

## **Rückblick auf das Dresdner Gehörschadensmodell**

Vortrag: 28.6.2013 – Technische Universität Dresden

Kolleginnen und Kollegen, meine Damen und Herren!

### **Einleitung**

Ein Rückblick auf das Dresdner Gehörschadensmodell ist das Thema zu dem ich mich hier verpflichtet habe. Rückblick ist Erinnerung. Erinnerungen sind die immer loser werdenden Bänder, die uns im hohen Alter mit unserer Umwelt verbinden und ich habe ja einen hohen Geburtstag gerade hinter mir. Sie mögen mir erlauben, dass ich meinen thematischen Rückblick hier etwas erweitere und ihm auch noch einige Gedanken zur Entstehung, zur Tradition dieses Hauses hinzufüge.

Als ich im Herbst 1947 mein Studium an der Technischen Hochschule, unserer heutigen Technischen Universität begann, wohnte ich in der Zwickauer Straße. Immer, wenn ich zu meinen Lehrveranstaltungen der Hochschule ging, bin ich einen Trampelpfad quer über eine Wiese gegangen, auf der heute dieses große Gebäude steht, ich meine direkt unter diesem Hörsaal entlang.

Das war eine schlimme Zeit damals, die Gebäude, in denen die Lehrveranstaltungen, die Vorlesungen, Übungen und Praktika stattfanden, waren häufig noch halb zerstört, selbst im Winter waren viele der Räume ungeheizt, es fehlte an Lehrmaterialien und vor allen Dingen, wir hatten immer Hunger, konnten uns niemals sattessen. Gegen Ende meines Studiums, in den frühen fünfziger Jahren, wurde als einer der ersten Nachkriegsneubauten der damaligen Technischen Hochschule der erste Teil dieses großen Gebäudekomplexes hier errichtet. Und, ich meine noch zu Lebzeiten von Heinrich Barkhausen, wurde er Barkhausenbau genannt.

Ich habe noch Vorlesungen bei Heinrich Barkhausen gehört und ich habe ihn als Student bei von ihm betreuten Praktikumsversuchen erlebt. Als ich 1952 Assistent

von Walter Reichardt wurde, habe ich zur Instituts-Weihnachtsfeier neben Barkhausen gesessen. Wir gehörten damals dem gleichen Institut an, ich weiß gar nicht mehr, wie es hieß. Ich konnte mich einen ganzen Abend mit Barkhausen unterhalten.

Heinrich Barkhausen war ein außergewöhnlicher Mann und dies sowohl hinsichtlich des Umfangs seiner wissenschaftlichen Leistungen, als auch als Hochschullehrer, als Persönlichkeit. Allein die Breite seiner wissenschaftlichen Leistungen ist beeindruckend. Da gibt es im wissenschaftlich-technischen Sprachgebrauch

- einen magnetischen Barkhauseneffekt,
- eine Barkhausensche Röhrenformel,
- die Barkhausenschen Kurzschwingungen in Elektronenröhren,
- eine nach ihm benannte Drehzahlregelung von Universalmotoren
- und ein ebenfalls nach ihm benanntes Stabilitätskriterium für Schaltkreise.

Auf die Akustik hat Barkhausen durch seine grundlegenden Arbeiten zur Systemtheorie, zur Schwingungserzeugung und zur Lautstärkemessung richtungsweisen Einfluss genommen. Von ihm stammte der erste Vorschlag für die Messung der Lautstärke und für das Phon als ihr Maß. 1926 kam von ihm die Empfehlung für den ersten Lautstärkemesser, und der wurde sogar von Siemens noch im gleichen Jahr produziert.

Zur Motivation für sein erfolgreiches Schaffen in Forschung und Lehre hat Barkhausen gern davon gesprochen, wie wichtig bei der Beobachtung von Naturvorgängen es sei, „sich zu wundern“ und dann im Vielfältigen, Komplizierten das Einfache, das Gesetz, zu entdecken.

Heinrich Barkhausen der von 1911 bis Anfang der 50er Jahre an der Technischen Hochschule Dresden lehrte und forschte, war einer der Begründer der Schwachstromtechnik, eines Gebietes, für das wir heute infolge Ausweitung und Spezialisierung kaum noch eine Sammelbezeichnung kennen und das schließlich die

Elektronik einschließt. Und die Elektronik ist doch wohl der technische Kern unserer heutigen Informationsgesellschaft, ohne sie ist sie nicht denkbar. Der Ahnherr unseres Hauses hier, ich darf ihn wohl so nennen, war einer der Pioniere der modernen Gesellschaft.

Wenn wir uns allerdings die Breite der Barkhausenschen Forschung ansehen, dann ist sie für heutige Forschungsvorhaben ein Unding. Man mag seine Situation mit der der Seefahrt vergleichen. Als der Globus noch unbekannte Leerstellen enthielt, da konnten Seefahrer neue Ufer, neue Kontinente, neue Länder, neue Inseln entdecken. Heute ist unsere Erde beinahe bis zum letzten Zentimeter ausvermessen. Heute sind Erfolge in der Forschung nur noch bei enger Konzentration auf Tiefe, nicht auf Breite möglich.

Übrigens, wenn ich hier einiges zur Erinnerung an einen meiner ersten Hochschullehrer gesagt habe, möchte ich aber eines noch erwähnen: Barkhausen hat in seiner Tätigkeit als Hochschullehrer der Lehre immer den unbedingten Vorrang eingeräumt. Wir, die wir bei ihm noch Vorlesungen und Praktika erleben konnten, haben an ihm besonders seine bildhafte Lehre, sein analoges Denken, seine Naturereignisse verknüpfende Denkweise geschätzt.

Einer der unmittelbaren Nachfolger von Barkhausen war Walter Reichardt. Ende der 40er Jahre beginnend hat er ein Institut für Elektro- und Bauakustik aufgebaut. Das Institut wurde später in Institut für Technische Akustik umbenannt. Reichardt hat das Institut bis zu seiner Emeritierung 1968 geleitet. Seine Arbeiten und die seiner Mitarbeiter waren in den Nachkriegsjahren sehr von den Geboten der Stunde bestimmt. Auf der einen Seite die durch den Krieg weitgehend zerstörte Bausubstanz im ganzen Lande, andererseits die durch Kriegseinwirkungen und Reparationsleistungen völlig am Boden liegende Industrie.

