

Akustik und Psychoakustik für die Praxis - Hugo Fastls Beitrag zur Ingenieurakustik

Joachim Scheuren

Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail:Joachim.Scheuren@mbbm.com

Kurzfassung

Mit seiner jahrzehntelangen Lehr- und Forschungstätigkeit an der TU München hat Hugo Fastl entscheidend dazu beigetragen, die dort begründete Psychoakustik weiter zu entwickeln und für die praktische Ingenieurakustik erfolgreich anwendbar zu machen. Trotz vieler Vorurteile und anfänglicher Widerstände hat das schließlich dazu geführt, dass die wahrnehmungsbezogene Bewertung von Schallereignissen vielfältigen Eingang in die Praxis der Beurteilung und Zielsetzung akustischer Kenngrößen und Maßnahmen gefunden hat. Die Methoden und Werkzeuge der Psychoakustik sind heute ein unverzichtbarer Bestandteil der Analyse und gezielten Beeinflussung der Qualität von Klängen (Sound Design) wie auch der Beurteilung von Lärm und seiner Wirkungen.

Neben vielen exemplarischen Anwendungsnachweisen gelang dies auch über seine äußerst fruchtbare Lehrtätigkeit. Mit ihr konnte Hugo Fastl Generationen von nachwachsenden Akustikingenieuren eine solide Grundlage nicht nur für die vielen Fragestellungen der Technischen Akustik und Lärmbekämpfung, sondern insbesondere auch für die Ermittlung und Zugrundelegung subjektiver Klangqualitätsparameter in Forschung und Entwicklung sowie in der ingenieurakustischen Praxis vermitteln.

Einleitung

Wenn man die Gründung der Münchner Schule der Psychoakustik zeitlich an die 1967 erfolgte Berufung Eberhard Zwickers auf den neugegründeten Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Hochschule München koppelt, dann blickt diese Schule auf nunmehr mehr als 50 Jahre erfolgreichen Wirkens zurück. Dies gilt gleichermaßen für die aktive Mitwirkung von Hugo Fastl, der auch schon vor seinem 1970 erfolgten Diplom-Abschluss als fortgeschrittener Student der Elektrotechnik an diesem Lehrstuhl tätig war, „dazu“ gehörte. Und dies gilt bis auf den heutigen Tag, denn Hugo Fastl nimmt nach wie vor aktiv am fachlichen Leben der akustischen Arbeitsgruppe des Lehrstuhls für Mensch-Maschine-Kommunikation der TU München teil.

Damit war es Hugo Fastl vergönnt, die Münchner Schule über den gesamten Zeitraum von 50 Jahren erfolgreichen Wirkens hinweg zu begleiten und entscheidend mitzuprägen. In dieser Zeit hat die von Eberhard Zwicker schon vor seiner Berufung nach München substantiell begründete Psychoakustik eine enorme Entwicklung erfahren, die ihr nicht nur Eingang in immer weiter verzweigte wissenschaftliche Teilgebiete und –disziplinen verschafft hat, sondern die auch dazu geführt hat, dass die Psychoakustik schließlich Zugang zu den Anwendungsgebieten praktischer Ingenieurakustik gefunden hat.

Dieser Zugang, die Umsetzung und Anwendung psychoakustischer Einsichten und Methoden in der ingenieurakustischen Praxis, gestaltete sich allerdings äußerst schwierig und mühevoll. In den ersten Jahren von Hugo Fastl's fachlicher Tätigkeit war solche Anwendung noch weit entfernt und es bedurfte wirklich beharrlicher, unermüdlich wiederholter Beiträge zu ihrer Anwendung und Anwendbarkeit, um die Methoden der Psychoakustik Jahrzehnte später zu unverzichtbaren Werkzeugen der Ingenieurakustik zu machen.

Neben seinen vielfältigen fachlichen Impulsen und Beiträgen zur Weiterentwicklung der Psychoakustik ist dies vielleicht die größte Lebensleistung Hugo Fastls: mit endlosen Demonstrationen der Anwendbarkeit und mit unmittelbar an konkreten Anwendungen orientierten Untersuchungen die Brücke zur Praxis nicht nur eingefordert, sondern durch überzeugende Erfolge auch herbeigezwungen, tragfähig ermöglicht und hergestellt zu haben.

