

# Experimentelle Messungen der absoluten Hörschwelle zu Beginn des 20. Jahrhunderts

Armin Kohlrausch

*Philips Forschungslabor, Eindhoven, sowie Technische Universität Eindhoven, Niederlande*

*E-mail: [armin.kohlrausch@philips.com](mailto:armin.kohlrausch@philips.com)*

## Zusammenfassung

Der Verlauf der absoluten Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörs als Funktion der Reizfrequenz (Hörschwelle, Audiogramm) gehört heute zum Standardwissen der Psychoakustik und formt eine Standardmessung der Audiologie. Es mag daher erstaunen, dass noch am Beginn des letzten Jahrhunderts viele Details, wie die "obere und untere Grenze der hörbaren Töne", also der Frequenzbereich des Gehörs, nur sehr ungenau bekannt waren. Bei der Bestimmung des Audiogramms gab es damals (zumindest) zwei technische Probleme: a) Die Erzeugung möglichst monofrequenter akustischer Reize und die Messung der spektralen Zusammensetzung der verwendeten Signale, sowie b) die Messung der physikalischen Reizstärke in absoluten Einheiten. In diesem Beitrag möchte ich den Stand des Wissens und der Experimentiertechnik bei der Hörschwellenmessung vor 100 Jahren darstellen. Im Zentrum des Vortrages wird die allgemein als erste systematische Behandlung dieses Problems angesehene Arbeit von Max Wien stehen: *Über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe*. Diese Arbeit hat eine besondere Beziehung zur diesjährigen DAGA, da sie vor genau 100 Jahren in Pflügers Archiv für Physiologie veröffentlicht wurde, und Max Wien, als Kollege von Arnold Sommerfeld, damals am physikalischen Institut der Technischen Hochschule Aachen arbeitete.

## Einleitung

Wenn wir heute ein modernes Lehrbuch der Psychoakustik oder der Audiologie aufschlagen, finden wir, zumeist in einem der einleitenden Kapitel, einen Abschnitt über die absolute Hörschwelle, also den Zusammenhang zwischen minimaler Reizstärke und Reizfrequenz. Neben dem allgemeinen, U-förmigen Verlauf der Schwellenkurve werden meist eine Reihe von zusätzlichen Beobachtungen beschrieben, die die Schwellenwerte beeinflussen: So wird in der internationalen Norm (ISO 389-7, 1996) unterschieden zwischen Schwellenwerten, bei denen der Schalldruck im Freifeld gemessen wird (minimal audible field, MAF) und denen mit der Druckmessung im Gehörgang (minimal audible pressure, MAP). Weitere Angaben beziehen sich auf die Variabilität der Schwelle (die 10 % und 90 % Perzentilwerte unterscheiden sich um ca. 15 dB) sowie auf den Einfluss des Alters auf die Hörschwelle, wodurch vor allem im Bereich oberhalb von 2 kHz die Schwellenwerte mit zunehmendem Alter ansteigen, unabhängig von eventuellen Hörschädigungen durch Lärm.

Diese Kenntnis über den Verlauf der absoluten Hörschwelle hat sich erst in der ersten Hälfte des zurückliegenden Jahrhunderts herausgebildet. In diesem Beitrag sollen einige historische Publikationen besprochen werden, in denen Faktoren beschrieben werden, die für die Entwicklung des Verständnisses wichtig waren.

## Stand des Wissens im 19. Jahrhundert

Beim Studium der im 19. Jahrhundert durchgeführten Arbeiten zu den Grenzen der Hörfähigkeit müssen die Schwierigkeiten bei der Erzeugung kalibrierter Stimuli berücksichtigt werden. Ein erstes Problem bestand darin, die Stärke der Reize systematisch und

kontrolliert zu variieren. Diese geschah im Freifeld durch Variation des Abstandes zwischen Signalquelle und Hörer. Das größte Problem war die Erzeugung monofrequenter Signale. Die Signale der im Experiment als Schallquellen verwendeten Galton-Pfeifen, Stimmgabeln oder Orgelpfeifen enthielten neben dem Grundton höhere harmonische Komponenten. Solche Obertöne im Signal führen zu falschen Schlüssen bei der Bestimmung der unteren Hörgrenze, wenn, anstatt des Grundtones, ein Oberton den Höreindruck dominiert. Sie führen aber auch zu falschen Schlüssen über die obere Hörgrenze, wenn bei Messung der Frequenz der Pfeife eine höhere Harmonische die physikalische Eichmessung bestimmt. Dies führte insbesondere am Ende des 19. Jahrhunderts bei Verwendung der Galton-Pfeife zu einer Überschätzung der höchsten hörbaren Frequenz um einen Faktor 2 (Boring, 1942).

