

Über die Bedeutung von „Psychoacoustics, Facts and Models“

Jesko L. Verhey¹, Florian Völk^{2,3}

¹Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39120 Magdeburg, Deutschland

²Bioanaloge Informationsverarbeitung, Technische Universität München, 85748 Garching, Deutschland

³WindAcoustics UG, 86949 Windach, Deutschland

Email: jesko.verhey@med.ovgu.de, voelk@windacoustics.com

Einleitung

Der vorliegende Beitrag soll die große Bedeutung des Buches „Psychoacoustics, Facts and Models“ von Hugo Fastl und Eberhard Zwicker für die Hörforschung würdigen. Das Buch durchlief mehrere Entwicklungsstufen, angefangen von „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“ [1, 2] über „Psychoakustik“ [3] bis zu „Psychoacoustics, Facts and Models“ [4, 5, 6]. Im gleichen Jahr wie die zweite Auflage von „Psychoacoustics, Facts and Models“ [5] erschien von „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“ [2] eine englischsprachige Übersetzung [7] und ermöglichte so der internationalen Leserschaft einen Zugang zu den Anfängen des in diesem Beitrag im Fokus stehenden Buches „Psychoacoustics, Facts and Models“.

Der Abriss über die Vorgänger zeigt, dass das Buch aus der Forschungs- und Lehrtätigkeit der Autoren, ihrer Lehrer und ihrer Arbeitsgruppen gewachsen ist. In seiner dritten und aktuellsten Auflage [6], bei der Prof. Fastl Erstautor ist, wurden dem englischsprachigen Buch, wie früher schon der deutschen Ausgabe [3], Hörbeispiele mit Erläuterungen beigelegt, die die im Buch vorgestellten Aspekte der Hörwahrnehmung veranschaulichen.

Dieser Beitrag beschreibt zum einen, wie sich das Buch gut in der Lehre einsetzen lässt, insbesondere für Fragen der angewandten Psychoakustik, welche neben den Grundprinzipien der Hörverarbeitung die Charakterisierung der Schallwahrnehmung beinhaltet. Die Beschreibung der psychoakustischen Empfindungsgrößen findet sich in keinem anderen Buch so ausführlich wie im Buch von Fastl und Zwicker. Der vorliegende Beitrag beleuchtet zum anderen die große Bedeutung, die dieses Buch bis heute in Forschung und Entwicklung hat, und zeigt anhand von Beispielen aus der aktuellen Arbeit die hohe Relevanz der dort gezeigten Ergebnisse für die heutige Forschung. Nicht zuletzt wird die Bedeutung des Buches in der Kommunikation zwischen universitärer Forschung und Industrietätigkeit beleuchtet.

Anwendung in der Lehre

Das Buch richtet sich wie seine Vorgänger primär an Ingenieure. Hier ist es durch den Fokus auf Empfindungsgrößen ideal geeignet, als Handwerkskoffer zur Charakterisierung der Wahrnehmung von technischen Geräuschen zu dienen. Als Beispiel für den Einsatz in der Lehre sei hier ein Wahlmodul aus dem Studium des Maschinenbaus an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg angeführt: Die Zwei-Semesterwochenstunden-Veranstaltung

„Hörakustik“ besteht aus einer Kombination von Vorlesung und Seminar. In letzterem können die Teilnehmer die gelehrten Aspekte der Hörwahrnehmung in Hörversuchen nachvollziehen. Die Veranstaltung ist in fünf Kapitel unterteilt. Als Lektüre zur Nacharbeit wird [6] nahegelegt.

