Störtheorie ist also eine Konsonanztheorie im Frequenzbereich, die von Helmholtz entwickelt wurde, kurz nachdem Ohm die Fourier-Analyse für die Akustik nutzbar gemacht hatte. Durch dieses Denken im Frequenzbereich wurden die im Zeitbereich anzusiedelnden Punktreihenanalysen der alten Theoretiker verdrängt.

Im Fall obertonarmer Töne entstehen bei Intervallen nur geringe oder keine Obertonrauigkeiten, und die Störtheorie versagt. Auch ist mittlerweile gezeigt worden, dass die ebenfalls auf Helmholtz zurückgehende Hilfskonstruktion, welche »Ohrobertöne« für diesen Fall bemüht, nicht greift.<sup>54</sup> Eine stichhaltige Begründung von Konsonanz und Dissonanz ist nur auf der Grundlage der neuronalen Periodizitätsanalyse im Mittelhirn möglich. Die daraus abgeleitete Allgemeine Koinzidenzfunktion bestätigt Stumpfs Verschmelzungstheorie. Seine Bedeutung zeigt das Phänomen der Rauigkeit bei kleinen Intervallen: Hier wird die im Graphen der Allgemeinen Koinzidenzfunktion sichtbare hohe Verschmelzung (vgl. Abb. 8) durch Rauigkeit erheblich gestört. Dadurch werden kleine Intervalle zwischen der Prim und der Sekunde zu starken Dissonanzen.

Das Konsonanz- und Dissonanzempfinden hat also zwei widerstreitende Ursachen: einerseits die auf dem Mechanismus neuronaler Autokorrelation beruhende Verschmelzung, andererseits deren Störung durch Rauigkeit bei auftretenden kleinen Frequenzabständen.

49 Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, S. 310.

50 Kameoka/Kuriyagawa, *Consonance theory*; Terhardt, *Ein psychoakustisch begründetes Konzept der musikalischen Konsonanz*.

51 Vgl. Hartmann, *Signals, Sound, and Sensation*, S. 238ff.

52 Plomp/Levelt, *Tonal Consonance*.

53 Fletcher, *Loudness Masking*.

54 Plomp, *Detectible Threshold*; Goldstein, *Auditory Nonlinearity*.



## 9. Anhang: Zur Definition der Allgemeinen Koinzidenzfunktion

Ein Ton der Frequenz  $T^{-1}$  wird repräsentiert durch eine Reihe  $x(t)$  von Rechteckimpulsen  $I_\varepsilon$ :

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - nT) \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Autokorrelationsfunktion einer Rechteckimpulsfolge  $x(t)$  ist eine Folge  $a_\varepsilon(\tau)$  von Dreiecksimpulsen  $\Delta_\varepsilon(t)$ .<sup>55</sup>

Seien zwei Töne der Perioden  $T_1$  bzw.  $T_2$  als Rechteckimpulse dargestellt. Ist  $s$  das Schwingungsverhältnis der Intervalltöne, dann ist:  $T_1 = s \cdot T_2 \Leftrightarrow T_2 = T_1 \cdot s^{-1}$ . Dann sind die Rechteckimpulsketten für diese Töne:

$$x_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - nT_1) \quad x_2(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - mT_2) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - m s^{-1}T_1) \quad (\text{Gl. 2})$$

Das von ihnen gebildete Intervall ist eine Zeitfunktion, die auch vom Schwingungsverhältnis  $s$  abhängt. Es wird als Summe  $J(t)$  dieser Rechteckimpulsketten dargestellt:

$$J(t, s) := x_1(t) + x_2(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - nT_1) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(t - m s^{-1}T_1) \quad (\text{Gl. 3})$$

Die Autokorrelationsfunktion dieser Summe ist:

$$a_J(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} J(t) \cdot J(t + \tau) dt \quad (\text{Gl. 4})$$