Angesichts dieser Schwierigkeiten bei der Signalerzeugung wird es nicht überraschen, dass die Bestimmung der Signalintensität an der Schwelle auf noch größere Hindernisse traf. Es findet sich aber, in einer Arbeit von Toepler und Boltzmann aus dem Jahre 1870 zur Analyse der Schwingungen tönender Luftsäulen, eine Angabe zur Größenordnung der Amplitude der Teilchenschwingung an der Hörschwelle. Für diese Messung entfernte sich die Versuchsperson 115 m von der Schallquelle, sowohl gegen wie mit dem Wind. Als Größenordnung für die Schwingungsamplitude an der Hörschwelle geben die Autoren 0,00001 mm (10 nm) an. Bei der verwendeten Reizfrequenz von 181 Hz entspricht dies einem Wecheldruck von ca.  $3 \cdot 10^{-3}$  Pa, was einem Pegel von etwa 41 dB SPL entspricht. Dieser Wert liegt weniger als 10 dB höher als die heutigen Messdaten!

## Max Wiens Arbeit von 1903

Im Jahre 1903 veröffentlichte Max Wien in Pflügers Archiv für Physiologie seine Arbeit *Über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe*. Diese Arbeit zeigt als eine der ersten systematisch die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Reizfrequenz. Sie galt bis zu den Messungen von Wegel in den 20er Jahren als richtungsweisend. Max Wien, nicht zu verwechseln mit seinem Vetter, dem Nobelpreisträger Wilhelm Wien, hatte im Jahre 1888 bei Helmholtz mit einer psychoakustischen Arbeit promoviert und arbeitete 1903 als Professor am physikalischen Institut der Technischen Hochschule Aachen. Er ist u.a. bekannt geworden durch die Erfindung der Löschfunkenstrecke, die bei Hochleistungssendern für die drahtlose Telegraphie eingesetzt wurde.

Die Arbeit zur Hörschwellenmessung beruht auf einem Vortrag gleichen Titels, den Wien auf der 74. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte zu Karlsbad im September 1902 hielt. In der Physikalischen Zeitschrift vom Oktober 1902 findet sich, quasi als Vorabdruck der Arbeit aus Pflügers Archiv, eine schriftliche Fassung dieses Vortrages, die auch die dem Vortrag folgende Diskussion dokumentiert. Diese zeigt, vielleicht noch viel mehr als die Arbeit selbst, den Stand des damaligen Verständnisses der Hörvorgänge. Insbesondere die außerordentliche Empfindlichkeit des

Gehörs, ausgedrückt in der Teilchenamplitude bei Schwellenreizung, gab Anlass zu gezielten Nachfragen.

In der Arbeit aus dem Jahre 1903 motiviert Wien seine Experimente mit der Frage, wie stark die Empfindlichkeit innerhalb des Frequenzbereiches des menschlichen Gehörs variiert. Er vergleicht die fehlende Kenntnis über die Empfindlichkeit des Gehörs mit der Situation beim Auge, für das die Empfindlichkeitskurve für den Bereich des sichtbaren Lichts bereits durch mehrere Autoren bestimmt worden war. Als Hauptschwierigkeit nennt er das physikalische Problem, die Tonintensität zu messen. Hierfür verwendet er zwei Methoden: die sog. Telephonempfindlichkeit, bei der die Intensität am Ohr direkt gemessen wird, sowie eine zweite Methode, bei der die Intensität an der Tonquelle gemessen wird.

Die Idee der ersten Methode besteht darin, das Ohr durch Andrücken eines Telephonhörers nahezu luftdicht abzuschließen und die Wechselstromamplitude zu bestimmen, bei der der Ton gerade wahrnehmbar ist. Die Erzeugung sinusförmiger Wechselströme gelang mit einem Sinusinduktor und bei höheren Frequenzen mit einer sog. Wechselstromsirene. Durch Verwendung von Resonanzfiltern konnte er dafür sorgen, dass die Ströme obertonfrei waren. Bei der Schwellenmessung verwendete er keine Dauertöne, sondern ließ die Versuchsperson durch einen Schalter Tonpulse erzeugen, da so 'die Ermüdung des Ohres, die besonders bei hohen Tönen leicht eintritt, vermieden wird.' Die Messungen wurden mit drei verschiedenen Telephonen (von Bell, Apel und Siemens) durchgeführt und die Empfindlichkeitsunterschiede der Telephone wurden bestimmt, so dass die Daten aller drei Messungen direkt miteinander verglichen werden konnten. Die mit dieser Methode gemessene relative Empfindlichkeit, die invers proportional der Reizintensität an der Schwelle ist, zeigt ein breites Maximum um 2000 Hz und einen kontinuierlichen Abfall zu tieferen Frequenzen um einen Faktor  $10^8$  (80 dB) zwischen 800 und 50 Hz. Als Schwierigkeit der Messung bei höheren Frequenzen gibt er Unregelmäßigkeiten im Frequenzbereich der Eigenresonanzen der Telephone an, weswegen er die Messungen nur bis zur niedrigsten Eigenfrequenz der Telephone (1.1 bis 5.5 kHz) für zuverlässig hielt.