Situation vor fünfzig Jahren

Vor 50 Jahren und in den ersten Jahren danach war es der Psychoakustik und ihrer phänomenologischen Beschreibung der wesentlichen Hörmechanismen gelungen, sich als anerkannte Disziplin mit einem wertvollen wissenschaftlichen Instrumentarium zu etablieren. So war sie bald zu einem wichtigen Werkzeug geworden, mit dem prinzipielle Einsichten in den unterschiedlichsten Bereichen hörbezogener Forschung und Entwicklung möglich wurden.

In der praktischen Ingenieurakustik, die mit der wachsenden Lärmproblematik der 60er Jahre als Querschnittsdisziplin mehr und mehr Eingang in die ingenieurtechnische Alltagspraxis fand, sah sich die Psychoakustik allerdings massiven Anwendungsbarrieren konfrontiert. Bei aller Faszination, die von einer subjektiven, gehörbezogenen Bewertung von Schallereignissen ausging, gab es große Vorbehalte, die vielfach dazu führten, dass die Psychoakustik als praxisfremd eingestuft wurde. Diese Einstufung basierte meist auf der damals vielleicht nicht ganz unberechtigten Feststellung, dass die Ermittlung psychoakustischer Kenngrößen (viel) zu aufwendig und zudem mit dem eingespielten Regelwerk nicht vereinbar sei.

Es gab damals und es gibt heute nur einen Weg, solche Vorbehalte und Widerstände dauerhaft auszuräumen: die

- Weiterentwicklung und Bereitstellung handhabbarer Methoden, die mit praxistauglichem Aufwand reproduzierbare Ergebnisse liefern konnten,
- beharrliche Überzeugungsarbeit
- fortwährende Demonstration der praktischen Anwendbarkeit

Dies war die Aufgabe, die sich damals allen an der Verankerung der Psychoakustik in der ingenieurakustischen Alltags-

praxis Interessierten stellte und die in München von Hugo Fastl als wesentliche Zukunftsaufgabe erkannt und mit viel Schwung und Energie angegangen wurde.

Situation heute

Getragen von der Einsicht, dass die Qualität von Produkten wesentlich von der akustischen, der Klangqualität dieser Produkte mitbestimmt ist, getragen aber auch vom Bewusstsein, dass die vielfältigen Aufgaben der Lärmbekämpfung mit der sogenannten „Pegelakustik“ allein nicht immer befriedigend gelöst werden können, hat die wahrnehmungsbezogene Bewertung von Schallereignissen heute unwiderflichen Eingang in die Praxis zur Zielsetzung und Beurteilung akustischer Kenngrößen und Maßnahmen gefunden. Somit sind die Methoden und Werkzeuge der Psychoakustik insbesondere unverzichtbar für die entwurfsbegleitende Analyse und Beeinflussung der Qualität von Klängen wie auch für die subjektive Beurteilung von Lärm und Lärmwirkungen.

Entwicklung der Lautheitsnormung als Beispiel

Die langwierige Akzeptanzentwicklung psychoakustischer Kenngrößen in der Praxis kann am Beispiel der Lautheitsnormung veranschaulicht werden. Schon 1975 wurden mit der ISO 532 „Acoustics – method for calculating loudness levels“ ([1]) zwei alternative Verfahren (A und B) standardisiert, um reproduzierbare Berechnungen der Lautheit aus gemessenen stationären Schallsignalen zu ermöglichen. Da es damals nicht gelang, sich auf ein allgemein anerkanntes Verfahren zu einigen, wurde außer dem von Eberhard Zwicker und der Münchner Schule vorgeschlagenen Zwicker-Verfahren (B) ein zweites, von Stephens vorgeschlagenes Alternativverfahren (A) in den Standard aufgenommen. Damit wurde die Auswahl eines Verfahrens den Anwendern der Norm überlassen, die sich in den folgenden Jahrzehnten dann letztlich auch eindeutig für das Zwicker-Verfahren entschieden haben.

