

Vergleich von Kanaldifferenzen und nichtlinearen Verzerrungen mit dem Verkaufspreis von Kopfhörern

Roman Schlieper¹, Benjamin Pries¹, Jürgen Peissig¹

¹ *Institut für Kommunikationstechnik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Deutschland*

Email: schlieper@ikt.uni-hannover.de

Einleitung

Kopfhörer sind aus unserer heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Der Markt wächst stetig und die Umsätze konnten sich in Deutschland in den vergangenen sieben Jahren von 210 Mrd.€ (2012) auf 427 Mrd.€ (2019) mehr als verdoppeln [1]. Neben der allgegenwärtigen Verfügbarkeit zum ungestörten, portablen Musikgenuss mit immer neuen Zusatzfunktionen wie aktiver Geräuschunterdrückung oder drahtloser Datenübertragung via Bluetooth nehmen Kopfhörer auch im stark wachsenden Bereich von Virtual- und Augmented-Reality Anwendungen eine wichtige Stellung ein. Dieser Beitrag basiert auf den Untersuchungen von Völk [2], der die interauralen Pegel- und Laufzeitdifferenzen bei drei hochpreisigen Kopfhörern untersucht hat und den Untersuchungen von Breebart [3], der die Korrelation zwischen dem Frequenzgang eines Kopfhörers und des Verkaufspreises untersucht hat. Ziel dieser Untersuchungen ist es, interaurale Pegel- und Laufzeitdifferenzen dem Verkaufspreis gegenüber zu stellen und zu überprüfen, ob ein Zusammenhang besteht. Die Wahl der Parametergruppen Kanaldifferenzen und nichtlineare Verzerrungen resultiert aus der Überzeugung, dass diese Parameter neben dem Frequenzgang am stärksten zum Klangbild beitragen. Während interaurale Pegel- und Laufzeitdifferenzen dem Menschen in der natürlichen Umgebung erst die Richtungslokalisierung einer Schallquelle ermöglichen, sollten durch den Kopfhörer verursachte Kanaldifferenzen möglichst unter der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegen, um ein stabiles Stereobild zu ermöglichen und um eine ungewollte Lateralisierung des Hörereignisses zu vermeiden. Geringe Verzerrungswerte insbesondere auch bei hohen Anregungspegeln stellen zusätzlich eine gewünschte Eigenschaft dar, die gerade von hochpreisigen Kopfhörern erwartet wird.

Messaufbau und -durchführung

Untersucht wurden insgesamt 43 Kopfhörer (28 Modelle) unterschiedlichster Bauformen und Preisklassen. 18 Kopfhörer waren mit einer Geräuschunterdrückungsfunktion (ANC) ausgestattet, wobei diese bei einem Kopfhörer nicht deaktiviert werden konnte. Insgesamt konnte somit 60 Datensätze untersucht werden, wobei jeder Kopfhörer fünf mal gemessen wurde und bei jeder Messung der Kopfhörer neu positioniert wurde. Alle Kopfhörer wurden im reflexionsarmen Raum (RAR) des Instituts auf einem kalibrierten low-noise Kunstkopf (G.R.A.S. 45BB) mit einem Audioanalyzer (AudioPrecision APx525) vermessen. Bei der Messdurchführung für die fünf Messungen

wurde darauf geachtet, dass die Standardabweichung insgesamt in einem Bereich unterhalb von 2 dB bleibt. Somit wurde jeweils der Best-Case des Frequenzgangs, des Phasengangs und der Gruppenlaufzeit gemittelt. Für den Phasengang und die Gruppenlaufzeit erfolgt diese Mittelung durch Berechnung des arithmetischen Mittelwerts an jedem Messpunkt, während der Frequenzgang entsprechend den normativen Vorgaben [4] über die Leistung (quadratisch) gemittelt wird.

Ergebnisse Pegeldifferenzen

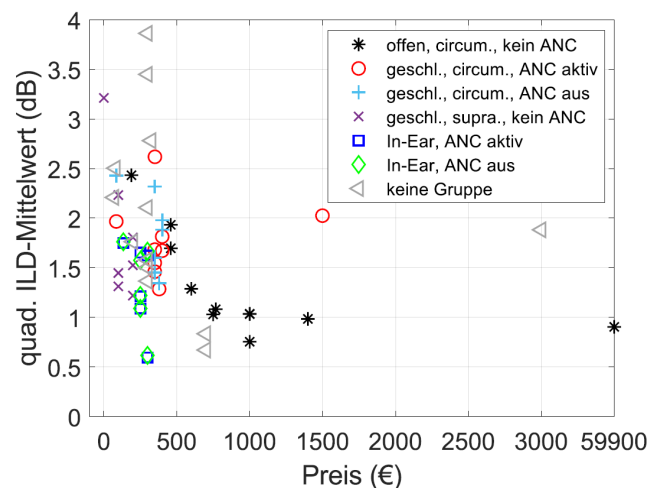


Abbildung 1: Quadratischer ILD Mittelwert über 1/3 Oktave gewichtet für alle gemessenen Kopfhörer.