Mit Hilfe der im Barkhausenbau entstandenen raum- und bauakustischen Messräume konnten zahlreiche Wand- und Deckenkonstruktionen mit dem erforder-

lichen Schallschutz für den Wohnungs- und Industriebau an die Bauindustrie übergeben werden. Hier im Haus befanden sich ja vier bauakustische Prüfstände in denen drei Decken und eine Wand ausgewechselt und sozusagen gleichzeitig gemessen werden konnten. Und zahlreiche Wand- und Deckenkonstruktionen sind hier entwickelt und gemessen worden.

Mit einer ausgefeilten raumakustischen Modellmesstechnik wurden zahlreiche Kulturbauten: wie Theater, Opern, Mehrzwecksäle in raumakustischer Hinsicht optimiert. Dazu zählten unter anderen die Staatsoper in Berlin, Theater und Oper in Leipzig, der in akustischer Hinsicht außerordentlich problematische Kongresssaal im Haus des Lehrers in Berlin, der Dresdner Kulturpalast, das Brucknerhaus in Linz, die Semperoper in Dresden. Von Mitarbeitern des Instituts wurde die Produktion von hier im Haus entwickelten piezoelektrischen Schwingungsaufnehmern in einem kleinen nichtstaatlichen Betrieb veranlasst und laufend betreut. Für die Entlärmung großer Prüfstände für Propeller-, Turbojet- und Düsentriebwerke der Luftfahrtindustrie in Dresden und Karl-Marx-Stadt (vor dem Kriege und heute: Chemnitz) wurde die akustische Konzeption von Mitarbeitern des Institutes geschaffen. Das waren nur einige Beispiele für die neben der Hauptaufgabe der Lehre so aktive praxiswirksame Tätigkeit der Mitarbeiter des Reichardtschen Institutes.

Als 1961 die Luftfahrtindustrie der DDR aufgelöst wurde, entstand aus ihrer materiellen und personellen Substanz unter anderem in Dresden ein sogenannter Wissenschaftlicher Industriebetrieb für Schwingungstechnik und Akustik. In diesem Betrieb wurde in kurzer Zeit, vorwiegend auf der Grundlage von Forschungsarbeiten aus dem Reichardtschen Institut, eine ganze Palette von Schwingungsmess- und Prüfgeräten und akustischen Messgeräten entwickelt, in die Produktion übergeführt und schließlich auch produziert. Unter anderem entstand international der erste Präzisions-Impulsschallpegelmessgerät. Es war ein Gerät, das für die

der Hörempfindung adäquate Messung von Impulsschall geeignet war. Die Forschungen dazu waren einer der Schwerpunkte im Reichardtschen Institut gewesen. Das Gerät wurde zum Spitzenerzeugnis des Betriebes und die Nachfrage im In- und Ausland konnte mit der beschränkten Produktionskapazität des Betriebes bei weitem nicht befriedigt werden. Ein ebenfalls auf Forschungen im Reichardtschen Institut entwickeltes Reziprozitätsmessgerät konnte sogar vom Wissenschaftlichen Industriebetrieb zum Lizenznachbau nach Großbritannien vergeben werden.

Ich war auch in diesem Wissenschaftlichen Industriebetrieb Schwingungstechnik und Akustik tätig. Als ich 1966 als Nachfolger von Walter Reichardt an die Technische Universität berufen wurde, habe ich, für die künftige Forschung im Institut, nicht zuletzt auch im Auge gehabt, Grundlagen für künftige Gerätetechnik dieses Betriebes zu schaffen. Da zu jener Zeit die durch Lärm verursachten Gehörschäden ein sehr ernsthaftes Problem des Gesundheitswesens waren, war es naheliegend diese Problematik anzugehen. So hat Ende der Sechziger bis in die Achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts die Gehörschadensforschung eine wesentliche Rolle in der Forschung in diesem Haus gespielt. Dabei konnten bedeutsame Ergebnisse erzielt werden. In der DDR und ich denke doch weit darüber hinaus waren diese Ergebnisse oft als Dresdner Gehörschadensmodell bezeichnet worden. Das Modell, das ich Ihnen hier vorstellen will, ist die Arbeit von vielen Diplomanden und Doktoranden in unserem Haus, aber auch von Kollegen der Medizinischen Akademie in Dresden, sowie von weiteren medizinischen Einrichtungen in Dresden, Halle, Erfurt u. a. Ich war mehr oder weniger lediglich der Initiator und der, der schließlich die Ergebnisse zusammengefasst hat.

### **Durch Lärm verursachte Gehörschäden**

Doktoranden, die mit ihren Arbeiten zur  
Thematik promoviert wurden:

**H. J. Berger, H. Ertel, G. Fuder,  
J. Herhold, L. Kracht, I. Paul  
extern: J. Plundrich, G. Richartz**

1978 wurde ich von der American Public Health Assoziation eingeladen, auf einem internationalen Kongress der Public Health Organization in Freiburg im Breisgau über die Forschungsergebnisse aus unserem Haus zu berichten. Meine Einladung war, obwohl die amerikanische Gesellschaft alle Reise- und Aufenthaltskosten für mich übernehmen wollte, ein großes Problem, denn Kontakte mit dem westlichen Ausland waren, auch in wissenschaftlicher Hinsicht, unerwünscht. Schließlich wurde mir doch die Reisegenehmigung erteilt. Als ich dann unsere Forschungsergebnisse in Freiburg vorstellen konnte, kam ein Akustiker aus den USA, Jerry Tobias, auf mich zu. Er berichtete mir, dass der renommierte Verlag Academic Press beabsichtige, eine neu erscheinende Buchserie, „Hearing Research and Theory“ herauszugeben. Er bat mich, unsere Forschungsergebnisse als Repräsentation des derzeitigen Wissensstandes auf dem Gebiet der Gehörschadensforschung in einer Monographie zu publizieren. Es erschien 1981

*Kraak, W.: Investigations on Criteria for the Risk of Hearing Loss Due to Noise. In Hearing Research and Theory, Vol.1., Academic Press, New York 1981, 187 -303. Edited by Tobias, J.V. and Schubert, E.D.*

**Zusammenfassende Publikation:**

Kraak, W.: Investigations on Criteria for the Risk of Hearing Loss Due to Noise. In Hearing Research and Theory, Vol.1., Academic Press, New York 1981, 187-303. Edited by Tobias, J.V. and Schubert, E.D.

