

# Psychoakustik am Bau

Dr. Jan Krüger / 05.10.2023



**Zentrum für akustische  
und thermische  
Bauphysik**

Hochschule  
für Technik  
**Stuttgart**

## Was ist Psychoakustik und wozu wird sie benötigt?

- Die Psychoakustik befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen der physikalisch messbaren Anregung durch Schall und der dadurch hervorgerufenen Hörwahrnehmung sowie dessen Beurteilung durch den Menschen.
- Dies ist nötig, weil in vielen Fällen kein einfacher Zusammenhang zwischen Schalldruck und menschlicher Empfindung besteht bzw. dieser sich auch im Kontext verändert.



Bildquelle: Cleveland Clinic / J. Kaltenbach



Bildquelle: Westfälische Nachrichten / O. Werner

# Psychoakustik – vom Schall zum Urteil darüber

## Objektiver Reiz

Physik



## Funktionaler Reiz

Physiologie,  
Psychophysik



## Wahrnehmung

Psychologie,  
Psychophysik



## Urteil und Reaktion

Psychologie,  
Sozialpsychologie



Quelle: [Liebl / Fraunhofer-IBP](#)

# Hörversuch – das „Messgerät“ der Psychoakustik

## Grundlagen der Durchführung und Auswertung

- Darbietung der zu bewertenden Sounds mit guten Kopfhörern oder Lautsprechern im Soundstudio oder Freifeldraum
- Methodik von Hörversuchen
  - Ja/Nein-Wahrnehmung Methode
  - Vergleichsmethode (z.B. pendelnd => RHS)
  - Größenschätzung (z.B. mit Ankerschall)
- Grenzwerte vs. Verhältniswerte
- Grenzwertübergang bei 50% bestimmt Ergebnis (z.B. RHS)
- Auswertung der Versuchsreihe
  - Statistik => Normalverteilung anstreben
  - ausreichende Grundgesamtheit von relevanten Versuchspersonen ( $N > 20 / 40 / 80$ )
  - Streuung durch möglichst konstante Bedingungen minimieren
  - Blindtest mit Plausibilitäts-Check durch teilweise Wiederholung



