

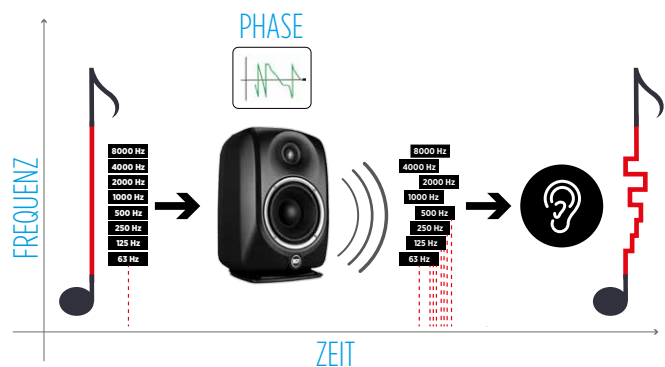
www.rcf.it Ein neuer Weg zur Linearität bei RCF Lautsprechersystemen

In diesem Whitepaper wollen wir erklären, wie wichtig es ist, die Phasenverzerrungen bei Lautsprechersystemen zu vermeiden und, wie RCF es geschafft hat, mit FirPHASE Processing eine nahezu breitbandige, bis in den Sub-Bereich reichende Phasenlinearität ohne störende Delays zu erreichen.

Ein kurzer Blick in die Historie der Phasen-Wahrnehmung

Das akustische Gesetz von Georg Ohm (1843) besagt, dass ein musikalisches Ereignis vom Ohr als Bestandteil einer Reihe von reinen harmonischen Tönen wahrgenommen wird. Diese These wurde in den folgenden Jahrzehnten von Wissenschaftlern wie Helmholtz, Seebeck, Schroede oder Lipshitz oft diskutiert und weitgehend widerlegt. Man kam zu der Erkenntnis, daß die hörbare Wahrnehmung ausschließlich auf dem Amplitudenspektrum eines Schallereignisses beruht, unabhängig von Phasenwinkeln der verschiedenen Informationen, die in diesem Spektrum enthalten sind. Lange Debatten wurden über 20 Jahre lang in der wissenschaftlichen Zeitschrift „Annalen der Physik und Chemie“ geführt, gerieten jedoch in Vergessenheit und wurden erst 1959 von Schroeder in seinem Werk „Neue Resultate in Bezug auf monaurale Phasenempfindlichkeit“ wieder aufgegriffen, wo er dieses Phänomen beschreibt. Schroeder kommt zu dem Ergebnis, dass Ohm's Schlussfolgerung falsch ist und nur in ein paar Fällen Gültigkeit hat. Und wieder stritten sich die Gelehrten. In einem Beitrag zur EAS Conference im Jahr 1996 haben Johansen und Rubak geschrieben, dass „das Resultat sei, dass man die Phasenverläufe nicht einfach vernachlässigen darf und man in geeigneter Form die Aufgabenstellung des EQ-ings lösen müsse“.

Die Wahrnehmung des Phasenspektrums wurde auch in verschiedenen anderen Bereichen untersucht, so z.B. für die Akustik von Konzerthallen, Maskierung, Sprachwiedergabe und Binauralem Rendering (Stereo-Wiedergabe).



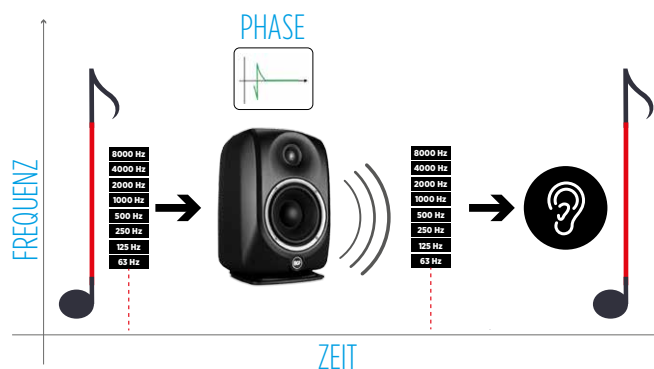
Figur 1 – Bildliche Darstellung der monauralen Phasenverzerrungen generiert durch ein Lautsprechersystem bzw. dessen Komponenten, EQ, Frequenzweichen und Verstärker.

