

Frühe Arbeiten zur Lautheit breitbandiger Tonkomplexe

Armin Kohlrausch^{1,2}

¹ *Human-Technology Interaction, TU Eindhoven, P.O. Box 513, NL-5600 MB Eindhoven, The Netherlands*

² *Philips Research Europe, HTC 36, NL-5656 AE Eindhoven, The Netherlands, Email: armin.kohlrausch@philips.com*

Einleitung

Für die Entwicklung psychoakustischer Messverfahren und Konzepte ist die Bestimmung der Lautheit von großer Bedeutung. Der Lautheitsvergleich zwischen Stimuli verschiedener Frequenz ist die Grundlage der Kurven gleicher Lautheit, die international standardisiert sind und in der Form der A-Gewichtung bei rein physikalischen Pegelmessungen berücksichtigt werden. Der Einfluss der Bandbreite eines Schalles auf die Lautheitswahrnehmung hat andererseits die Entwicklung des Frequenzgruppenkonzeptes beeinflusst. In diesem Beitrag möchte ich eine wenig bekannte Arbeit von Barkhausen und Tischner (1927) vorstellen, in der der Einfluss des Obertonsspektrums auf die Lautheitswahrnehmung von Tonkomplexen experimentell bestimmt wurde. Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist, dass ein Vergleich der Lautheit auch bei extrem verschiedenem Klangcharakter der zu vergleichenden Schalle mit hoher Genauigkeit möglich ist. Diese Beobachtung veranlasste Heinrich Barkhausen dazu, ein solches Vergleichsverfahren zur Grundlage seines patentierten Schallmessers für die Praxis zu machen.

Arbeiten zur Hörschwelle und zur Lautheit in den zwanziger Jahren

Wenn man die geschichtliche Entwicklung des Lautheitskonzeptes betrachtet, ist es sinnvoll, diese in Beziehung zu Messungen der absoluten Hörschwellen zu setzen. Wie ich in einem früheren DAGA Vortrag beschrieben habe [1], gab es zu Anfang des 20. Jahrhunderts noch viele Unklarheiten, z.B. über die "obere und untere Grenze der hörbaren Töne", also den Frequenzbereich des Gehörs. Nach der grundlegenden Arbeit von Wien aus dem Jahre 1903 [2] und den Fortschritten bei der Erzeugung monofrequenter Stimuli und der Wiedergabequalität von Kopfhörern wurde in den zwanziger Jahren durch Barkhausen und Mitarbeiter auch die Hörschwelle für breitbandige Signale untersucht [3]. Die Motivation zu dieser Untersuchung stammte aus Anwendungsfragen der Fernsprechtechnik, für die der Verlauf der absoluten Hörschwelle als Funktion der Signalfrequenz eine wichtige Eigenschaft des menschlichen Empfängers darstellt. Die Autoren heben aber hervor, dass man es bei dieser Technik "im allgemeinen nicht mit reinen, sinusförmigen Tönen zu tun [hat], sondern mit komplizierteren Klängen". Wie auch in [4] beschrieben, schlossen die Autoren aus ihren Messungen, dass die Hörbarkeit komplexer Signale gleich der Hörbarkeit der subjektiv lautesten im Klang enthaltenen sinusförmigen Oberschwingung ist. Dies gilt allerdings nicht, wenn die Frequenzen der dieser stärksten Komponente benachbar-

ten Oberschwingungen um weniger als etwa 20 % abweichen: bei dieser Konstellation ergibt sich eine Intensitätskombination benachbarter Komponenten.

Die Messungen zur Lautheit zeigen eine ähnliche Entwicklung. Auch hier war die Relevanz für technische Anwendungen eine wichtige Motivation. Ab den zwanziger Jahren wurden z. B. Untersuchungen zur Lautheit bei den Bell Telephone Laboratories (bis 1925 Western Electric Research Laboratories) vorgenommen. Als Motivation findet sich folgende Äußerung bei Fletcher: "In the telephone business, the commodity being delivered to the customers is reproduced speech. One of the most important qualities of this speech is its loudness, so it is very reasonable to use a sensation scale to define the volume of the speech delivered." ([5], S. 297). Die ersten Messungen der Kurven gleicher Lautheit, die weite Verbreitung fanden, wurden von Kingsbury 1927 veröffentlicht [6]. Bereits diese frühen Messungen zeigen grob die Frequenzabhängigkeit und den nichtparallelen Verlauf der Isophonen bei tiefen Frequenzen. Wie in [7] beschrieben, hat Trendelenburg auf Basis dieser Messungen schon 1929 eine gehörgerechte spektrale Filterung vorgeschlagen, die den späteren A, B, und C Gewichtungen sehr nahe kommt. Einige Jahre später wurden dann die genaueren und ausführlicheren Messungen der Kurven gleicher Lautheit von Fletcher und Munson veröffentlicht [8].