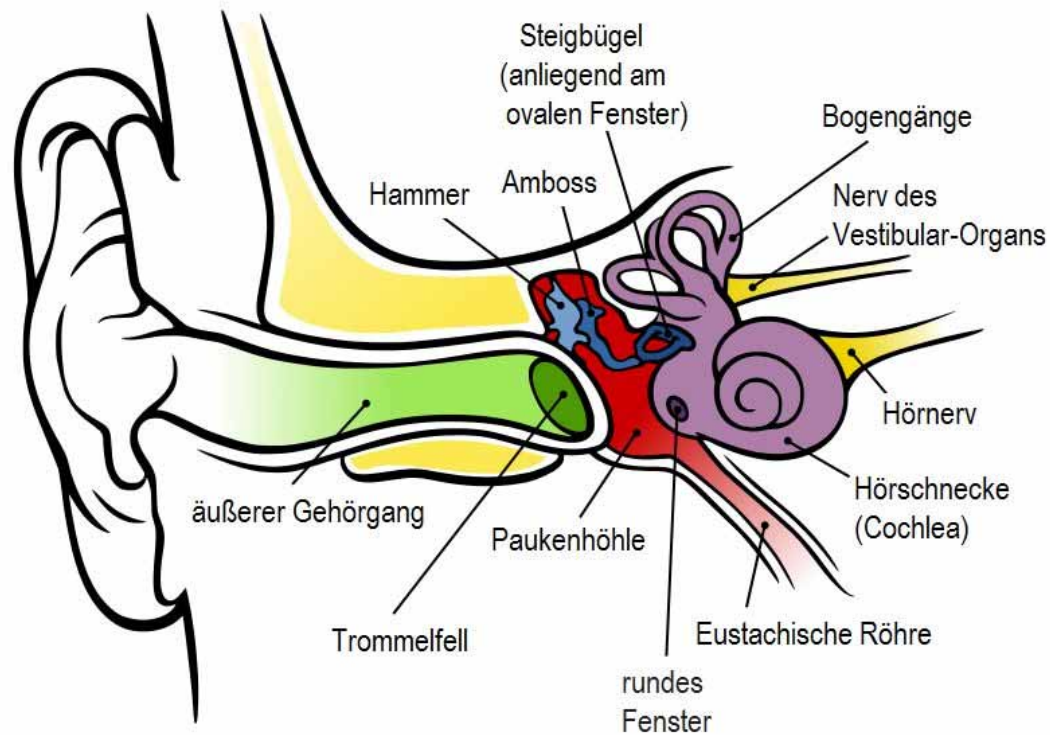
Bildquelle: Krüger / PUREM



Bildquelle: Marxt / HFT-Stuttgart

# Wie funktioniert unser Gehör ?

## Anatomie



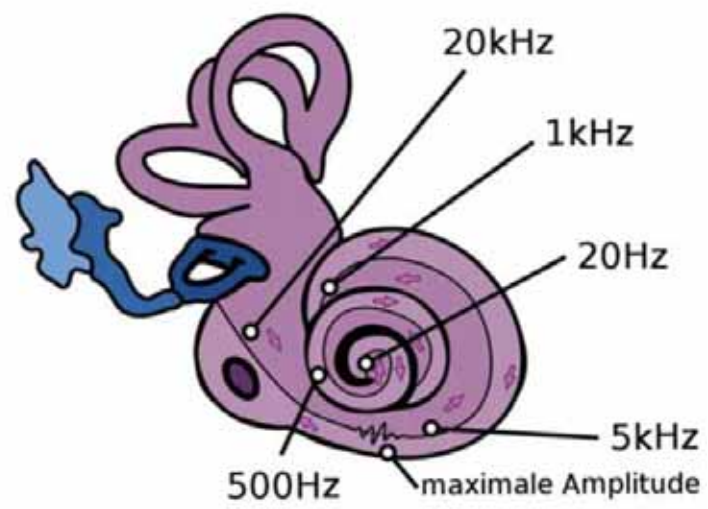
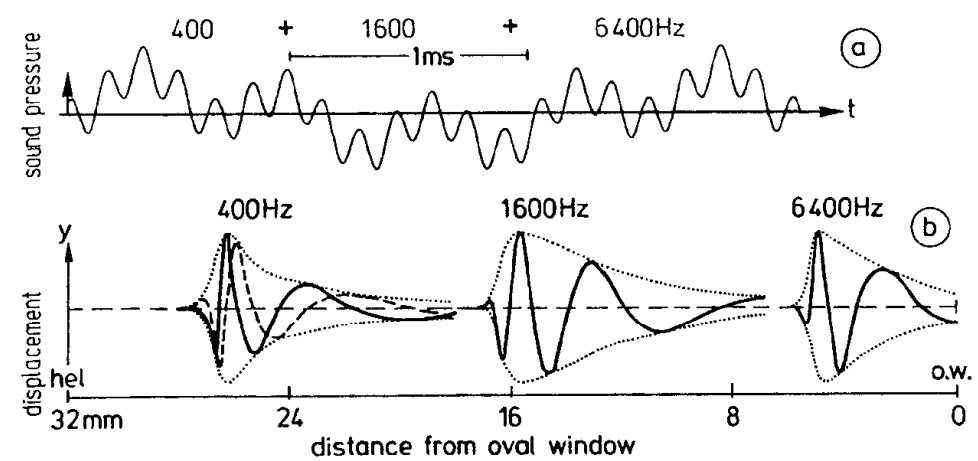
Äußeres Ohr

Mittelohr

Innenohr

Quelle: [uvex-safety.com](http://uvex-safety.com)