Dem trug die amerikanische ANSI-Norm ANSI S 3.4 dann 2005/2007 ([2]) insofern Rechnung, als sie das veraltete Verfahren nach Stephens durch ein neueres Verfahren nach Moore/Glasberg ersetzte. Auch das Zwicker-Verfahren wurde mit den Jahren dem fortschreitenden Stand der Technik angepasst. 1991 wurde das in der deutschen Lautheitsnorm DIN 45631 seit 1967 spezifizierte graphische Verfahren durch eine algorithmische Formulierung ersetzt und damit der unmittelbaren Berechnung durch Computer zugänglich gemacht ([3]). Dabei war es notwendig, den in der ISO 532 B gegebenen Anpassungsspielraum bei tiefen Frequenzen durch eindeutig vorgegebene Korrekturterme aufzuheben.

Eine weitere Anpassung der DIN 45631 führte 2010 im Anhang DIN 45631/A1 ein Verfahren zur Berechnung der zeitabhängigen Lautheit für instationäre Schallsignale ein ([4]). Um die Akzeptanz der Lautheitsnorm in der Praxis nicht zu gefährden, wurde dabei ein mit der stationären Lautheit voll kompatibles Verfahren festgelegt. Damit wurde die zuvor schon festgestellte Etablierung des Zwicker-Verfahrens als faktischer Industriestandard untermauert und bekräftigt.

Nach zähen, sich sehr lange hinziehenden Diskussionen konnte die mehr als 40 Jahre alte ISO 532 erst 2017 durch eine neue Lautheitsnorm ersetzt werden. Auch diesmal gelang es nicht, die Überlegenheit eines einzelnen Verfahrens nachzuweisen ([5]). Wie schon 1975 wurden daher wieder zwei konkurrierende Verfahren, das Zwicker-Verfahren für beliebige zeitveränderliche Schallsignale als ISO 532 Teil I und das Moore/Glasberg-Verfahren für stationäre Schallsignale als ISO 532 Teil II, in die Norm aufgenommen. Eine Erweiterung des Moore/Glasberg-Verfahrens für instationäre Schallsignale ist als ISO 532 Teil III beabsichtigt ([6]).

Hugo Fastl hat als Leiter des zuständigen DIN - Arbeitskreises NALS A2 AK8 wesentlich zur Entwicklung und normativen Festlegung von Verfahren zur Ermittlung psychoakustischer Kenngrößen beigetragen. Seine diesbezüglichen Verdienste wurden vom DIN folgerichtig durch die Verleihung der Rudolf-Martin-Ehrennadel 2018 anerkannt.

Trotz frühzeitiger Normung hat die Berechnung der Lautheit nur langsam Eingang in die alltägliche gewerbliche und industrielle Praxis gefunden. Gleichwohl hat die Industrie die Existenz und Relevanz der Norm eindrucksvoll unter Beweis gestellt, als sie sich vor einigen Jahren geschlossen für normative Kontinuität und gegen eine Abschaffung der Zwicker-Norm aussprach, um den Wert und die Vergleichbarkeit ihrer Datenbanken sicherzustellen. Mit den in diesem Zusammenhang abgegebenen Erklärungen und Resolutionen konnte die Akzeptanz der Lautheitsnorm in der Praxis eindrucksvoll bestätigt werden.

Praxisverankerung der Psychoakustik

Die Psychoakustik war und ist eine zarte Pflanze im vielfältigen Dschungel praktischer ingenieurakustischer Anwendungen. Ihre gleichwohl zunehmende Verankerung in der ingenieurakustischen Praxis verdankt sie ihrem langsamen aber steten Wachstum. Natürlich ist solches Wachstum dem durch neue Aufgaben zunehmenden Bedarf sowie dem durch neue Möglichkeiten verursachten technischen Fortschritt geschuldet. Aber es bedurfte auch der beharrlichen, unermüdlischen Energie praxisorientierter Psychoakustiker wie Hugo Fastl, um psychoakustische Methoden an praktische Problemstellungen anzupassen und die Anwendbarkeit und den Nutzen dieser Methoden in der Praxis, an überschaubaren praktischen Fragestellungen nachzuweisen.