**Ergänzend:**

Kraak, W.: Die Bewertung des Schalldruckes bei der Messung industriellen impulsiven und intermittierenden Lärms. *Acustica*, Stuttgart 54 (1983) 2, 84-96.

Kraak, W.: Test zum individuellen Gehörschadensrisiko. *Acustica*, Stuttgart 80 (1994), 156 - 165.

Wolfgang Kraak

2

Leider gibt es keine deutschsprachige Entsprechung, nur zahlreiche Einzelveröffentlichungen, auf die ich hier verweisen könnte. Ich möchte Ihnen hier einen Überblick über die dort dargelegten Ergebnisse vortragen, die ich nur noch durch einige Untersuchungen über das individuelle Gehörschadensrisiko ergänzt habe.

**Gehörschadensmodell**

Seit Menschengedenken ist bekannt, dass Schall hoher Intensität gesundheitsschädlich ist. Im alten China sollen Menschen durch Glockenschall hingerichtet worden sein und es hieß, dies wäre die schrecklichste aller Todesstrafen. *Amnesty International* berichtet, dass sogar heute noch in manchen Ländern mit Schall gefoltert wird.

Seit Jahrhunderten ist die Gehörschädigung von Kesselschmieden durch ihr Handwerk bekannt. Im englischsprachigen Raum wurde oft allgemein Schwerhörigkeit als *Boilemaker`s Disease* (Kesselschmiedekrankheit) bezeichnet. Vom Schwerhörigen wurde gesagt, er hat ein *Boilemaker`s Ear*. In der industriellen Produktion erlitten in den modernen Industriestaaten eine sehr große Zahl von Frauen und Männern, vorwiegend in Metall und Textilbetrieben, bei jahrelanger Beschäftigung schwere Gesundheitsschäden, meist waren es Gehörschäden. In den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde in vielen Industriestaaten

durch zahlreiche Reihenuntersuchungen in Lärmbetrieben ermittelt, dass große Gruppen von über ein ganzes Arbeitsleben in Lärmbetrieben Beschäftigte im Mittel bis zu 80 dB Hörverlust erlitten hatten. Ich betone im Mittel. Viele waren durch ihre Arbeit nahezu taub geworden. Mit Abstand war Lärmschwerhörigkeit zur wichtigsten Berufskrankheit geworden. Zunehmend traten außerdem bei Jugendlichen nach häufigem Besuch von Popmusikveranstaltungen Gehörschäden auf. Die Klärung von quantitativen Zusammenhängen zwischen Schallexposition und Gehörschäden war in der gesamten zivilisierten, technisierten Welt zum dringenden gesundheits- und sozialpolitischen Problem geworden.

Zur Erfassung des Gehörschadensrisikos durch Schalleinwirkung haben wir im Wesentlichen vier Methoden angewendet.

### **1. Retrospektive Untersuchungen.**

Es wurden Schadensfälle von Personen untersucht, die in der Vergangenheit erheblichen Lärmbelastungen ausgesetzt waren. Hierzu wurden außer eigenem Untersuchungsmaterial alle zu dem Zeitpunkt in der Fachliteratur publizierten Arbeiten ausgewertet. Und das war eine große Zahl von Arbeiten, vorwiegend aus den nichtsozialistischen Ländern Europas und den USA.

### **2. Begleituntersuchungen.**

An Lehrlingen wurden von Beginn ihrer Tätigkeit in Textilbetrieben bis zum Ende ihrer Lehrzeit in regelmäßigen kurzen Abständen Hörschwellenuntersuchungen durchgeführt. Dadurch konnten individuelle Gehörempfindlichkeiten und die sich entwickelnden von der Lärmbelastung herrührenden Gehörschäden ermittelt werden.

Die Lehrlinge arbeiteten Anfang der siebziger Jahre, so wie fast alle Beschäftigten in der Textilindustrie der DDR, entgegen den gesetzlichen Arbeitsschutzbestimmungen bei unzulässig hohen Schallpegeln ohne individuellen Gehörschutz. Die



Untersuchungen wurden aber von Mitarbeitern des staatlichen Gesundheitswesens durchgeführt, sodass wir uns keine Gesetzesverletzungen zu schulden kommen lassen mussten.

### **3. Untersuchungen nach dem Prinzip schädlichkeitsäquivalenter Wirkungen.**

Bei derartigen Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass bei Schallbelastungen eine physiologische Größe existiert, die als Indikator für die Schädlichkeit der Belastung gelten kann. Häufig wird die  $TTS_2$ , d. h. die zeitweilige Hörschwellenverschiebung 2 min nach Beendigung eines Schallereignisses als solcher Indikator verwendet. (TTS – Temporary Threshold Shift). Die Rückbildung der TTS und somit die Beanspruchung des Hörorgans ist jedoch nicht nur von der TTS selbst, sondern auch von ihrem Zeitverlauf während ihres Aufbaus und somit von der Schallbelastung abhängig. Ein zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessene zeitweilige Hörschwellenverschiebung ist deshalb nicht besonders gut für die Anzeige der Schadensäquivalenz geeignet.

Wir konnten nach umfangreichen Untersuchungen und Validitätsnachweisen zeigen, dass das Zeitintegral über der zeitweiligen Hörschwellenverschiebung ein geeigneter Indikator ist:

also die ITTS – die „Integrated Temporary Threshold Shift“, das Zeitintegral über die zeitweilige Hörschwellenverschiebung während und nach Beendigung der Schallexposition.