Die folgende Beschreibung nennt die Inhalte der Kapitel der Vorlesung und in eckigen Klammern jeweils die für das betreffende Kapitel wesentlichen Abschnitte (Abs.) oder ganzen Kapitel (Kap.) aus [6]. Das erste Kapitel mit dem Titel „Schwellen“ führt in ein wesentliches Werkzeug der Psychoakustik, die Schwellenmessung, ein und stellt Ruhehörschwellen, Unterschiedsschwellen sowie Mithörschwellen vor [Abs. 1.3-4, Kap. 2, Abs. 4.1, 4.3-4, 7.1-2]. Im darauf folgenden Kapitel zur „Lautheit“ wird diese grundlegende Empfindungsgröße eingeführt, ihre Abhängigkeit von Pegel, spektralem Gehalt und Dauer erläutert und darauf aufbauend eine grundlegende Modellvorstellung [8] vorgestellt [Abs. 8.1-3, 8.7]. Das dritte Kapitel beleuchtet die für technische Geräusche so wichtige Wahrnehmung von „Amplitudenschwankungen“ und deren relevante Empfindungen Schwankungsstärke und Rauigkeit [Kap. 10 und 11]. Das vierte Kapitel mit dem Titel „Wahrnehmung von Tönen“ stellt die Wahrnehmungsgrößen Tonhöhe, Ausgeprägtheit der Tonhöhe und Tonhaltigkeit vor [Kap. 5, siehe auch Abs. 9.4]. Auch diese Empfindungsgrößen haben eine hohe Relevanz zur Beschreibung der Wahrnehmung von Umweltgeräuschen, da diese häufig tonal sind oder tonale Anteile enthalten. Letzteres kann zu einer Erhöhung der Lästigkeit führen. Die DIN 45681 [9] berücksichtigt diese erhöhte Lästigkeit durch Tonzuschläge, die zum gemessenen Schallpegel addiert werden müssen. Der Zusammenhang von Empfindungsgrößen und Schallbeurteilungen steht im Mittelpunkt des letzten Kapitels mit dem Titel „Angenehmheit“ [Kap. 9, Abs. 16.1.4]. In diesem Kapitel wird wie in [6] auch die standardisierte Größe Schärfe (DIN 45692, [10]) eingeführt. Viele der dem Buch beigelegten Hörbeispiele werden in der Vorlesung zur Verdeutlichung verwendet.

Bedeutung in der Forschung

Das Buch stimuliert bis heute verschiedene Forschungstätigkeiten. Dies soll anhand von einigen Beispielen der Forschung der Autoren des Beitrags verdeutlicht werden.

Ein grundlegendes Konzept der Münchner Schule der Psychoakustik und damit auch des Buchs [6] sind frequenzabhängige Bandbreiten, die sich in ähnlicher Weise als Ergebnisse verschiedener psychoakustischer Experimente