Jahrzehnte lang hat Hugo Fastl jede sich ihm bietende Gelegenheit genutzt, die Praktikabilität psychoakustischer Verfahren und Bewertungen exemplarisch nachzuweisen und so wesentlich dazu beizutragen, sie aus dem Elfenbeinturm der Wissenschaft herauszuführen und fest in der ingenieurakustischen Praxis zu verankern. Heute ist diese ein fester Bestandteil der weitverzweigten Ingenieurakustik geworden, ohne den der Akustikingenieur nicht in der Lage wäre, die vielfältigen Problemstellungen der Akustik auch dann effizient und zielorientiert zu lösen, wenn wahrnehmungsbezogene Aspekte einbezogen werden sollen bzw. müssen.

Im Folgenden wird die Breite und Aktualität des Anwendungsspektrums psychoakustischer Methoden an einigen repräsentativen Beispielen der Ingenieurakustik erläutert

End-of-line Test für Schalthebel an der Lenksäule

Das Automobil mit seiner wesentlich von Qualität und Fahrkomfort bestimmten Attraktivität gehörte zu den ersten Ingenieurbereichen, in denen die explizit angestrebte akustische Qualität die Einbeziehung der akustischen Wahrnehmung und damit den Einsatz psychoakustischer Methoden erforderlich machte. Wie weit dies heute reicht mag daraus ersichtlich sein, dass auch die bei der Abnahme durchgeführte Qualitätskontrolle von Schalthebeln als Mindestanforderung auf eine auf die Schaltgeräusche zugeschnittene „akustische Güte“ gestützt wird, die aus den Zeitverläufen des Schalldrucks, der Lautheit und der Schärfe ermittelt wird.

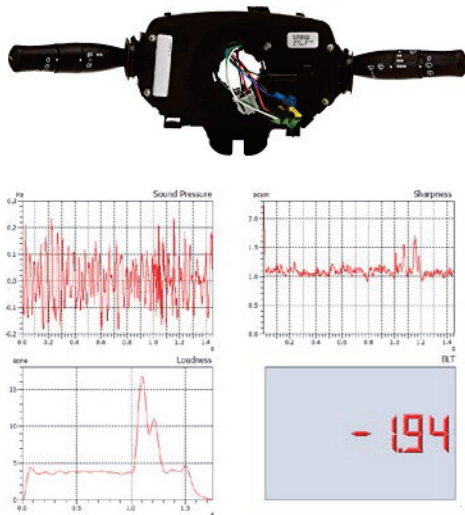


Abbildung 1: Lenksäulenkomponente mit Schaltern und Beurteilung der akustischen Qualität aus physikalischen und psychoakustischen Kenngrößen ([7]).

Entwicklung von Elektromotoren

Auch bei der Entwicklung von Haushaltsgeräten und -einrichtungen mit hochwertigen Klangeigenschaften werden geeignet definierte „Wohlklangverläufe“ zur entwicklungsbegleitenden Gütebeurteilung herangezogen.

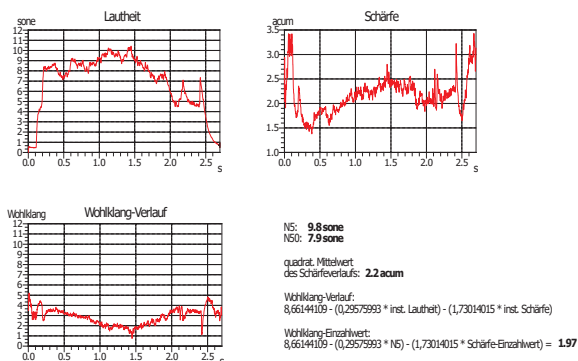


Abbildung 2: Lautheits- und Schärfebasierter Wohlklangverlauf von Elektromotoren für Küchenbeschläge ([7]).

Tonhaltigkeit von Geräuschen an Windkraftanlagen

Bei den Akzeptanzeinschränkungen großer Windkraftanlagen spielen die als besonders störend wahrgenommenen tonalen Geräuschkomponenten eine hervorgehobene Rolle. Auch hier ist es daher wichtig, neben den physikalischen Geräuschparametern auch die tatsächliche subjektive Wahrnehmbarkeit von Tönen zur Beurteilung der Lärmbelastung heranzuziehen. Abbildung 3 verdeutlicht die unterschiedlichen Analyseschritte, mit denen eine normgerechte Implementierung mit Korrektur bzgl. des Hintergrundgeräuschs die tatsächliche Wahrnehmbarkeit von Tönen ermittelt.