Gemessen wird dabei allgemein die TTS so wie auch die PTS bei 4 kHz. Bei 4 kHz ist das menschliche Ohr am empfindlichsten im doppelten Sinne: hier liegt die Hörschwelle am niedrigsten und hier treten auch bei Schallbelastungen die frühesten Gehörschäden auf.

#### **4. Tierexperimente**

Die Hörorgane einiger Säugetiere haben eine strukturelle und funktionelle Ähnlichkeit zum menschlichen Ohr. Mit ihnen können deshalb auch manche Zusammenhänge zwischen physikalischen Belastungsgrößen und reversiblen und irreversiblen Wirkungen auf das Hörorgan ermittelt werden. In diesem Sinne wurden zur Zeit und vor unseren Untersuchungen auch weltweit zahlreiche Tests an Chinchillas und Meerschweinchen durchgeführt.

Natürlich gibt es und gab es schon damals erhebliche ethische Bedenken. Wir haben aber auch, in enger Zusammenarbeit mit medizinischen Einrichtungen, Tests an Meerschweinchen durchgeführt. Bei unseren Experimenten wurde aber streng darauf geachtet, dass den Tieren sowohl bei den Schallbelastungen als auch bei den Hörschwellenmessungen keine Schmerzen zugefügt wurden. Die Experimente wurden bei außergewöhnlichem Verhalten der Tiere abgebrochen. Es wurde von uns gemeinsam mit der Medizinischen Akademie Dresden ein Verfahren zur Hörschwellenmessung über evozierte Potentiale an der Kopfhaut unverletzter Tiere entwickelt. Dieses Verfahren führte sowieso nur zu Ergebnissen, wenn die Tiere weder Angst noch Schmerz verspürten.

#### **Kennzeichnung des Gehörschadens**

Erhebliche Schalleinwirkungen auf das Hörorgan in Hinblick auf Intensität und/oder Dauer führen zur Schädigung der Haarzellen im Innenohr. Haarzellen werden teilweise zerstört oder sie verunstalten zu Riesenspargeln.

Bei den Tierexperimenten zur gehörschädigenden Wirkung von Lärm in den 60er und 70er Jahre wurden damals international fast ausschließlich Obduktionen durchgeführt und somit schädigende Wirkungen als Haarzellenzerstörungen

nachgewiesen. Bei uns wurden an den Tieren, so wie ja auch bei den Menschen Gehörschäden nur audiometrisch nachgewiesen.

Zur audiometrischen Kennzeichnung wird meist die bleibende Hörschwellenverschiebung PTS = Permanent Threshold Shift verwendet.

Vom Lärm verursachte Schäden werden häufig als NIPTS – Noise Induced Permanent Threshold Shift bezeichnet. Die NIPTS wird unterschieden von der altersabhängigen  $PTS_a$ .

Die  $PTS_a$  wiederum setzt sich zusammen aus Presbyakusis und Soziakusis.

Mit Prebyakusis bezeichnet man die eigentliche vom Alterungsprozess herrührende Hörschwellenverschiebung, mit Soziakusis die durch nicht erfasste Lärmbelastungen entstehenden Schäden. Fast jeder Mensch ist ja in seinem Leben unfreiwillig unerwünschten Lärmbelastungen ausgesetzt oder er setzt sich freiwillig hohen Schallbelastungen z. B. durch Musikhören oder Sportschießen aus. Aus unseren Untersuchungen konnten wir schließen, dass das Gehör im Mittel wohl schon bei etwa 65 dB erste sich auf das Hören im Alter nachteilig auswirkende Beeinträchtigungen erleidet.

Zur “Noise Induced Permanent Threshold Shift” sei bemerkt, der häufig in der Literatur verwendete Ansatz, der Superposition, also der additiven Überlagerung von NIPTS und  $PTS_a$  ist unzulässig. Im Ergebnis unserer retrospektiven Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich im Gehörschaden nicht die Wirkungen, sondern die Belastungen addieren. Im effektiven Hörverlust sind sie nichtlinear, über eine logarithmische Funktion miteinander verbunden.

Als typische Beurteilungs- und Testfrequenz bei Gehörschadensuntersuchungen wird die  $PTS_{4kHz}$  verwendet. Wie ich schon bei den TTS-Untersuchungen erwähnt habe, ist das menschliche Gehör bei etwa 4 kHz am empfindlichsten und hier treten bei Schallbelastungen auch die ersten Gehörschäden auf.

Nach J. Plundrich der im Rahmen seiner Dissertation extern bei uns mitgearbeitet hat, treten für andere Hörfrequenzen bei durch stationären Lärm verursachten Gehörschäden im Mittel folgende Proportionalitäten auf:

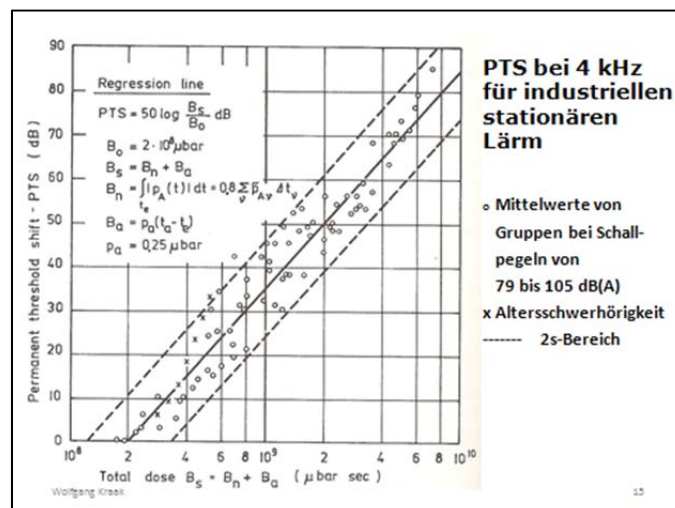
$$PTS_f = K_f PTS_{4\text{kHz}}$$

f/kHz	0,5	1	2	3	6
$K_f$	0,36	0,40	0,63	0,81	0,94

Für den für unsere Kommunikation mit der Umwelt wichtigsten Frequenzbereich von 500 Hz bis 3 kHz sind die Schäden zum Glück deutlich geringer als bei den kritischen 4 kHz.