z. B. zu Modulationsdetektion, spektraler Lautheitssum-
 mation oder Hörschwellen zeigen. Die Bedeutung dieser
 Bandbreiten manifestiert sich nicht nur darin, dass ihre
 Bezeichnung „Frequenzgruppen“ (Kap. 6) laut einer nicht
 repräsentativen Erhebung des Zweitautors die in Prü-
 fungen für unvorbereitete Studenten der Psychoakustik
 beliebteste und wohl auch zielführendste „Schätzantwort“
 ist, sondern auch darin, dass viele psychoakustische Mo-
 dellvorstellungen und Berechnungsalgorithmen auf dem
 aus den genannten Bandbreiten abgeleiteten Frequenz-
 gruppenkonzept basieren [8, 9, 10]. Zur Entwicklung und
 Parametrierung solcher Algorithmen sind mathematische
 Formulierungen des Frequenzgruppenkonzepts hilfreich.
 Ein Satz entsprechender Formeln ist im Buch [6] ange-
 geben (Abs. 6.3). Diese Formeln finden sich seit der Auflage
 [3] in unveränderter Form im Buch und sind vermutlich
 aufgrund der damals wesentlich stärker als heute einge-
 schränkten Curve-Fitting-Techniken mehr als mittlere-
 weile nötig eingeschränkt. Insbesondere besitzen die Formeln
 für die Frequenzabhängigkeit der Bandbreiten und deren
 Verteilung (definiert über die Tonheit, vgl. Kap. 6) keine
 direkte mathematische Verknüpfung, wie sie eigentlich
 im Konzept vorgesehen ist. Außerdem ist die Formel für
 die Frequenzabhängigkeit der Tonheit nicht geschlossen
 invertierbar, was für die Parametrierung gehörange-
 passter Algorithmen problematisch sein kann. Motiviert durch die
 auch in Kapitel 6 des Buches [6] dargelegte Mächtigkeit
 des Frequenzgruppenkonzepts sammelte der Zweitautor
 des vorliegenden Beitrags die heute noch verfügbaren
 Daten, die soweit nachvollziehbar der Entwicklung der
 genannten Formeln dienen, und benutzte diese Daten
 kombiniert mit aktuellen Curve-Fitting-Techniken, um
 einen aktualisierten und mit aktuellen neurophysiologi-
 schen Modellvorstellungen übereinstimmenden Satz an
 Formeln zur Beschreibung des Frequenzgruppenkonzepts
 vorzuschlagen [11]. Das Ergebnis weist die genannten Ein-
 schränkungen nicht auf, entspricht aber trotzdem dem
 ursprünglichen Konzept und bleibt möglichst nahe an den
 zugrundeliegenden Daten. Zusätzlich konnte in diesem
 Zusammenhang gezeigt werden, dass der resultierende
 Satz an Formeln mit leicht veränderten Parametern auch
 in der Lage ist, das häufig als konkurrierend mit dem Fre-
 quenzgruppenkonzept betrachtete, später vorgeschlagene
 Konzept der äquivalenten Rechteckbandbreiten zu be-
 schreiben (für eine Übersicht vgl. [11]). Außerdem wurden
 Parameter vorgeschlagen, die unter Einbeziehung beider
 genannter Datensätze berechnet wurden und somit als
 Vorschlag bzw. Startpunkt zur Harmonisierung des Fre-
 quenzgruppenkonzepts und der entsprechenden Aspekte
 des Konzepts der äquivalenten Rechteckbandbreite be-
 trachtet werden können.

Zur Abschätzung der Frequenzgruppenbreite im Hörver-
 such kann die spektrale Lautheitssum-
 mation für Band-
 passrauschsignale herangezogen werden. Eine schemati-
 sche Darstellung der Spektren solcher Signale findet sich
 in Abbildung 8.6 des Buches, d. h. im Kapitel zur Lautheit.
 Eine Erläuterung, wie sich die Lautheit solcher Signale
 mit konstantem Gesamtpegel entwickelt, findet sich im
 Kapitel zu den Frequenzgruppen (Kap. 6), die im Engli-
 schen als „Critical bands“ bezeichnet werden, was manch-

mal (unnötigerweise) als „kritische Bänder“ ins Deutsche
 rückübersetzt wird. Nach der schematischen Abbildung
 (Abb. 6.7 in [6]) ist die Lautheit für schmalbandige Signale
 (mit Bandbreiten kleiner als die Frequenzgruppenbreite)
 konstant und nimmt zu größeren Bandbreiten hin zu.
 Der Erstautor dieses Beitrags hat sich bereits in seiner
 Dissertation [12] die Frage gestellt, wie sich dieser Zu-
 sammenhang zwischen Lautheit und Bandbreite ändert,
 wenn die Signaldauer verkürzt wird. Nach der „Equal
 loudness ratio Hypothese“ (ELRH) [13], die der Struktur
 von entsprechenden Lautheitsmodellen [8] weitestgehend
 entspricht, sollte die spektrale Lautheitssum-
 mation für kurze und lange Signale bei gleichem Pegel gleich sein.
 Der Erstautor dieses Beitrags zeigte in seiner Dissertation Da-
 ten, die der ELRH widersprechen (siehe auch [14]). Eine
 erhöhte spektrale Lautheitssum-
 mation für kurze Schalle konnte in einer Reihe von Folgestudien mit verschie-
 denen Messparadigmen [15] und selbst für Impulsfolgen
 bis zu hohen Wiederholraten [16] bestätigt werden. Die
 Forschungsgruppen von Prof. Fastl und dem Erstautor
 Verhey stellten 2009 ein Modell vor, das diesen Effekt
 prinzipiell vorhersagen kann [17].