Die Berechnung der Pegeldifferenzen zwischen den beiden Kopfhörerkanälen erfolgt durch Subtraktion des Frequenzgangs des rechten Kanals vom linken. Die so gewonnene Differenz wird anschließend um die Differenz der Frequenzgänge der Ohrsimulatoren korrigiert. Um aus dem Pegeldifferenzverlauf eine Darstellung zu gewinnen, die zusätzlich die Schallauswertung durch das menschliche Gehör berücksichtigt, werden die Pegeldifferenzen, wie in [5] vorgeschlagen, ebenfalls in 1/3-Oktavbändern berechnet.

Abbildung 1 zeigt die Messergebnisse für alle untersuchten Kopfhörer in Abhängigkeit des derzeitigen Verkaufspreises. In der Gruppe der offenen und halb-offenen Kopfhörer besteht ein starker Zusammenhang zwischen den ermittelten Pegeldifferenzen und dem Verkaufspreis, der gut durch eine exponentielle Funktion genähert werden kann. Wie Abbildung 2 zeigt, kann

für den quadratischen Mittelwert in 1/3-Oktavfiltern dieser Gruppe eine hohe Korrelation ($r=-0.85$, $p=0.001$) gefunden werden.

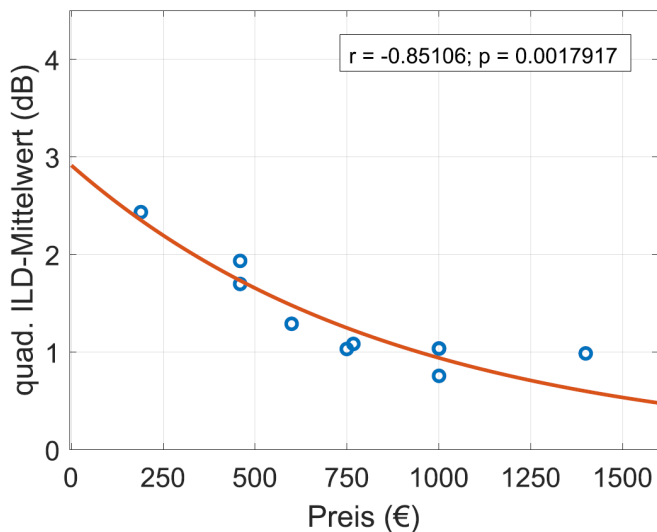


Abbildung 2: Quadratischer ILD Mittelwert über 1/3 Oktave gewichtet für alle offenen Kopfhörer.

Anders als für offene Kopfhörer kann für die geschlossenen, circumauralen Kopfhörer mit aktiviertem und deaktiviertem ANC keine Korrelation von quad. Mittelwert der Pegeldifferenzen und Verkaufspreis gefunden werden. Die Werte streuen, ohne dass dabei die Tendenz zu einem monoton fallenden Verlauf ersichtlich wird. Hierbei ist anzumerken, dass die Untersuchung für geschlossene circumaurale Kopfhörer auf nur 5 Modelle zurückzuführen sind. Bei den supraauralen Kopfhörern, von denen in dieser Studie 3 Modelle untersucht wurden, konnte ebenfalls keine signifikante Korrelation mit dem Verkaufspreis mit dem quad. Mittelwert gefunden werden, auch wenn eine Tendenz in den Ergebnissen zu erkennen ist. Gleiches ist in den Ergebnissen für In-Ear Kopfhörern zu erkennen.