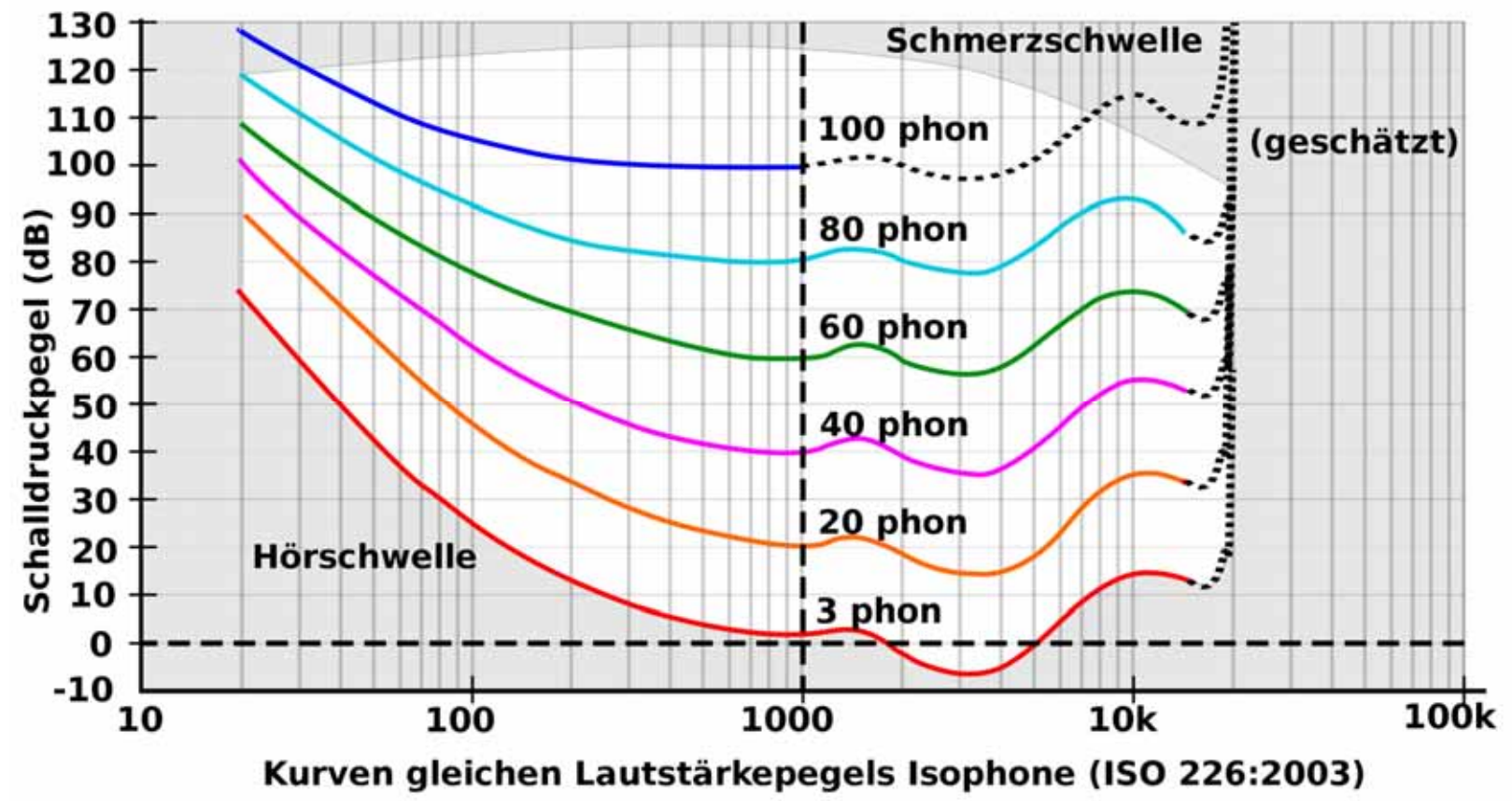
# Wie funktioniert unser Gehör ? Informationsverarbeitung



**Fig. 3.5a,b.** Schematic drawing of the transformation of frequency into place along the basilar membrane. In (a) three simultaneously presented tones of different frequencies expressed as compound time function produce travelling waves (b), that reach their maximum at three different places corresponding to the characteristic frequencies