Eine weitere Frage, die sich aus der Abbildung 6.7 in [6]
 ergab, war, ob die Lautheit für schmalbandige Signale in
 der Tat nicht von der Bandbreite abhängt. Diese Frage ist
 gerade aus Sicht von Lautheitsmodellen interessant, da
 aufgrund von inhärenten Einhüllendenfluktuationen von
 Rauschen und der Natur der Endstufe der Modelle im All-
 gemeinen eine höhere Lautheit für Schmalbandrauschen
 als für Töne vorhergesagt wird. Im Gegensatz zu diesen
 Erwartungen zeigten Messungen [18] keinen Pegelunter-
 schied zwischen gleich lauten Tönen und Schmalbandrau-
 schen mit sehr kleinen Bandbreiten (deutlich kleiner als
 die Frequenzgruppenbreite). Für Bandbreiten nahe der
 Frequenzgruppenbreite wurde sogar ein höherer Pegel für
 das Rauschen als den Ton zum Erreichen gleicher Laut-
 heit der beiden Stimuli eingestellt. Dieser Effekt fand sich
 auch bei Schwerhörigen [19], ist bislang ungeklärt und
 daher Gegenstand der aktuellen Forschung des Erstautors
 dieses Beitrags (siehe auch [20]).

Das Buch [6] zeigt uns, dass ein Geräusch im Allgemeinen
 mehrere Empfindungen auslöst. So zeigt Abbildung 5.29
 in [6], dass Bandpassrauschen auch eine Ausprägtheit
 der Tonhöhe aufweist, die bei konstanter Mittenfrequenz
 mit der Bandbreite abnimmt und bei gegebener Band-
 breite mit abnehmender Mittenfrequenz zunimmt. Der
 tonale Charakter von Bandpassrauschen ist auch in der
 Norm zur Tonhaltigkeit DIN 45681 berücksichtigt (sie-
 he Abschnitt 5.3.4 der Norm). Die Daten in [6] gelten
 für Normalhörende. In unserer alternden Gesellschaft ist es
 auch interessant, wie sich die Ausprägtheit der Tonhöhe
 für Bandpassrauschen ändert, wenn die Versuchsperson
 nicht mehr normalhörend ist. Hierzu hat eine Doktorandin
 des Erstautors Untersuchungen durchgeführt, die auf der
 DAGA 2017 in Kiel vorgestellt wurden [21]. Diese deuten
 darauf hin, dass auch die Ausprägtheit der Tonhöhe
 von einer Schwerhörigkeit beeinflusst wird.

Im letzten Abschnitt lehrt das Buch [6] verschiedenste
 Anwendungen der vorher dargestellten Inhalte, unter an-