Interaurale Phasenlaufzeitdifferenz

Die interaurale Phasenlaufzeitdifferenz entspricht der Laufzeitdifferenz der Phasenfeinstruktur der Signalwellenform und wird aus der Subtraktion der gemittelten Phasengänge berechnet. Aus der Literatur [6, 7] ist bekannt, dass die kleinste gerade noch wahrnehmbare Phasenlaufzeitdifferenz bei 1 kHz auftritt und ca. $10 \mu\text{s}$ beträgt. Oberhalb von 1 kHz steigt die Wahrnehmungsschwelle der Phasenlaufzeitdifferenz deutlich an und bereits für eine Frequenz von 1.5 kHz ist der Schwellwert soweit angestiegen, dass er nicht mehr ermittelt werden konnte. Anders als bei den Pegeldifferenzen liegen keine Phasengänge der Ohrsimulatoren vor, sodass diese als ideal gleich angesehen werden müssen und keine Korrektur vorgenommen werden kann. Grundlage für diese Untersuchung war der quadratische Mittelwert, wobei jedoch nur der Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.5 kHz berücksichtigt wird. Die untere Grenze ist wie in [2] gewählt, um große Phasenlaufzeitdifferenzen, die durch möglicherweise unzureichendes SNR

im tieffrequenten Bereich auftreten können, nicht zu berücksichtigen.

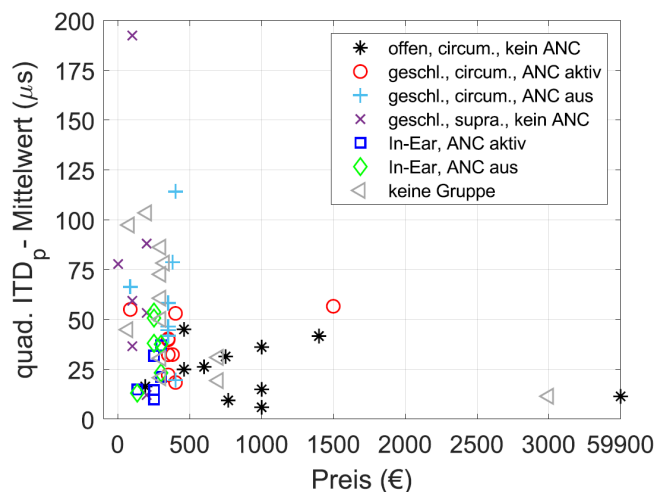


Abbildung 3: Quadratischer ITD Mittelwert für alle untersuchten Kopfhörer.

Abbildung 3 zeigt, dass es bei Kopfhörern unabhängig vom Preis zu Phasenlaufzeitdifferenzen in deutlich wahrnehmbarer Größenordnung kommen kann und bestätigt somit die Beobachtungen von [2]. Innerhalb der Gruppen kann kein klarer Zusammenhang zwischen dem quad. Mittelwert Phasenlaufzeitdifferenz und dem Verkaufspreis hergestellt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es bei allen Kopfhörern zu Phasenlaufzeitdifferenzen kommen kann, die über der Wahrnehmungsschwelle liegen. Es zeigt sich, dass mit steigendem Verkaufspreis der quad. Mittelwert der Phasenlaufzeitdifferenzen abnimmt, der ein Maß für die vorzeichenunabhängige Phasenlaufzeitdifferenz in dem genannten Frequenzbereich ist.

Interaurale Gruppenlaufzeitdifferenzen

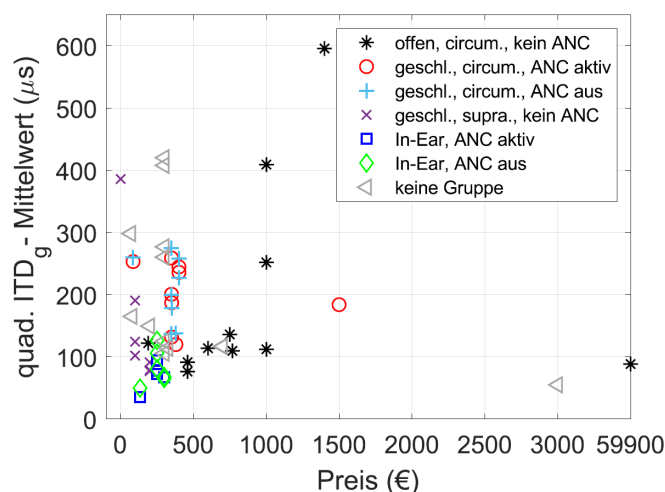


Abbildung 4: Quadratischer ITD Mittelwert für alle untersuchten Kopfhörer.