Die Arbeit von Barkhausen und Tischner, 1927

Diese Arbeit [9] ist als eine Fortsetzung der Hörschwellenmessungen von Barkhausen und Lewicki zu sehen. Sie beruht auf Teilen der Diplomarbeit, die von Tischner 1925 angefertigt wurde. Zunächst diskutieren die Autoren eine mögliche Kritik an dem Schluss in [3], dass die Hörschwelle komplexer Signale gleich der Hörschwelle der stärksten Komponente im Komplex ist: "Man könnte hiergegen einwenden, daß dieses Ergebnis einfach dadurch zustande gekommen sei, daß bei der Schwächung des lautesten Tones bis zum Schwellwert alle übrigen leiseren Töne unter ihren Schwellwert herabgedrückt würden und dann, weil nicht mehr hörbar, auch nichts beitragen könnten." ([9], S. 215). Ein Gegenargument finden die Autoren in der Beobachtung, dass die Klangqualität des Tonkomplexes bis direkt an die Hörschwelle der stärksten Komponente erhalten bleibt. Ein weiteres Argument suchen sie in den Lautheitsmessungen, bei denen der Lautheitsbeitrag verschiedener Komponenten gemessen werden kann, während gleichzeitig die Klangqualität des überschwellig angebotenen Tonkomplexes unverändert erhalten bleibt.

Die Messungen wurden mit derselben Apparatur durchgeführt, die auch schon in [3] verwendet wurde. Zunächst wurde überprüft, dass mit dem Kopfhörer die Schwellenmessungen aus der früheren Arbeit reproduziert werden konnten, was nicht unbedingt selbstverständlich war, da "... das Telephon etwa zwei Jahre gelegen hatte und auch des öfteren benutzt und verstellt worden war ...". Dann wurde die Lautstärke (in heutiger Terminologie: die Lautheit) des Klanges durch Vergleich mit einem Normalton gemessen. Dabei konnte die Versuchsperson zwischen dem Test- und dem Vergleichssignal umschalten, und die Lautstärke des Testsignals auf die des Normaltones einstellen. Als Normalton wurde eine Sinusschwingung von 751 Hz verwendet, deren Lautstärke 100 Wien entsprach. Die von Barkhausen vorgeschlagene Größe "Wien" war proportional zum Strom im Telephon, und wurde für die Hörschwelle auf 0 Wien gesetzt. Damit entsprechen 100 Wien 40 Phon. Abbildung 1 zeigt den Vergleich zwischen der Ruhehörschwelle und der 40-Phon Isophone, wobei zu beachten ist, dass die Ordinate die Abschwächung des Stromes angibt, ein niedrigerer Wert also einem höheren Pegel entspricht. Die Autoren heben hervor, dass sich "die beiden Kurven bis in alle Einzelheiten des an sich ja ziemlich unregelmäßigen Verlaufs [decken]." Sie nehmen dies als Beweis für die Gleichheit der mit den beiden Methoden erzielten Ergebnisse. Nachdem sie diese Messungen mit einem anderen Telephontyp wiederholt hatten, schließen sie, dass "man auch Töne ganz unterschiedlicher Frequenz hinsichtlich ihrer Lautstärke recht genau miteinander vergleichen und so ein eindeutiges Maß für ihre physiologische Lautstärke erhalten kann." ([9], S. 217).