Der Koinzidenzgrad des Intervalls  $J(t, s)$  mit dem Schwingungsverhältnis  $s$  wird durch die *Allgemeine Koinzidenzfunktion*  $\kappa(s)$  (Generalized Coincidence Function – GCF)<sup>56</sup> bestimmt. Sie hängt nur von der Variablen  $s$  des Schwingungsverhältnisses ab und ist von mir auf der Grundlage der quadrierten Autokorrelationsfunktion (»Energie der Autokorrelationsfunktion«) definiert worden:

$$\kappa(s) := \int_0^{50} a_J^2(\tau, s) d\tau \quad (\text{Gl. 5}).$$

Sie hat die Eigenschaft, dass sie es gestattet, für *jedes beliebige* Schwingungsverhältnis  $s$  einen Koinzidenzgrad zu berechnen. Damit erlaubt sie eine Verallgemeinerung der klassischen Koinzidenztheorie, die nur auf ganzzahlige Schwingungsverhältnisse anwendbar ist. Statt Rechteckimpulsen können auch andere Verteilungsfunktionen gewählt werden, die zum qualitativ gleichen Ergebnis führen.

<sup>55</sup> Ebeling, *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation*, S. 86, 192.

<sup>56</sup> Ebeling, *Neuronal periodicity detection*.

## Literatur

- Békésy, Georg von: *Experiments in Hearing*, New York: McGraw-Hill 1960.
- Borst, Marcus / Langner, Gerald / Palm, Günther: *A Biologically Motivated Neural Network for Phase Extraction from Complex Sounds*, in: *Biological Cybernetics* 90 (2004), S. 98–104.
- Cariani, Peter A. / Delgutte, Bertrand: *Neural Correlates of the Pitch of Complex Tones*, in: *Journal of Neurophysiology* 76/3 (1996), S. 1698–1734.
- Cheveigné, Alain de: *The Auditory System as a Separation Machine*, in: *Proceedings of the ATR workshop on events and auditory temporal structure* (1998), S. 1–7.
- Ebeling, Martin: *Verschmelzung und neuronale Autokorrelation als Grundlage einer Konsonanztheorie*, Frankfurt a.M.: Lang 2007.
- *Neuronal periodicity detection as a basis for the perception of consonance: A mathematical model of tonal fusion*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 124/4 (2008), S. 2320–2329.
- Euler, Leonhard: *Tentamen novae theoriae musicae ex certissimis harmoniae principijs dilucide expositae*, Petersburg: Academiae Scientiarum 1739.
- Fletcher, Harvey: *Loudness, masking and their relation to the hearing process and the problem of noise measurement*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 9 (1938), S. 275–293.
- Fourier, Jean Baptiste Joseph: *Théorie analytique de la chaleur*, Paris: Didot 1822.
- Galilei, Galileo: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze attenenti alla meccanica ed i movimenti locali*, Leiden: Elsevier 1638, als e-text auf: [www.liberliber.it/biblioteca/g/galilei](http://www.liberliber.it/biblioteca/g/galilei) (letzter Aufruf 15.04.2010).
- Goldstein, Julius L.: *Auditory Nonlinearity*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 41/3 (1967), S. 676–689.
- Hartmann, William Morris: *Signal, Sound, and Sensation*, New York: Springer 1998 / 42000.
- Helmholtz, Hermann von: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik* [1863; 61913], Hildesheim: Olms 1983.
- Kaiser-el-Safti, Margret: *Der »Witz« (in) der Tonpsychologie Carl Stumpfs*, in: *gestalt theory* 31/2 (2009), S. 143–174.
- Kameoka, Akio / Kuriyagawa, Mamoru: *Consonance Theory. Part I: Consonance of Dyads / Part II: Consonance of Complex Tones and Its Calculation Method*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 45/6 (1969), S. 1451–1459.
- 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.
- *Evidence for Neuronal Periodicity Detection in the Auditory System of the Guinea Fowl. Implications for Pitch Analysis in the Time Domain*, in: *Experimental Brain Research* 52 (1983), S. 333–355.
- Langner, Gerald / Schreiner, Christopher E.: *Periodicity Coding in the Inferior Colliculus of the Cat. I. Neuronal mechanisms. II. Topographical Organization*, in: *Journal of Neurophysiology* 60/6 (1988), S. 1799–1822 / 1823–1840.
- Langner Gerald / Braun, Susanne: *Nachweis einer orthogonalen Repräsentation von Periodizitäts- und Frequenzinformation im Colliculus inferior mit der 2-Deoxyglucose Methode*, in: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2000 Oldenburg*, hrsg. von Annette Schomburg und Albert Still, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik, S. 300f.
- Licklider, Joseph Carl Robnit: *A Duplex Theory of Pitch Perception*, in: *Experimenta* 7/4 (1951), S. 128–134.
- Lipps, Theodor: *Tonverwandtschaft und Tonverschmelzung*, in: *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 19 (1899), S. 1–40.
- Mersenne, Marin: *Harmonie Universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique*, Paris 1636.
- Ohm, Georg Simon: *Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorien der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen*, in: *Annalen der Physik und Chemie* 59/8 (1843), S. 513–565.
- Papoulis, Athanasios: *The Fourier Integral and Its Applications*, New York: McGraw-Hill 1962.
- Plomp, Reinier: *Detectability Threshold for Combination Tones*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 37/6 (1965), S. 1110–1123.
- Plomp, Reinier / Levelt, William J. M.: *Tonal Consonance and Critical Bandwidth*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 38 (1965), S. 548–560.
- Rhode, William S.: *Interspike Intervals as Correlate of Periodicity Pitch in Cat Cochlear Nucleus*, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 97/4 (1995), S. 2414–2429.
- Romani, Gian Luca / Williamson, Shannon J. / Kaufmann, Lloyd: *Tonotopic organization of the human auditory cortex*, in: *Science* 216 (1982), S. 1339f.
- Rose, Jerzy E. / Brugge, John F. / Anderson, David J. / Hind, Joseph E.: *Phase-locked Response to Low-frequency Tones in Single Auditory Nerve Fibers of the Squirrel Monkey*, in: *Journal of Neurophysiology* 30/4 (1967), S. 769–793.
- Stumpf, Carl: *Tonpsychologie* [1883/90], 2 Bde., Hilversum: Knuf 1965
- *Neueres zur Tonverschmelzung*, in: *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 15 (1897), S. 280–303 / 354.
- Terhardt, Ernst: *Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz*, in: *Acustica* 36 (1976/1977), S. 121–137.