## Ergebnisse

In dem hier angezeigten Diagramm haben meine Mitarbeiter Günther Fuder und Lutz Kracht alle eigenen und uns in der Literatur zugänglichen Untersuchungen an Gruppen von in der Industrie über mehrere Jahre oder während eines ganzen Arbeitslebens bei 79 bis 105 dB(A) Beschäftigten zusammengestellt.



Die PTS ist über einer im logarithmischen Maßstab aufgetragenen Gesamtdosis dargestellt. Die Gesamtdosis setzt sich aus einem lärm- und einem altersabhängigen Anteil zusammen. Die runden Messpunkte sind die für die im Lärm Beschäf-

tigten gemessenen Werte und die Kreuze die Werte für die reine Altersschwerhörigkeit, also für Menschen, die nicht unter Lärmbedingungen gelebt haben.

Die durch gezogene Kennlinie ist die Regressionsfunktion der Messwerte, die gestrichelten Linien sind die doppelten Standardabweichungen.

**PTS bei 4kHz für industriellen Lärm**

$$\text{PTS}_{4\text{kHz}} = 50 \log B_s / B_0 \text{ dB}$$

für  $B_s > B_0$

Dabei ist die kritische Dosis

$$B_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ } \mu\text{bar s}$$

Die für den Gehörschaden maßgebliche Gesamtdosis enthält Lärm- und Altersanteil:

$$B_s = B_n + B_a$$

Wolfgang Kressl 16

Die analytische Darstellung der Regressionsgeraden, die obere Gleichung im Bildrahmen, stellt somit im Wesentlichen den im Mittel, bei langandauernder intensiver Schallbelastung mit stationärem Lärm, bei 4 kHz zu erwartenden Gehörschaden dar. Die für den Hörverlust verantwortliche Gesamtdosis setzt sich aus einem Lärm- und einem Altersanteil zusammen.

**PTS bei 4kHz für industriellen Lärm**

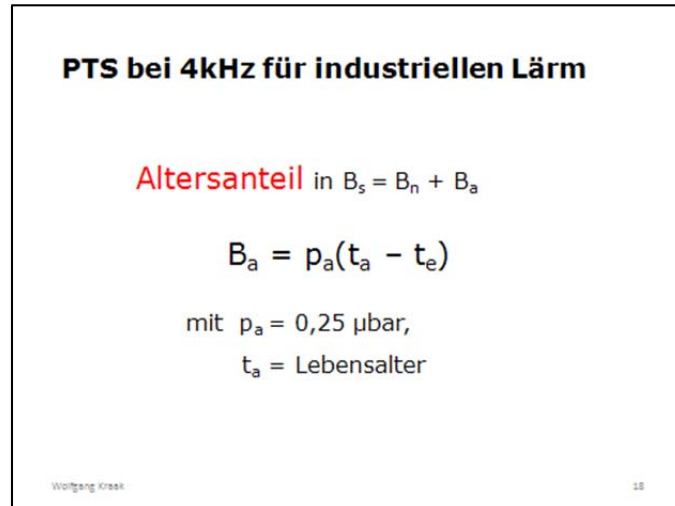
**Lärmdosis (noise dose) in  $B_s = B_n + B_a$**

$$B_n = \int_{t_e} |p_A(t)| dt$$

mit  $p_A(t)$  = A-bewerteter Schalldruck,  
 $t_e$  = Expositionszeit

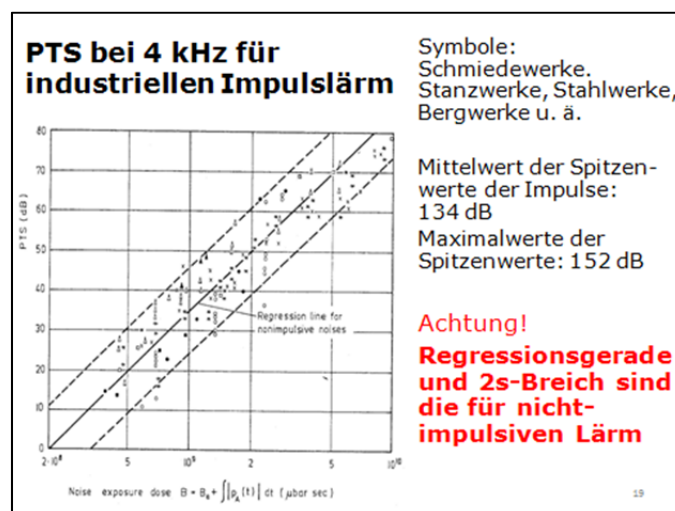
Wolfgang Kressl 17

Die Lärmdosis ist das Zeitintegral über den Betrag des A-bewerteten Schalldruckes für die, zum Bestimmungszeitpunkt im Lebensalter  $t_a$ , gesamte Schallexpositionszeit  $t_e$ .



Der Altersanteil ist dem um die Expositionszeit reduzierten Lebensalter proportional.

Die untersuchten Personen, von denen die Messwerte stammen, waren gleichförmigem stationärem Lärm ausgesetzt. Die Frage war, wie steht es mit mehr oder weniger impulsivem Schall, wie er bei Blecharbeiten, in Schmieden, Stanzwerken, Bergwerken - also an Arbeitern, die an Presslufthämmern arbeiten, auftritt.