Für die Gruppenlaufzeitdifferenzberechnung wird analog zur Phasenlaufzeit vorgegangen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der quadratische Mittel-

wert in dem Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 kHz berechnet wird, da insbesondere hier die Gruppenlaufzeit den Klang und mitunter auch die laterale Schallwahrnehmung beeinflusst. Abbildung 4 zeigt die quad. Mittelwerte der Gruppenlaufzeitdifferenz, die für fast alle Kopfhörer in einem deutlich wahrnehmbaren Bereich liegen. Anders als für die Phasenlaufzeitdifferenz kann für die Gruppenlaufzeitdifferenz keinerlei Zusammenhang mit dem Verkaufspreis hergestellt werden. Die ermittelten Werte liegen für alle Kopfhörer grundsätzlich in der gleichen Größenordnung wie die von [2]. Die Mittelung des quad. Mittelwerts in den Preis-Quantilen verdeutlicht, dass keine Verbesserung der Gruppenlaufzeitdifferenz mit steigendem Verkaufspreis einhergeht (25% Quantil: 158,84 μ s; 25-75% Quantil: 171,78 μ s; 75% Quantil: 175,49 μ s).

Nichtlineare Verzerrungen

Die Untersuchung der nichtlinearen Verzerrungen erfolgte sowohl auf Grundlage von klassischen Größen, wie dem Klirrfaktor sowie Intermodulations- und Differenzfrequenzverzerrungen, als auch mit Hilfe von modernen Qualifizierungsmethoden, die Besonderheiten des auditiven Systems und psychoakustische Aspekte berücksichtigen, um eine möglichst hörgerechte Bewertung der Verzerrungen zu ermöglichen. Es konnte für keine dieser Größen ein signifikanter Zusammenhang mit dem Verkaufspreis ermittelt werden. Einschränkend zu dieser Erkenntnis muss angeführt werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Anregungspegel nicht ausreichend hoch gewählt wurden, um die Kopfhörer in einem deutlich nichtlinearen Bereich zu betreiben. Nichtsdestotrotz konnte gezeigt werden, dass die in Datenblättern häufig aufgelisteten Verzerrungswerte (THD, ...) bei dem Normanregungspegel 94 dB SPL keine preisabhängigen Qualitätsindikatoren sind, da sie sich zwischen teuren und billigen Kopfhörern nicht signifikant unterscheiden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei offenen Kopfhörern ein starker, negativer Zusammenhang zwischen dem Verkaufspreis und der Größe der ermittelten Pegeldifferenzen gefunden wurde. Ein teurerer Kopfhörer liefert dabei nicht nur insgesamt geringere ILDs, sondern diese variieren auch über den gesamten Frequenzbereich weniger. Für nahezu alle Kopfhörer können allerdings Phasenlaufzeitdifferenzen ermittelt werden, die deutlich über der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegen, wobei eine Tendenz hin zu fallenden Werten bei steigendem Preis erkennbar ist. Für die Gruppenlaufzeitdifferenz ergeben sich ebenso Werte in einer Größenordnung, die auf eine deutliche Wahrnehmbarkeit zumindest in Form von Klangfärbung schließen lassen. Es kann allerdings keine Verbesserung von Dtg mit steigendem Verkaufspreis des Kopfhörers ausgemacht werden. Bei der Untersuchung nichtlinearer Verzerrungen und einem Anregungspegel von 94 dB @1 kHz konnte kein signifikanter Zusammenhang mit dem Verkaufspreis des Kopfhörers gefunden.

Literatur

- [1] Statista. *Kopfhörer Deutschland* Statista Marktprognose. 7.09.2020. url: <https://de.statista.com/outlook/15010600/137/kopfhoeerer/deutschland>.
- [2] Florian Völk, Jörg Encke, Jasmin Kreh und Werner Hemmert. *Relevance of Headphone Characteristics in Binaural Listening Experiments: A Case Study*. 143th AES Convention New York. 2017. url: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19291>.
- [3] Jeroen Breebaart. *No correlation between headphone frequency response and retail price*. In: The Journal of the Acoustical Society of America 141.6 (2017), EL526. issn: 0001-4966. doi: 10.1121/1.4984044.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 60268-7:2011 *Elektroakustische Geräte – Teil 7: Kopfhörer und Ohrhörer*.
- [5] Christopher J. Struck. *Refinements in the Electroacoustic Testing of Headphones*. AES Conference on Headphone Technology Aalborg. 2016. url: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18364>.
- [6] J. Zwislocki und R. S. Feldman. *Just Noticeable Differences in Dichotic Phase*. In: The Journal of the Acoustical Society of America 28.5 (1956), S. 860–864. issn: 0001-4966. doi: 10.1121/1.1908495.
- [7] R. G. Klumpp und H. R. Eady. *Some Measurements of Interaural Time Difference Thresholds*. In: The Journal of the Acoustical Society of America 28.5 (1956), S. 859–860. issn: 0001-4966. doi:10.1121/1.1908493.