0° Linear Phase

Linear-Phase oder konstante Gruppenlaufzeit beschreibt die Charakteristik eines linearen Systems, in dem alle spektralen Inhalte eines Signals mit der gleichen Geschwindigkeit übertragen werden. In besonderen Anwendungen kann ein lineares Phasen System als 0°-Phase bezeichnet werden: alle spektralen Inhalte eines Signals stehen zeitgleich am Ausgang zur Verfügung. In einem System mit linearem Frequenzgang und 0° Phase, ist die Form des Ausgangssignals eine exakte Kopie des Eingangssignals, wobei die Stärke des Ausgangssignals nur vom Gain des Systems abhängt.

Mehrwege-Lautsprechersysteme und auf IIR-Filter basierende analoge oder digitale Frequenzweichen sind typische Beispiele von nicht-linearen Phasenübertragungen die auch mit nicht unerheblichen Zeit- und Phasenverschiebungen der Allpass Filter in der Summierung von elektrischer oder akustischer Wiedergabe verbunden sind.

„Transparenter Sound“ ist das Ziel eines Lautsprecherentwicklers, wobei der Lautsprecher in der Lage sein soll, einen Sound so nah wie möglich am Original zu reproduzieren, einem sehr wichtigen Aspekt wenn es um die Übertragung von Stimmen geht. Jegliche Änderung der Charakteristik einer Stimme oder eines Instrumentes sollte nur vom Musiker oder der Person am Mischpult von Hand vorgenommen werden, und nicht durch die „vorgefärbten Eigenschaften“ eines Lautsprechersystems bestimmt werden. Insbesondere Klassische Musik profitiert von der unveränderten Verstärkung und/oder Übertragung.



Figur 2 – Bildliche Darstellung eines idealen linearen Lautsprechersystems.

Das Problem des Rechtecks

Ein 0°-Phase Lautsprechersystem ermöglicht die zeitgleiche Wiedergabe aller Frequenzen ohne Zeitversatz, sodass es eine echte Rekonstruktion des Originalsignals ist. Einer der wichtigsten und auch hörbaren Effekte in der Übertragungskette zwischen „nicht 0°-Phase“ und 0°-Phase“ ist die optimale Wiedergabe der Transienten. Nehmen wir als Beispiel eine Snare Drum oder eine Gitarrensaite: eine Menge Energie und breites Frequenzspektrum in extrem kurzer Zeit! Wenn nun der Impuls und die Frequenzen dieser Instrumente nicht zeitgleich am Ohr ankommen, verliert der Impuls Energie, Dynamik und Detailinformationen durch die Laufzeitunterschiede. Diesen Einfluß kann man sich anhand eines sauberen Rechtecksignals vorstellen, das sich ja aus der Summe fundamentaler Sinuswellen und deren ungeraden Harmonischen bzw. Formanten bei höheren Frequenzen zusammensetzt. Werden nun die Harmonischen in Relation zu dem Sinussignal zeitversetzt wiedergegeben, zerfällt das Ursprungssignal.

	Rechtecksignal wie es am Lautsprechereingang anliegt.	
(A)	Vom Lautsprecher mit phasenverzerrten harmonischen wiedergegebenes Rechtecksignal.	
(B)	Vom Lautsprecher mit harmonischen in korrekter Phasenlage wiedergegebenes Rechtecksignal.	

Tabelle 1 – Darstellung der Wiedergabe eines Rechtecksignals bei einem (A) Phasenverzerrten System und (B) einem Phasen-Koherenten System.

Der Lautsprecher besteht nicht nur aus den einzelnen Chassis, sondern auch die Filter der Frequenzweiche und des EQ sowie die Gehäusekonstruktion spielen eine wesentliche Rolle für das Endergebnis. Analoge oder digitale IIR Filter produzieren immer Phasenverzerrungen und addieren diese zu denen, die schon vom Lautsprecher selbst produziert werden.

FIR Filter zur Linearisierung der Phase

Moderne DSP-Bausteine erlauben schon eine vor-Kompensation dieser Phasenverzerrungen um eine möglichst „gerade“ Phasenlage (0°) zu liefern. Ein praktischer Ansatz dies zu tun sind FIR Filter (Finite Impulse Response). Ein FIR Filter ist nichts anderes als ein Satz von Koeffizienten die über die Zeit als Impulsantwort (IR) darstellbar sind. Der Filter wird auf das digitale Audiosignal gerechnet, um es anhand der Impulsantwort zu verändern. Dieser Vorgang nennt sich „convolution“ bzw. Faltung.