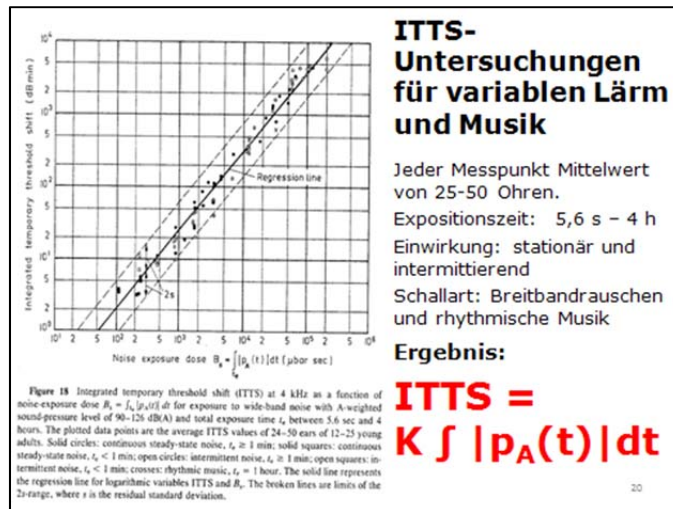


Im Diagramm sind wieder die PTS-Werte bei 4kHz für einzelne Arbeiter und Gruppen von Arbeitern aufgezeichnet, die bei intensivem Schlagimpulslärm gearbeitet haben. Dabei lagen die Spitzenwerte des Schalls denen die Untersuchten in ihrem Arbeitsleben ausgesetzt waren im Mittel bei 134 dB, in Einzelfällen sogar bei 152 dB.

Aufgetragen ist wieder die PTS über der Gesamtdosis, zusammengesetzt aus Lärm- und Altersanteil.

Was nun besonders zu bemerken ist: Die eingetragene Regressionsfunktion und die 2s-Bereiche sind nicht die für die im Diagramm eingetragenen Messpunkte, also die für impulsiven Lärm gültigen, es sind vielmehr die aus dem vorher gezeigten Diagramm für industriellen stationären Lärm. Sie ordnen sich offensichtlich zwanglos ein. D. h. die vorhin angegebenen Beziehungen sind also sowohl für stationären als auch für impulsiven Industrielärm gültig. Das bedeutet schließlich, das vorhin dargestellte Gehörschadensmodell für stationären mehr oder weniger gleichförmigen Lärm gilt ebenso für industriellen bzw. handwerklichen Schlagimpulslärm.

Es ist die Frage zu stellen, wie verhält es sich mit der Schadenswirkung von Schall stark schwankender Intensität und, oder auch eingeschlossen, von Musik. Hierzu war es uns nicht möglich, genügend zuverlässiges und statistisch auswertbares Datenmaterial über Expositions- und Schädigungsereignisse zu erlangen. Deshalb haben wir hierzu umfangreiche schadensäquivalente also ITTS-Untersuchungen durchgeführt.



Jeder Messpunkt zeigt den Mittelwert von 25 – 50 Ohren, die 5,6 s bis 4h kontinuierlich oder intermittierend Breitbandrauschen oder rhythmischer Musik ausgesetzt waren. Es ergibt sich wieder wie für die retrospektiven PTS Untersuchungen: der Verlauf der schadensäquivalenten ITTS, die Schadenswirkung ist proportional dem Zeitintegral über den Betrag des A-bewerteten verursachenden Schalldruckverlaufes. Betonen möchte ich, für Beschallung mit Musik hat sich kein wesentlicher Unterschied zu Breitbandrauschen ergeben.

## Schlussfolgerung

Unabhängig von der Art des Schalles ob industrieller kontinuierlicher oder impulsiver Schall, oder auch Musik - der Gehörschaden wird von der Gesamtdosis während der Lebenszeit des Menschen bestimmt.



### Schlussfolgerung

Unabhängig von der Art des Schalles  
 - ob industrieller kontinuierlicher oder impulsiver  
 Schall, oder auch Musik -  
 der Gehörschaden wird nur von der Gesamtdosis  
 während der Lebenszeit des Menschen bestimmt:

$$\int_{t_e} |p_A(t)| dt$$

Wolfgang Kraak

21

Aus der Maßgeblichkeit des Schalldruckes (nicht der Energie) für den Gehörschaden ergibt sich eine Schlussfolgerung für die Äquivalenz von Schallintensität und Expositionszeit:

Doppelter Schalldruck, also um 6 dB erhöhter Schalldruck entspricht in Hinblick auf die Gehörschädlichkeit doppelter Einwirkungszeit.

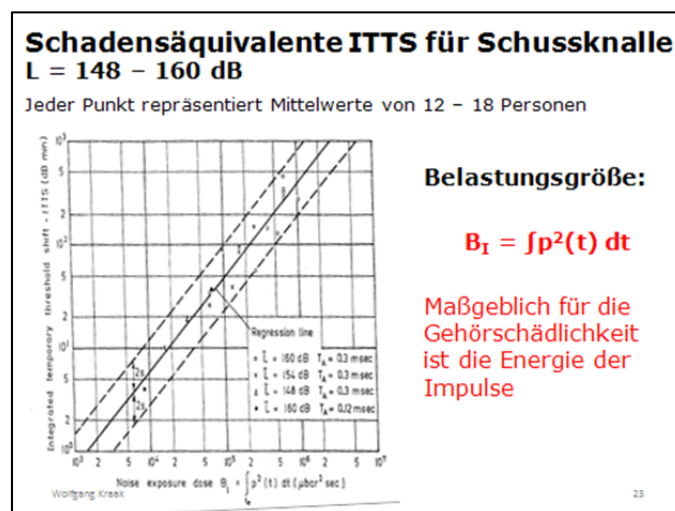
### Schussknalle

Zur Schadenswirkung von Schussknallen war es uns nicht möglich retrospektive Untersuchungen an gehörgeschädigten Personen durchzuführen. Sowohl militärische als auch sportliche Einrichtungen waren in Hinblick auf die in ihren Bereichen verursachten Gehörschäden absolut und bedingungslos verschlossen. Die weithin bekannte Tatsache solcher Schäden wurde von den zuständigen Stellen bestritten. Wir waren bei unseren Untersuchungen ausschließlich auf ostdeutsche Militär- und Sportsverbände angewiesen. Aus Gesprächen mit ausländischen und westdeutschen Kollegen wussten wir, dass es anderswo, nicht anders war.