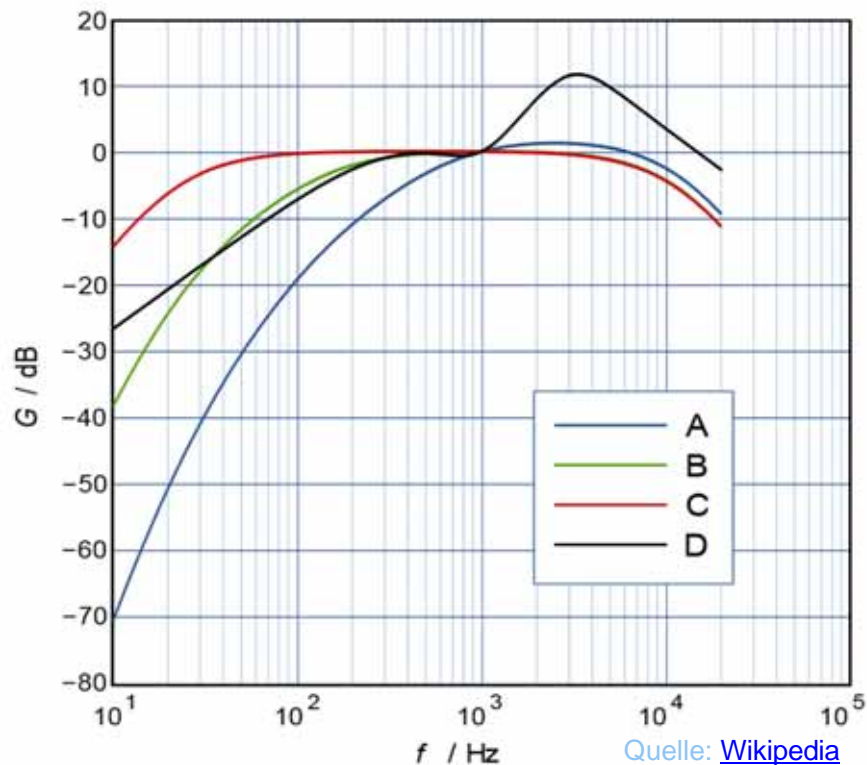
# Wie funktioniert unser Gehör ?

## Kurven gleicher Lautstärke / Isophonen



# Wie funktioniert unser Gehör ?

## Einführung der Frequenzbewertung (dB A-D)



- A-Bewertung:** entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 30–40 dB
- B-Bewertung:** entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 50–70 dB
- C-Bewertung:** entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 80–90 dB
- D-Bewertung:** entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei sehr hohen Schalldrücken

Typisches Beispiel:  
Grenzwert für Kfz-Vorbeifahrtpegel nach ISO 362:

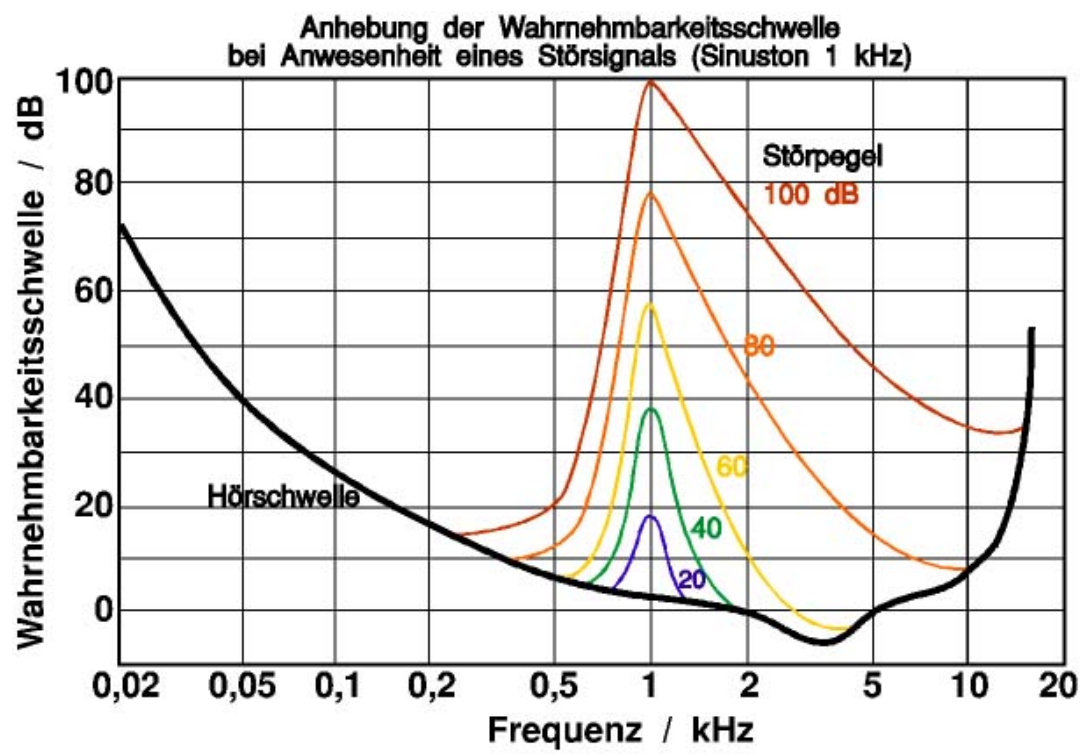
$$L_{F,A,max} = 74 \text{ dB(A)}$$

**Warum hier A-Bewertung?**



# Was heißt Maskierung von Geräuschen ?

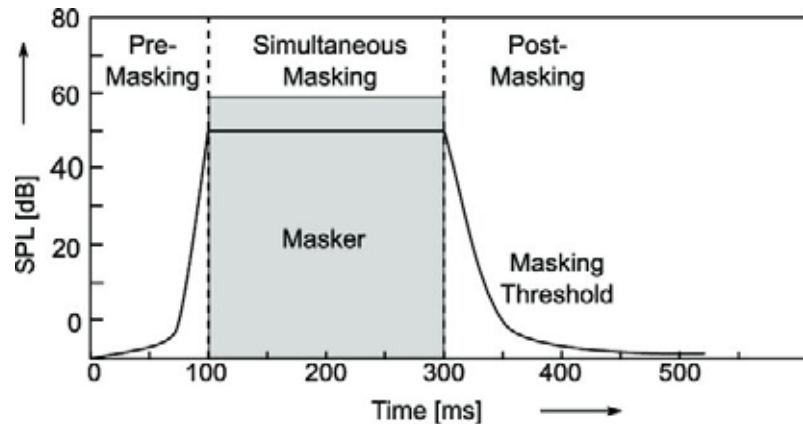
## Stationäre Verdeckung durch Töne



Bildquelle: [Wikipedia CC BY-SA 4.0](https://de.wikipedia.org/wiki/Maskierung_(Psychoakustik))

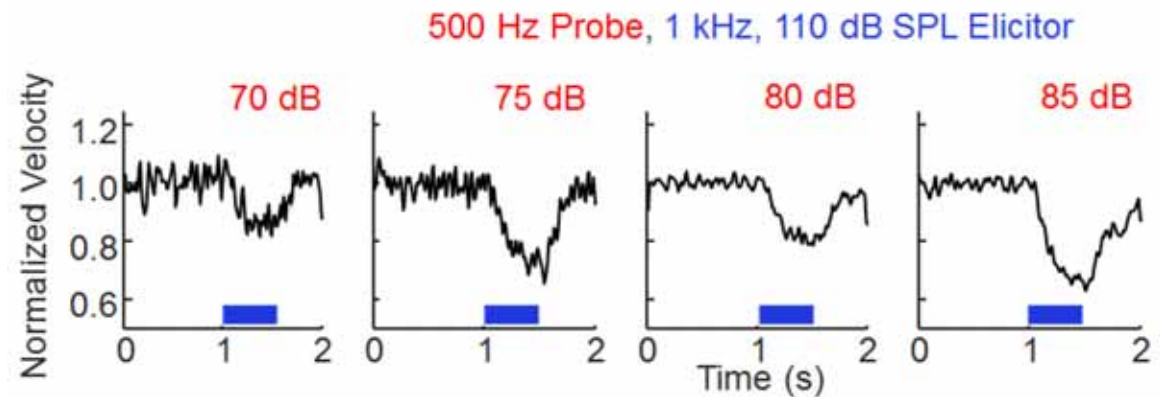
# Was heißt Maskierung von Geräuschen ?