Diese Art der Filterung prägt dem Nutzsignal eine zeitliche Verzögerung in der Länge des Filters bzw. der Durchlaufzeit des Signals auf. Glücklicherweise ist diese Verzögerung jedoch für sämtliche Frequenzen gleich. Daher die Bezeichnung der „linearen Phase“. Mit einem FIR Filter mit linearer Phase lässt sich der Frequenzgang eines Signals verändern ohne die Phase zu verzerren. Er kann also wie ein (konventioneller) IIR Filter zur Entzerrung genutzt werden, hat jedoch nicht die negativen Nebeneffekte auf die Phase. Zum Beispiel lassen sich mit FIR Filtern Hoch- oder Tiefpass Frequenzweichen mit sehr steilen Übergangsfanken realisieren ohne die aus der IIR Filterung bekannten Phasenprobleme wie etwa die 180° Phasendifferenz bei Linkwitz-Riley zweiter Ordnung zwischen Hoch- und Tiefpass-Ausgang.

Laufzeitprobleme bei FIR Filtern

Nicht alles, was glitzert, ist auch Gold: Auch FIR Filter haben einen Preis. Die tiefste Frequenz, die kontrolliert bzw. verändert werden soll, also die Auflösung des Filters, verhält sich proportional zur Filterlänge in Samples und beeinflusst somit negativ die Gesamtlatenz des DSPs. Mit anderen Worten: Je tiefer die zu modifizierende Frequenz desto länger ist die Ausgabeverzögerung des Signals. Wie in der Tabelle 2 zu sehen ist, hat ein für alle hörbaren Frequenzen nutzbarer Filter eine Verzögerung von 21ms zur Folge (bei 48kHz Samplingfrequenz), was für Liveaufführungen klar außerhalb des tolerablen Bereichs liegt. Bei Nutzung von FIR Filtern handelt es sich also stets um einen Kompromiss zwischen Auflösung und Latenz.

Mit einem FIR Filter lässt sich nicht nur die Amplitude (Frequenzgang) sondern auch alleinig die Phasenlage verändern um Abweichungen von 0° auf einem Großteil der Frequenzen zu korrigieren. Solässt sich unter Berücksichtigung der Latenz, eine Art Dirac'sche Deltafunktion bilden - auch bekannt als „Allpass Filter“. Eine Impulsantwort die nur die Zeitlichen Aspekte (Phase) des Signals modifiziert, die Amplitude jedoch unberührt lässt.



Figur 3 – Summe der Phasenverläufe von FIR-Filter und Lautsprecher.

Number of taps	Sampling freq. 48 kHz		Sampling freq. 96 kHz	
	Resolution (Hz)	Delay (ms)	Resolution (Hz)	Delay (ms)
32	1500	0.33	3000	0.17
256	188	2.7	375	1.3
1024	47	11	94	5.3
2048	23	21	47	11
4096	12	43	23	21

Tabelle 2 – Von FIR-Filtern aufgeprägtes Delay.

Die Zeitliche Ausrichtung der einzelnen Frequenzkomponenten zueinander wird in Impulsmessungen deutlich sichtbar. Die Phasenkorrektur verbessert die Dynamik des vom Lautsprecher reproduzierten Signals, da sich die Energie auf einen gemeinsamen Zeitpunkt konzentriert statt leicht versetzt wiedergegeben zu werden.

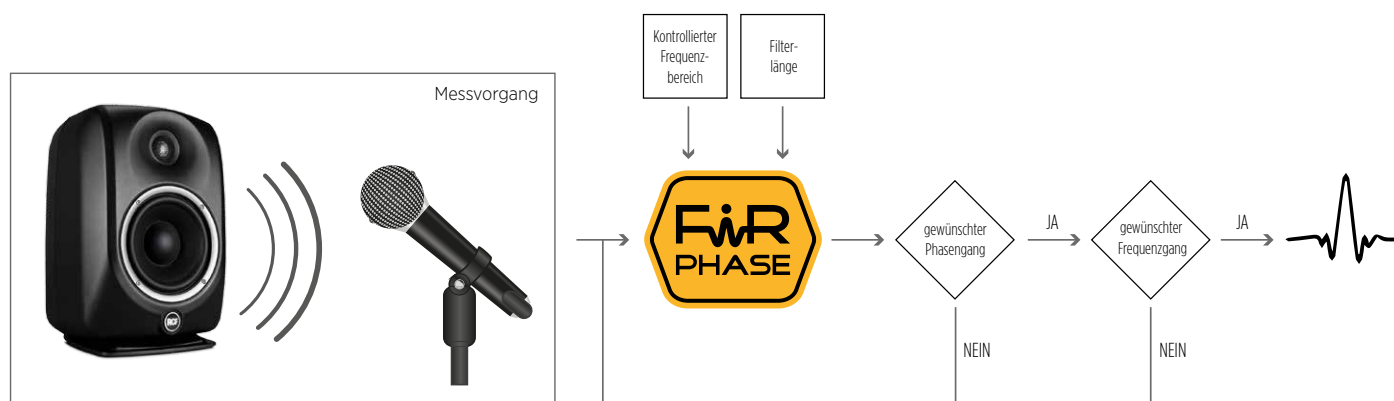
Dem Design eines solchen FIR Filters zur Phasenkorrektur sollte stets eine besonders präzise Messung des Lautsprechers vorangehen.