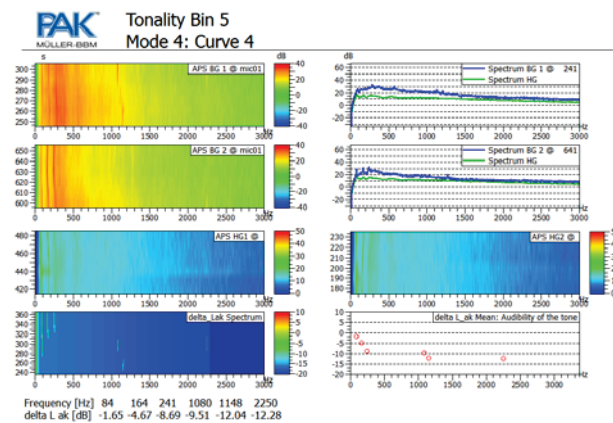


Abbildung 3: Normgerechte Ermittlung der Wahrnehmbarkeit von Tönen bei Windkraftanlagen ([7]).

Quantifizierung der Dieselhaftigkeit

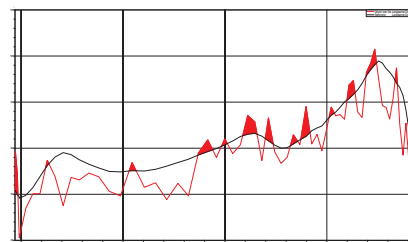
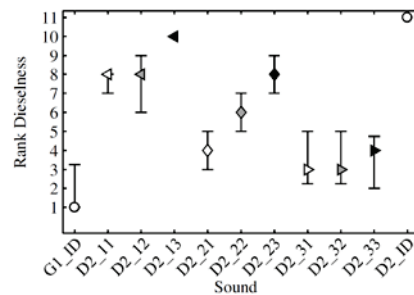


Abbildung 4: Hörversuchsergebnisse zur Dieselhaftigkeit und darauf gestützter Verlauf einer Grenzkurve ([7]).

Auch die das „Nageln“ von Dieselmotoren beschreibende Dieselhaftigkeit ist ein wichtiger, vom Lastzustand des Motors abhängiger Klangparameter. Hugo Fastl hat mit umfassenden Untersuchungen einen wesentlichen Beitrag zur Wahrnehmung der Dieselhaftigkeit geleistet. Abbildung 4 verdeutlicht, wie subjektive Beurteilungen Eingang in eine darauf gegründete Grenzkurve finden.

Klangcharakterisierung von Produkten

Sowohl im Haushalt als auch im Büro muss die Charakterisierung und Klassifizierung der Geräusche von Geräten den subjektiven Höreindruck zugrunde legen. Dass dies längst Eingang in die gängige Beurteilungspraxis gefunden hat, zeigen beispielhaft die Abbildungen 5 und 6.

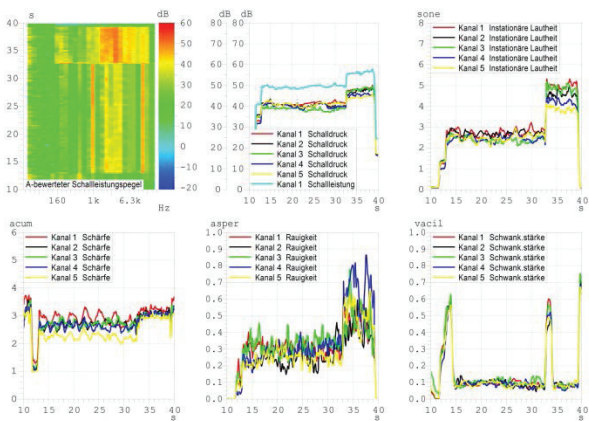


Abbildung 5: Psychoakustische Elemente der Geräuschklassifizierung eines Büroschanners ([8]).