derem auch ein Störgeräusch für die Sprachaudiometrie, das ein in der Audiometrie übliches stationäres Hintergrundgeräusch, das CCITT-Rauschen, um eine sprachähnliche zeitliche Hüllkurve mit definierten statistischen Eigenschaften erweitert ([6], Abs. 16.2.7). Für dieses Störgeräusch hat sich als Tribut an seinen Erfinder die Bezeichnung „Fastl-Rauschen“ etabliert. Das Geräusch ist bei Sprachverständlichkeitsuntersuchungen insbesondere hilfreich, um die für Sprache als Störgeräusch typischen zeitlichen Lücken auch in einem Rauschsignal vorzusehen, z. B. um die Frage zu beantworten, ob zeitliche Lücken in Störgeräuschen die Verständlichkeit simultan dargebotener Sprache im Vergleich zur Situation mit demselben Störgeräusch ohne zeitliche Lücken verändern. Normalhörende profitieren hinsichtlich der Sprachverständlichkeit von den Lücken, wohingegen diese Fähigkeit bei Schädigungen des Hörsystems typischerweise wesentlich eingeschränkt ist (Abs. 16.2.7). Da sich auch hier seit Einführung des Fastl-Rauschens sowohl die häufig in der Audiologie verwendeten Störgeräusche, als auch die Palette der zu berücksichtigenden Probanden verändert hat (insbesondere durch die zunehmende Verbreitung von Cochlea-Implantaten, CIs), ergeben sich interessante neue Anwendungsfelder der im Buch [6] beschriebenen Methode. Dabei stellt sich insbesondere die Frage, ob auch CI-Nutzer von den zeitlichen Lücken profitieren können. Entsprechende Studien wurden in der Vergangenheit meist mit einem aktuell üblichen stationären Störgeräusch in Kombination mit dem Fastl-Rauschen durchgeführt, wodurch als zusätzlicher Parameter beim Vergleich der Konditionen mit und ohne Lücken das Langzeitspektrum des Störgeräuschs auftritt, was die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Im Hinblick darauf wurde vom Zweitautor des vorliegenden Beitrags und motiviert vom Buch [6] eine Studie initiiert, um ein aktuell übliches stationäres Störgeräusch mit einer zeitlichen Hüllkurve im Sinne des Fastl-Rauschens zu modulieren und damit die genannte Untersuchung zu wiederholen. Erste Ergebnisse dieser Studie werden in [22] beschrieben, eine abschließende Klärung des Sachverhalts ist Gegenstand der aktuellen Forschung des Zweitautors.

Bedeutung im Industrieumfeld

Im Industrieumfeld zeigt sich in der Erfahrung der Autoren die Bedeutung des Buches [6] vor allem auf zweierlei Weise: Einerseits direkt, durch die weite Verbreitung des Buchs in den einschlägigen Entwicklungsabteilungen, vor allem im deutschsprachigen Raum, und die sich daraus ergebende Wirkung der enthaltenen Methoden auf Produkte und Dienstleistungen. Insbesondere im Produkt-Sound-Design bzw. Sound-Quality-Engineering haben sich viele der Modelle und Verfahren aus [6] zu Standard-Verfahren entwickelt – sicherlich nicht zuletzt aufgrund der Ausrichtung des Buchs v. a. auch auf die Zielgruppe der Ingenieure. Andererseits ist der indirekte Einfluss zu erwähnen, der sich durch den Eingang ergibt, den im Buch [6] beschriebenen Konzepte an maßgeblicher Stelle in verschiedene Normen und Berechnungsvorschriften gefunden haben [8, 9, 10].

Die in den genannten Normen beschriebenen Algorithmen bilden eine Grundlage für die instrumentelle Prognose psychoakustischer Empfindungsgrößen. Erweitert um moderne Signalverarbeitung und kombiniert mit den Modellen und Vorgehensweisen aus [6] und/oder aktuellen Forschungsergebnissen, wie z. B. Detailverbesserungen der zeitlichen Verarbeitung tieffrequenter Schalle [23], können softwaregestützte Systeme entwickelt werden, die automatisierte gehörangepasste Analyse- und Bewertungsvorgänge in der Produktentwicklung und Produktion ermöglichen. Dadurch lassen sich nicht nur im Premiumsegment sowohl systematisch Produktgeräusche optimieren, als auch Qualitätsanforderungen kontrollieren und Effizienzsteigerungen erreichen.

Im Rahmen der Spezifikation und Integration solcher Systeme und bei entsprechenden Schulungen ergaben sich in der Tätigkeit des Zweitautors des vorliegenden Beitrags verschiedentlich zwei Anfragen, die beide auf Ihre Weise den Stellenwert des Buches [6] im industriellen Umfeld verdeutlichen: Während bei der Spezifikation individualisierter Softwarelösungen häufig die Anforderung auftritt, dass „die in *Psychoacoustics* dargestellten Zusammenhänge richtig abgebildet werden“, wird bei Schulungen regelmäßig angefragt, „auf im *Fastl-Buch* nicht dargestellte Aspekte Wert zu legen“. Damit wird anschaulich klar, dass das Buch und seine Inhalte im Industrieumfeld bekannt sind, in den Konzernen oder von den Mitarbeitern individuell zur Fortbildung genutzt werden und einen hohen Stellenwert genießen.