- Tramo, Marc J. / Cariani, Peter A. / Delgutte, Bertrand / Braida, Louis D.: *Neurobiological Foundations for the Theory of Harmony in Western Tonal Music*, in: *The Biological Foundations of Music* (Annals of the New York Academy of Sciences 930), hrsg. von Robert J. Zatorre und Isabelle Peretz, New York: The New York Academy of Science 2001, S. 92–116.
- Wiener, Norbert: *Generalized Harmonic Analysis*, in: *Acta Mathematica* 55/1 (1930), S. 118–258.
- Woschni, Eugen-Georg: *Informationstechnik*, Berlin: VEB Verlag Technik 1988.
- Yost William A.: *Fundamentals of Hearing. An Introduction*, San Diego: Academic Press 2000.
- Zwicker, Eberhard / Fastl, Hugo: *Psychoacoustics. Facts and Models*, Berlin: Springer 1999.
- Zwicker, Eberhard / Feldkeller, Richard: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, Stuttgart: Hirzel 1967.

© 2010 Martin Ebeling (martin.ebeling@tu-dortmund.de)

Technische Universität Dortmund

Ebeling, Martin (2010), »Konsonanzempfinden und Periodizitätsanalyse im auditorischen System« [Consonance Perception and Analysis of Periodicity in the Auditory System], in: *Musiktheorie als interdisziplinäres Fach. 8. Kongress der Gesellschaft für Musiktheorie Graz 2008* (GMTH Proceedings 2008), hg. von Christian Utz, Saarbrücken: Pfau, 629–646. <https://doi.org/10.31751/p.101>

SCHLAGWORTE/KEYWORDS: Allgemeine Koinzidenzfunktion; Carl Stumpf; consonance; dissonance; Dissonanz; generalized coincidence function; Georg Simon Ohm; Hermann von Helmholtz; Jean Baptiste Joseph Fourier; Konsonanz; Rauheit; roughness; sensorische Konsonanz; sensory consonance; spectral analysis; Spektralanalyse; tonal fusion; Verschmelzung

eingereicht / submitted: 30/12/2008

angenommen / accepted: 20/04/2010

veröffentlicht (Druckausgabe) / first published (printed edition): 01/10/2010

veröffentlicht (Onlineausgabe) / first published (online edition): 07/03/2022

zuletzt geändert / last updated: 12/09/2010