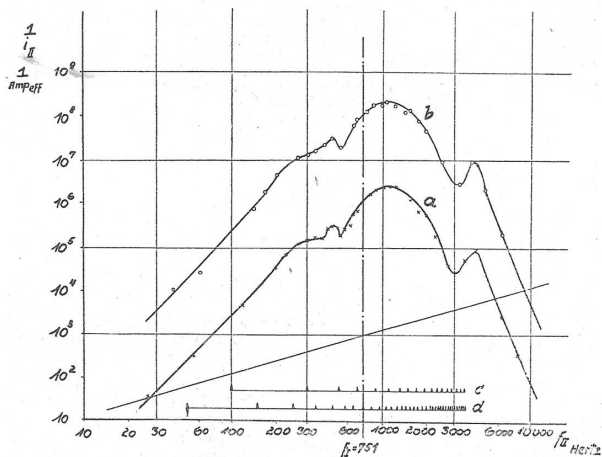


Abbildung 1: Messungen der Kurve gleicher Lautheit (Kurve a) und der absoluten Hörschwelle (Kurve b) als Funktion der Frequenz. Die Ordinate gibt die Abschwächung des Telephonstromes wieder. Bei der Lautheitsmessung wurde ein Referenzton von 751 Hz verwendet, dessen Pegel 40 dB über der Hörschwelle lag. Abbildung 2 aus [9].

In den weiteren Lautheitsexperimenten wurden nichtsinusförmige Testsignale verwendet. Diese wurden, z.B., durch Zerhacken von Gleichstrom erzeugt, wodurch ein periodische Rechtecksignal entsteht. Bei niedriger Rechteckfrequenz ergibt sich ein sehr dichtes Obertonspek-

trum, so dass immer eine größere Anzahl von Obertönen in den Bereich größter Lautheit fallen, und deren Gesamtintensität innerhalb eines Frequenzbereiches von 20 % konstant bleibt. Dies zeigt sich in einem Lautheitsurteil, das von der Grundfrequenz unabhängig ist. Erst wenn der Abstand der Harmonischen größer wird, überwiegt beim Lautheitsvergleich die Lautheit des subjektiv stärksten Teiltones im Komplex. Diese Beobachtung entsprach der Erwartung der Autoren und sie schließen daraus: "Also auch hier, wo sicher die weniger lauten Teiltöne noch gut hörbar waren, tragen sie zur physiologischen Lautstärke eines Klanges oder Geräusches nichts bei, falls sie in der Frequenz mehr als 20 % von dem lautesten Teilton abweichen. Nur dieser letztere bestimmt dann die Lautheit." ([9], S. 218).

Auch wenn moderne Lautheitsmessungen in der Frage der Integration von Teillautheiten in verschiedenen Frequenzgruppen (ein Konzept, das damals noch nicht bestand) abweichende Ergebnisse zeigen, waren diese frühen Arbeiten von großer Bedeutung für die Anwendung von Lautheitsmessern außerhalb des Labors. In einer Fußnote am Ende der Arbeit wird nämlich auf folgende Entwicklung hingewiesen: "Dies Ergebnis führte den einen von uns dazu, dieses Vergleichsverfahren zu einem einfachen Schallmesser für die Praxis zu verwenden, über den in dieser Zeitschr. **7** (1926), 599, berichtet wurde."

Literatur

- [1] Kohlrausch, A.: Experimentelle Messungen der absoluten Hörschwelle zu Beginn des 20. Jahrhunderts. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '03, 2003, CD ROM.
- [2] Wien, M.: Über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe. Pflügers Archiv, **97** (1903), 1-57.
- [3] Barkhausen, H. und Lewicki, G.: Die Empfindlichkeit des Ohres für nicht sinusförmige Töne. Physikal. Zeitschr. **25** (1924), 537-541.
- [4] Kohlrausch, A.: Die Wege von Heinrich Barkhausen und Richard Feldtkeller zur Psychoakustik. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '01, 2001, CD ROM.
- [5] Fletcher, H.: Physical measurement of audition and their bearing on the theory of hearing. Journal of the Franklin Institute **196** (1923), 289-326.
- [6] Kingsbury, B. A.: A direct comparison of the loudness of pure tones. Physical Review **29** (1927), 588-600.
- [7] Kohlrausch, A.: Ferdinand Trendelenburgs Arbeiten zu Klängen und Geräuschen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '08, 2008, CD ROM.
- [8] Fletcher, H. und Munson, W. A.: Loudness, its definition, measurement, and calculation. Journal of the Acoustical Society of America **5** (1933), 82-108.
- [9] Barkhausen, H. und Tischner, H.: Die Lautstärke von zusammengesetzten Tönen und Geräuschen. Zeitschrift für technische Physik **8** (1927), 215-221.