Abbildung 6: Vergleichende Lautheitsbewertung von Haartrocknern ([8]).

Rechnerische Berücksichtigung der Lästigkeit in Ausbreitungsrechnungen

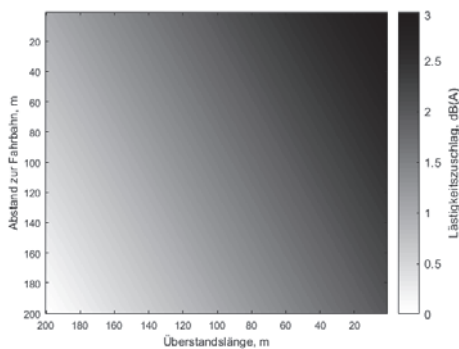


Abbildung 6: Entfernungabhängiger Lästigkeitszuschlag für Pegelsprünge an un stetigen Übergängen ([9]).

In einer kürzlich durchgeführten Untersuchung wurde in Hörversuchen die zusätzliche Lästigkeit durch Pegelsprünge, wie sie etwa durch Übergänge von absorbierenden zu normalen Straßenbelägen oder am Ende von Schallschutzwänden

auftreten, ermittelt. Daraus konnte die in Abb. 6 graphisch wiedergegebene rechnerische Abschätzung für einen entfernungsabhängigen Lästigkeitszuschlag abgeleitet werden, mit dem die teilweise Kompensation der Lärminderungsmaßnahme korrigierend abgeschätzt werden kann ([9]).

Lautheitsgestützte Halligkeitsbewertung

Auch in der Raumakustik hat man begonnen, die subjektive Beurteilung raumakustischer Klangeigenschaften auf psychoakustische Parameter zu gründen. Aufbauend auf neuen Einsichten, dass die subjektive Halligkeitsbewertung mit einer lautheitsbezogenen Nachhallzeit besser korreliert ist als mit einer pegelbezogenen, wird versucht, diese lautheitsbasierte Nachhallanalyse für raumakustische Anwendungen praktikabel zu machen ([10]).

Fazit

Hugo Fastl hat mit seiner spezifischen Kombination herausragender wissenschaftlicher Durchdringungsfähigkeit und unablässiger, erfolgreicher Anwendungsbemühungen entscheidend dazu beigetragen, die Psychoakustik als Methode der Ingenieurakustik weiterzuentwickeln sowie als handhabbares Werkzeug der Ingenieurpraxis beispielhaft zu demonstrieren und attraktiv zu machen.

Neben diesen methodischen Verdiensten hat er mit der großen Zahl hervorragend ausgebildeter Absolventen der von ihm geprägten Studiengänge (allein bei Müller-BBM ca. 30) dafür gesorgt, dass die von ihm propagierten Methoden mit hoher und vor allem konkret verfügbarer Kompetenz in der ingenieurakustischen Praxis angewandt und umgesetzt werden konnten.

Literatur

- [1] ISO 532: Acoustics - Method for calculating loudness level, 1975
- [2] ANSI S 3.4, Procedure for the computation of loudness of steady sounds, Melville, NY, USA, 2007
- [3] DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker (Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum - Zwicker method), Berlin, Germany, 1991
- [4] DIN 45631/A1: Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche – Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound), Berlin, Germany, 2010
- [5] Scheuren, J.: Setting psychoacoustic standards and guidelines in the fields of interests between science and industry. Proc. Inter-Noise 2011, Osaka, 2011
- [6] Scheuren, J.: ISO 532 – Is all well if it ends well? Working with Alternative Loudness Standards. Proc. Inter-Noise 2017, Hong Kong, 2017
- [7] Arsic, Dejan (M-BBM VAS): persönliche Mitteilung
- [8] Feneberg, Gregor (M-BBM): persönliche Mitteilung
- [9] Schubert, S. et al.: Ermittlung von Überstandslängen für Schallschirme und lärmindernde Straßenbeläge. DAGA 2018
- [10] Lachenmayr, W.: Lautheitsbasierte Nachhallanalyse für raumakustische Anwendungen. DAGA 2018