In Gesprächen mit dem zuständigen Medizinergeneral der NVA wurde von ihm behauptet, es gelte ein Befehl über Übungsschießen in der Armee und danach dürfte nur mit Gehörschutz geschossen werden und dieser Befehl würde streng überwacht und eingehalten. Zu meinem Einwand, dass ich dazu von ehemaligen

Wehrpflichtigen ganz andere Informationen hätte, wollte er keine Stellung nehmen. Sein ironisches oder um Verständnis bittendes Lächeln war aber eindeutig. Mit außerordentlicher Vorsicht wurden von uns zur Thematik Schussknalle ITTS-Untersuchungen durchgeführt. Den Tierschützern sei versichert, keine Tierexperimente.

Generell sei an dieser Stelle festgehalten, dass bei allen unseren ITTS-Untersuchungen die Versuchspersonen immer über die Schädlichkeit unserer Versuche unterrichtet wurden. Es wurde ihnen nur versichert, dass die Schädigung nicht über die durch ein Konzert von Popmusik verursachte hinausgehen würde. Das war auch die eigene Rechtfertigung für unsere Versuche. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im folgenden Diagramm dargestellt.

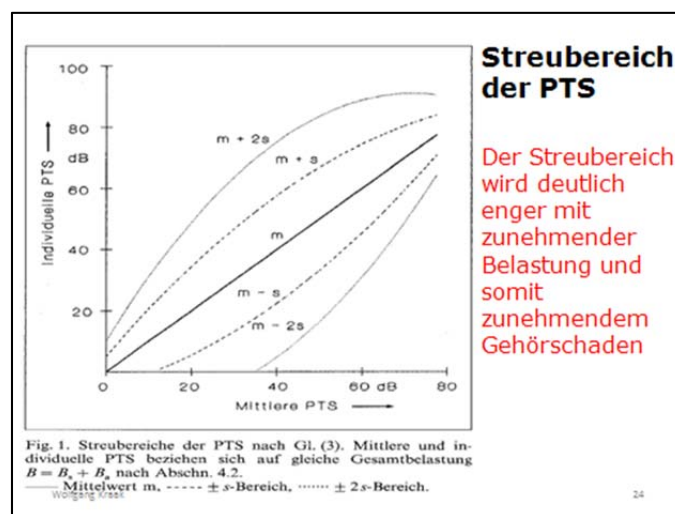


Das Diagramm zeigt die schadensäquivalenten ITTS-Mittelwerte für Gruppen von 12 - 18 Personen, die Schussknallen mit Spitzenwerten von 148 – 160 dB ausgesetzt waren. Die schadensäquivalente Größe ist auch hier einer Dosis proportional, nur dass sie über die Energie, d.h. über das Quadrat der Schalldrücke gebildet werden muss.

## Individuelle Streuungen

Erwartungsgemäß gibt es große individuelle Unterschiede in Hinblick auf die gehörschädigende Wirkung von Schall. Aber, wie wir gleich sehen werden, es gibt keine ausgesprochene Unempfindlichkeit gegenüber Schalleinwirkungen.

Nach einem Diagramm, das nach den Ergebnissen von retrospektiven Untersuchungen unserer Mitarbeiterin Ines Paul angefertigt wurde, ergibt sich folgender Verlauf der Streubereiche:



Bei geringem mittlerem Wert der PTS sind die Streubereiche außerordentlich groß. Selbst bei einer mittleren PTS von 40 dB erstreckt sich der Bereich der doppelten Standardabweichung von etwa 5 dB bis etwa 75 dB. Man hat den Eindruck es gibt tatsächlich auch nahezu unempfindliche Personen. Dagegen sind bei hohem mittlerem Wert der PTS die Schläuche stark eingeeengt. Also bei langandauernder Lärmexposition wird am Ende jeder stark geschädigt. Ich vermute aber, dass bei den Personen mit länger anhaltender Lärmexposition die Homogenität der Gruppen größer ist. Oder, in anderer Sicht, bei geringeren mittleren Schäden sind die Streuungen deshalb so groß, weil die Homogenität der erfassten Gruppen nicht groß genug war, so dass ein Teil der dort erfassten Personen, tatsächlich gar nicht den zugrunde liegenden Pegeln ausgesetzt war.

Um die individuellen Unterschiede in Hinblick auf das Gehörschadensrisiko differenzierter zu untersuchen, auch in Hinblick auf unterschiedliche Schallbelastungen. haben wir Versuchsreihen mit Messung des schadensäquivalenten Kriteriums durchgeführt, also ITTS-Tests.

Untersucht wurden:

- stationärer Schall,
- Schlagimpulslärm,
- Explosionsgeräusche (Schussknalle).

Erwartungsgemäß liegen sehr große inter- und intraindividuelle Unterschiede vor.

Für die sehr stark schwankenden Versuchswerte ergab sich Normalverteilung für die logarithmischen individuellen ITTS-Werte.

Mit dem geometrischen Mittelwert

$$x_G = 10^{1/n \sum_{i=1}^n \log x_i}$$

und der Standardabweichung der logarithmierten Messwerte

$$s_{\log} = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log x_G)^2 \right]^{1/2}$$

wurde ein Abweichungsfaktor zur Kennzeichnung der Abweichung individueller Empfindlichkeiten vom geometrischen Mittelwert definiert

$$d = 10^{s_{\log}}$$

Es ergaben sich als Streufaktoren für unterschiedliche Expositionen

- stationärer und intermittierender Lärm ...  $d \approx 1,5$
- Schlagimpulslärm .....  $d \approx 2,5$
- Impulslärm hoher Intensität (Schussknalle)  $d \approx 3,5$

Ganz deutlich sind die großen Unterschiede der individuellen Empfindlichkeiten mit sozusagen zunehmender Impulsivität des Schalles.

Um die individuellen Unterschiede eindringlich zu demonstrieren, möchte ich Ihnen hier die Ergebnisse einer ausgewählten Versuchsreihe vorstellen.