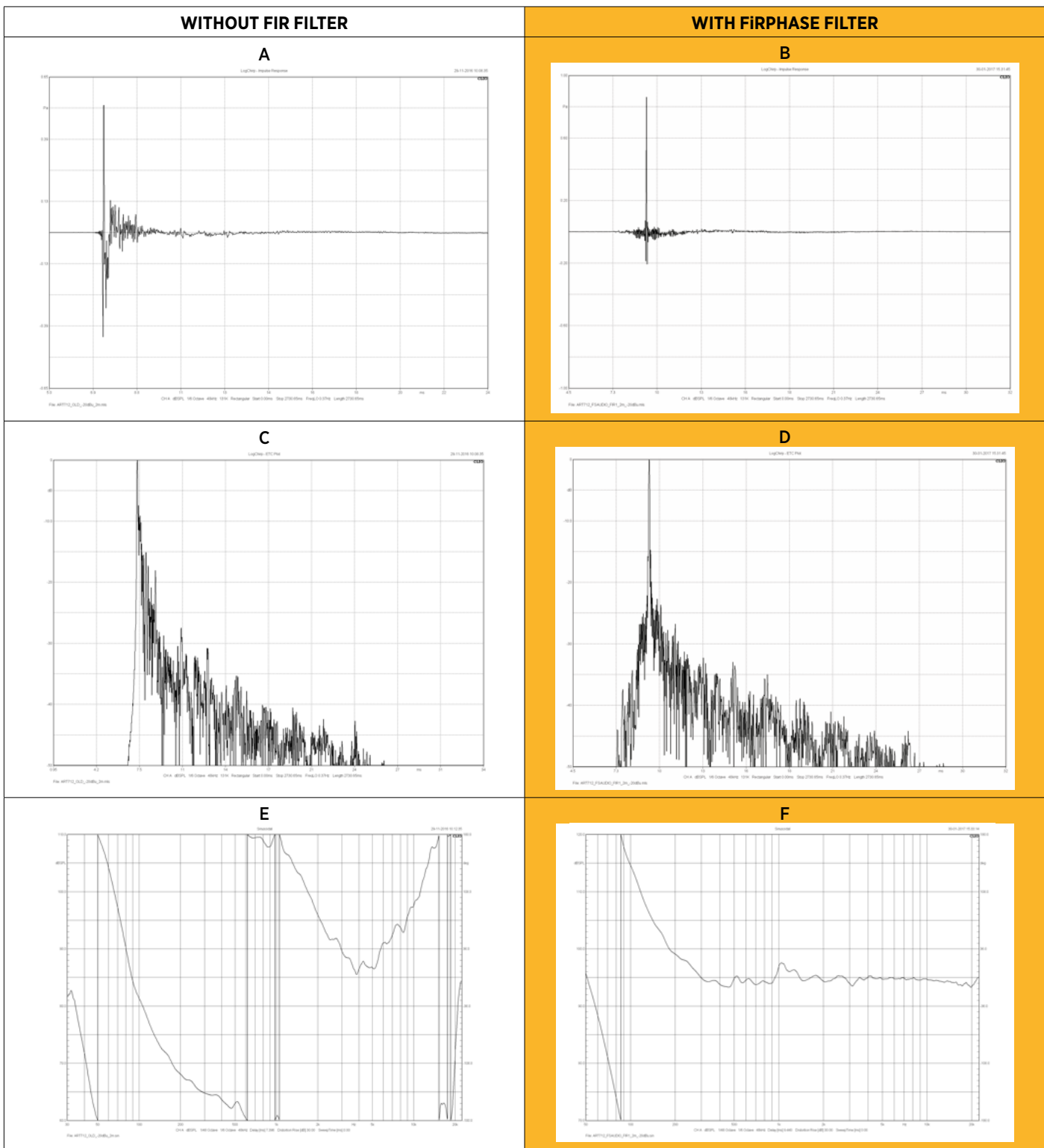
FiRPHASE

RCF FiRPHASE processing nutzt diese vorrangingende Messung als Basis und versucht dann den Phasenverlauf des Lautsprechers zu invertieren ohne den Frequenzgang zu verändern.