Bei der zweiten Methode wurde von einer Aufstellung ausgegangen, bei der die schwingende Platte eines Telephonhörers in ein Loch in einem grossen Blech eingefügt wurde, das sich im Abstand von 30 cm vom Ohr des Beobachters befand. Um den Abschattungseffekt des Kopfes, insbesondere bei hohen Frequenzen, zu vermeiden, wurde, im Sinne des Reziprozitätsgesetzes, die Position von Ohr und Telephonplatte vertauscht, das Ohr also in die Öffnung der Blechplatte gehalten. Bei dieser Messung beobachtete Wien, dass bei der Frequenz 12 kHz die Empfindlichkeit je nach Orientierung des Aussenohres um einen Faktor 3 (ca. 5 dB) variierte. Bei tieferen Frequenzen wurde ein solcher Einfluss nicht gemessen.

Die beiden Methoden ergaben einen ähnlichen Verlauf, und alle Daten wurden von Wien in einer Abbildung zusammengefasst, die 'die definitive Curve, durch die nach sämtlichen Versuchen die relative Empfindlichkeit normaler Ohren dargestellt ist' zeigt.

Neben dieser Darstellung der relativen Empfindlichkeit hat Wien auch Berechnungen der absoluten Empfindlichkeit angestellt. Hierzu maß er die Schwingungsamplitude der Telephonplatte bei hoher Reizstärke mit dem Mikroskop und konnte dann mithilfe dieser Werte die Amplitude der Teilchenschwingung, die Wechselschnelle und die Intensität des Schallfeldes für Schwellenstimuli berech-

nen. Auffallend ist, dass er keine Angaben des Wechseldruckes an der Schwelle macht. Für die 4 Frequenzen 200, 400, 600 sowie 1050 Hz ergeben seine Messungen einen (umgerechneten) Pegel an der Schwelle von 7.6, -9.6, -12 sowie -24 dB SPL. Verglichen mit modernen Messungen sind diese Werte ca. 20 dB zu niedrig, und auch Wien selbst stellte bereits fest, dass seine 'absoluten Werte der Reizschwellen etwas kleiner sind, als sie sich bei früheren Einzelversuchen ergeben hatten'.

Im letzten Abschnitt seiner Arbeit geht Wien auf die Bedeutung dieser Messmethode für die Hörprüfung ein, da sich der Hörverlust direkt aus dem Vergleich des Schwellenstroms mit dem Normalwert ergibt. Allerdings ist 'ein ziemlich complicierter Apparat dazu notwendig, dessen Handhabung vom Untersuchenden erst erlernt werden muss'. Da er ein Praktiker ist, erwähnt er in einer Fußnote aber auch gleich, dass er mit einer Fabrik physikalischer Apparate in Verbindung getreten ist, 'um, falls ein Bedürfnis dafür vorliegt, die ganze Einrichtung der Tonerzeugung in einfacherer und bequemerer Form herstellen zu lassen'. Er gibt weiterhin eine Reihe von Kurven normal- und schwerhöriger Versuchspersonen an, wobei er eine Darstellung wählt, die der heutigen audiologischen Praxis entspricht. Zunächst verwendet er seine eigenen Daten als Referenz für Normalhörigkeit und setzt seine Empfindlichkeit bei allen Frequenzen auf denselben Wert. Die (geringere) Empfindlichkeit schwerhöriger Versuchspersonen wird nun nach unten aufgetragen und zeigt direkt den typischen, zu hohen Frequenzen zunehmenden Hörverlust seiner Versuchspersonen.

Dieser kurze Überblick zeigt, dass mit der Verwendung von Telephonhörern als Reizquelle die Experimentiermöglichkeiten der frühen Psychoakustik deutlich verbessert wurden. Daneben bedurfte es damals einer gehörigen Portion physikalischer Fachkenntnis und eines großen technischen Geschicks, um die Messapparatur zu entwickeln und zu kalibrieren. Max Wien hat diese Fähigkeiten kombiniert und galt deshalb als ein Verfechter des Fachgebietes 'Technische Physik, als es diese dem Namen nach noch nicht gab, d.h. als man noch gar nicht darauf gekommen war, zwischen Technischer und Reiner Physik zu unterscheiden' (Zenneck, 1937).

### Referenzen

Boring, E. G. (1942). *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. Appleton-Century-Crofts, New York.

Toepler, A., Boltzmann, L. (1870). Ueber eine neue Methode, die Schwingungen tönender Luftsäulen zu analysiren. *Annalen der Physik und Chemie*, Band CXXI, 321-352.

Wien, M. (1903). Über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe. *Pflügers Archiv*, Bd. 97, 1-57. Vorabdruck unter gleichem Titel in: *Physikalische Zeitschrift*, 4. Jahrgang (1902), 69-74.

Zenneck, J. (1937). Max Wien zum 70. Geburtstag. *Zeitschrift für technische Physik*, 18. Jahrgang, 1-3.