Untersucht wurden 16 männliche Personen. In einem ersten Versuch wurden die Personen einem breitbandigen stationären Geräusch bei dem A-bewerteten Schallpegel  $L_A = 100$  dB, Expositionszeit  $t_e = 60$  min ausgesetzt, in einem zweiten einem Schussknall mit Spitzenwert 160 dB.

Gemessen wurde die jeweilige integrierte zeitweilige Hörschwellenverschiebung – die ITTS.

Es sei  $S_i = ITTS_i$  das individuelle Gehörschadensrisiko.

Bei logarithmischer Normalverteilung der Werte sei  $S_i^*$  das individuelle Risiko bezogen auf den geometrischen Mittelwert.

<b>Individuelle Empfindlichkeitsunterschiede</b>		
VP	Stat. Schall	Schussknall
1	2,56	2,27
2	2,43	max → 352
3	2,25	1,87
4	1,53	1,66
5	1,41	1,52
6	1,30	42,3
7	1,10	16,3
8	0,97	2,59
9	0,80	0,98
10	0,89	1,11
11	0,79	0,73
12	0,74	0,89
13	0,74	0,71
14	0,66	0,61
15	0,49	min → 0,27
16	0,23	0,43

**Stationärer Lärm:**  
 $S_i^*(\max)/S_i^*(\min) = 11/1$

**Schussknall:**  
 $S_i^*(\max)/S_i^*(\min) = 1304/1$

Wolfgang Kreis 30

In der Tabelle sind auf der linken Seite die Ergebnisse des Tests für stationären Schall in abfallender Folge angezeigt. Der Maximalwert (oben) zum Minimalwert (unten) unterscheidet sich wie 11 / 1. In der rechten Reihe die Ergebnisse für die gleichen Versuchspersonen nach Belastung mit einem Schussknall. Für einzelne Personen ergaben sich extreme Empfindlichkeiten. Das Verhältnis vom Maximal-

wert zum kleinsten Wert beträgt hier 1304/1. Man muss annehmen, dass einzelne besonders empfindliche Ohren bereits durch einen Schussknall geschädigt werden können. Und es ist aus ohrenärztlicher Praxis und aus Militärkrankenhäusern bekannt, dass bei extrem empfindlichen Personen bei Schießübungen mit ungeschützten Ohren schon nach einem oder wenigen Schüssen Traumen, d. h. akute Gehörschäden, mit lang andauernden oder bleibendem Hörverlust auftreten.

Personengruppen die durch Sport, Beruf oder Freizeitbeschäftigung Schussknallen ausgesetzt sind, sollten auf ihre Empfindlichkeit getestet werden.

In der oben an dritter Stelle angeführten Publikation, sind Testmethoden vorgeschlagen und Verhaltensweisen für Betroffen, die sich hieraus ergeben.

### **Thesen zur Gehörschadenswirkung von Lärm**

1. Bei kurzzeitiger Schallbelastung ist die ITTS, das Zeitintegral über der zeitweiligen Hörschwellenverschiebung, ein Maß für die gehörschädigende Wirkung des Schalles.

2. Der vom Lärm verursachte Gehörschaden hängt ab von der während der Lebenszeit akkumulierten Lärmdosis.

Der mit zunehmendem Alter und von Lärmeinwirkungen bestimmte Gehörschaden kann von einer Gesamtdosis abgeleitet werden, die sich aus einem Lärm- und einem Altersanteil zusammensetzt:

$$\text{Gesamtdosis} = \text{Lärmdosis} + \text{Altersanteil}$$

3. Die Lärmdosis ist das Zeitintegral über den mit einer Potenzfunktion bewerteten Betrag des Schalldruckes. Der Bewertungsexponent ist 1 bei stationärem Schall und 2 bei Schallimpulsen hoher Intensität.

Folgerung für Äquivalenzen hinsichtlich Gehörschadenswirkungen:

- 6 dB höherer Schalldruck ist äquivalent doppelter Belastungszeit.
- Zwei Knalle bei einem bestimmten Spitzenwert entsprechen einem Knall bei 3 dB höherem Spitzenwert.

4. Die interindividuellen Empfindlichkeitsunterschiede sind bei impulsivem Lärm (Schussknallen) erheblich größer als bei stationärem Lärm. Unterscheiden sich die Empfindlichkeitswerte bei Belastungen mit stationärem Lärm interindividuell wie 1 : 10, so bei Schussknallen mehr als 1 : 1000.

Bei Schussbelastungen extrem empfindlicher Personen genügt ein Knall zur Gehörschädigung auf Lebenszeit.

## **Fazit**

Wir, die wir viele Jahre und auch mit einiger Leidenschaft an der Thematik der Gehörschadenswirkung von Lärm gearbeitet haben, müssen uns heute fragen, was unsere Arbeit bewirkt hat? Wir haben mit dieser Arbeit einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Auswirkung der akustischen Umwelt des Menschen auf seine Hörfähigkeit geschaffen. Diese Umwelt ist weit gespannt, dazu zählen Berufsleben, Verkehr, Sport, Unterhaltung. Und gutes Hören ist sicher ein wesentliches Merkmal für Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden des Menschen.

Die internationale und die nationale Normung hat hinsichtlich der Verhinderung von Gehörschäden im Arbeitsleben einen hohen und ich möchte sogar sagen, befriedigenden Stand erreicht. Das in den Standards aber immer von Effektivwerten des Schalldruckes, also dem energetischen Mittelwert und nicht wie in unserem Modell für stationären Schall der Betragsmittelwert festgelegt ist, ist dabei eher nebensächlich. Diese Festlegung ist im Interesse der Einheitlichkeit der akustischen Schallmesstechnik erfolgt.

Nach wie vor sind die Gehörbelastung und die Schädigung durch Musik problematisch. Bei Orchestermusik sind es Musiker, die gefährdet sind, bei Popmusik sowohl die Musiker als auch die Hörer. Hier ist vorwiegend Aufklärung und Jugendschutz angemessen. Dem erwachsenen aufgeklärten freien Bürger steht es selbst an, über seine gesundheitlichen Potenzen zu verfügen.