Das Herz dieser Technik ist die mathematische „Methode der kleinsten Quadrate“ um eine Eingangskurve zu ermitteln. Diese wird mit einem proprietären RCF Algorithmus kombiniert, der die idealen FIR Filter Koeffizienten errechnet, um innerhalb der tolerablen Zwänge Phasen- und Amplitudenverläufe (falls nötig) zu korrigieren. Dies geschieht durch Verrechnen (Convolution) des Eingangssignals mit der aus dem FiRPHASE processing resultierenden Impulsantwort unter Berücksichtigung von z.B. Schwachpunkten der Komponenten, Resonanzen oder Auslöschungen, die aus der Gehäusekonstruktion resultieren.

Diese Technik ermöglicht dem Designer die Kontrolle der Phase bis in den unteren Mittenbereich bei vergleichsweise kurzen Filtern, resultierend in höherer Auflösung als der Theoretische Ansatz verspricht.





Figur 4 – A: Impulsantwort ohne FIR, B: Impulsantwort nach FIR Filterung, C: Energie/Zeit Kurve ohne FIR, D: Energie/Zeit Kurve nach FIR Filterung, E: Phasenverlauf ohne FIR, F: Phasenverlauf nach FIR Filterung

REFERENZEN

Alcántara, J. I., Holube, I., & Moore, B. C. (1996). Effects of phase and level on vowel identification: data and predictions based on a nonlinear basilar-membrane model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4 Pt 1), 2382–92. <https://doi.org/10.1121/1.417948>

Breebaart, J., Nater, F., & Kohlrausch, A. (2010). Spectral and spatial parameter resolution requirements for parametric, filter-bank-based HRTF processing. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 58(3), 126–140.

Chappel, R., Schwerin, B., & Paliwal, K. (2015). Phase distortion resulting in a just noticeable difference in the perceived quality of speech. *Speech Communication*, 81, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.005>

Griesinger, D. (2010). Phase coherence as a measure of acoustic quality part 1. *Proceedings 20th International ICA*, (August), 1–7.

Hopkins, K. (2008). The role of temporal fine structure information in the perception of complex sounds for normal-hearing and hearing-impaired subjects. (November).

Johansen, L. G., & Rubak, P. (1996). The Excess Phase in Loudspeaker / Room Transfer functions: Can it be Ignored in Equalization Tasks? 100th Audio Engineering Society Convention.

Kohlrausch, a., & Sander, A. (1995). Phase effects in masking related to dispersion in the inner ear. II. Masking period patterns of short targets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1817–1829. <https://doi.org/10.1121/1.413097>

Koya, D. (n.d.). Aural Phase Distortion Presented by Daisuke Koya In Fulfillment of the Master's of Science Thesis Requirement.

Krauss, G. J. (2006). Advantages of FIR Filters in Digital Loudspeaker Controllers. *Aes*.

Lipshitz, S. P., Pooock, M., & Vanderkooy, J. (1982). On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, 30(9), 580–595. Retrieved from <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3824>

Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S., Siltanen, S., & Savioja, L. (2011). Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), EL223–L228. <https://doi.org/10.1121/1.3579145>

Mowlaee, P., Saiedi, R., & Stylianou, Y. (2016). Advances in phase-aware signal processing in speech communication. *Speech Communication*, 81, 1–29. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.002>

Plomp, R., & Smoorenburg, G. (1970). Frequency analysis and periodicity detection in hearing. *Perception*, 1–6. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Frequency+Analysis+and+Periodicity+Detection+in+Hearing#0>

Pobloth, H., & Kleijn, W. B. (1999). On phase perception in speech. 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings. ICASSP99 (Cat. No.99CH36258), 1, 29–32 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICASSP1999.758054>

Turner, R. S. (1977). The Ohm-Seebeck dispute, Hermann von Helmholtz, and the origins of physiological acoustics. *British Journal for the History of Science*, 10(34 Pt 1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0007087400015089>

Welti, T. (2015). Factors that Influence Listeners' Preferred Bass and Treble Balance in Headphones.