Abschlussbemerkung

Das Buch „*Psychoacoustics, Facts and Models*“ [6], das in diesem Beitrag nur schlaglichtartig anhand von Beispielen aus der Tätigkeit der Autoren des vorliegenden Beitrags beleuchtet werden konnte, ist bis heute eine exzellente Grundlage für die einschlägige Lehre, es stimuliert bis heute unsere Forschung und bildet bis heute die Grundlage vieler Projekte in und mit der Industrie zur Wahrnehmung von Geräuschen und deren Modellierung.

Literatur

- [1] Feldtkeller R., E. Zwicker: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1956
- [2] Zwicker E., R. Feldtkeller: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1967
- [3] Zwicker E.: Psychoakustik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1982
- [4] Zwicker E., H. Fastl: *Psychoacoustics – Facts and Models*. 1. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 1990
- [5] Zwicker E., H. Fastl: *Psychoacoustics – Facts and Models*. 2. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999
- [6] Fastl H., E. Zwicker: *Psychoacoustics – Facts and Models*. 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007

- [7] Zwicker E., R. Feldtkeller: The ear as a communication receiver. Übersetzt von H. Müsch, S. Buus und M. Florentine, AIP Press, Woodbury, New York, 1999
- [8] DIN 45631/A1: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker – Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche; mit CD-ROM. Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [9] DIN 45681: Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [10] DIN 45692: Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [11] Völk F.: Comparison and Fitting of Analytical Expressions to Existing Data for the Critical-Band Concept. *Acta Acustica united with Acustica* 101, 1157-1167, 2015
- [12] Verhey J. L.: Psychoacoustics of spectro-temporal effects in masking and loudness perception. Doktorarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1999
- [13] Florentine M., S. Buus, T. Poulsen: Temporal integration of loudness as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1633–1644, 1996
- [14] Verhey J. L., B. Kollmeier: Spectral loudness summation as a function of duration. *J. Acoust. Soc. Am.* 111, 1349–1358, 2002
- [15] Anweiler A. K., J. L. Verhey: Spectral loudness summation for short and long signals as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 119, 2919–2928, 2016
- [16] Verhey J. L., M. Uhlemann: Spectral loudness summation for sequences of short noise bursts. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 925–934, 2008
- [17] Rennie J., J. L. Verhey, S. Chalupper, H. Fastl: Modeling temporal effects of spectral loudness summation. *Acta Acustica united with Acustica* 95, 1112–1122, 2009
- [18] Hots J., J. Rennie, J. L. Verhey: Loudness of sounds with a subcritical bandwidth: A challenge to current loudness models? *J. Acoust. Soc. Am.* 134, EL334–EL339, 2013
- [19] Hots J., K. Jarzombek, J. L. Verhey: Mid-bandwidth loudness depression in hearing-impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 139, 2334–2341, 2016
- [20] Rennie J., J. Hots, J. L. Verhey: Unerwartete Effekte in der Lautheitswahrnehmung. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, DEGA e. V., Berlin, 2018*
- [21] Verhey J. L., M. Horbach, J. Hots: Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Bandpassrauschsignalen. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2017, 778-779, DEGA e. V., Berlin, 2017*
- [22] Weißgerber T., U. Baumann, F. Völk: Einfluss von Störschall-Modulationscharakteristika auf das Sprachverstehen von Cochleaimplantat-Nutzern. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, DEGA e. V., Berlin, 2018*
- [23] Völk F.: Predicting the loudness of non-stationary sounds: Zwicker's original envelope extraction vs. DIN 45631/A1:2010. *InterNoise 2016, 1722-1728, 2016*