## Instationäre Verdeckung durch Töne / Stapediuseffekt



Bildquelle: Herre & Dick / Erlangen

- eingeschränkte Hörwahrnehmung vor und nach einem Maskierungsgeräusch
- Vor- und Nachverdeckung sind unterschiedlich stark (lang) ausgeprägt



Bildquelle: Jones et al / <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.11.006>

- Stapediusreflex - Kontraktion des Stapediusmuskels im Mittelohr bei lauten Geräuschen
- führt zu gewissem Gehörschutz ab ca. 70 dB / 70 ms
- messbar mittels Laser-Doppler-Velocimeter
- wird von Mercedes-Benz benutzt, indem vor Auslösen der Airbags, lautes Geräusch dargeboten wird

# Eben wahrnehmbare Änderungen der Lautstärke

## Daten aus Hörversuchen im Labor

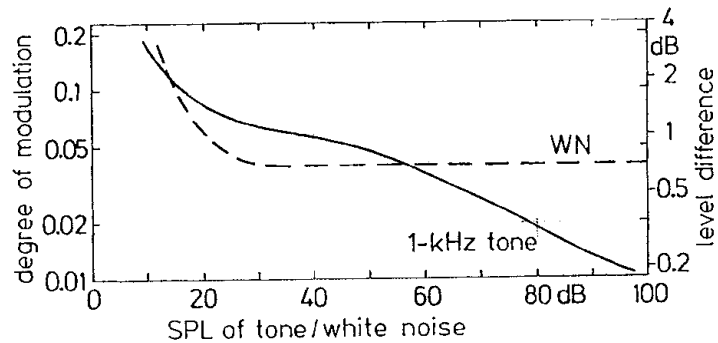


Fig. 7.1. Just-noticeable degree of amplitude modulation (*left scale*) and corresponding level variation (*right scale*) of a 1-kHz tone and of white noise (WN) as a function of sound pressure level (the frequency of modulation is 4 Hz)

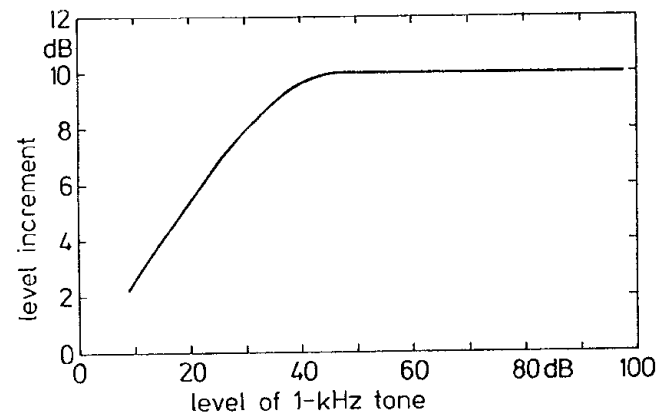


Fig. 8.3. Level increment (or decrement) necessary to produce a doubling (or halving) of the loudness of a 1-kHz tone as a function of its level

# Wahrnehmung der Änderungen der Lautstärke

## Werte für die Praxis

### Randbedingungen

- Unterschiede werden unter Laborbedingungen besser erkannt als im Feld (am Bau)
- überwiegend breitbandige Geräusche verwischen Unterschiede im Vergleich zu reinen Sinustönen, die praktisch kaum vorkommen
- größere Zeiträume zwischen den beiden Vergleichspegeln (z.B. vor und nach einer Schallschutzmaßnahme) erschweren den Vergleich
- Tabelle rechts gibt Hinweise für die Wirkung von Pegeländerungen breitbandiger Geräusche auf Menschen

Änderung des Pegels in dB(A)	Wahrnehmbarkeit im direkten Vergleich	Wahrnehmbarkeit mit größerem zeitlichen Abstand
1	gerade eben von einige Menschen	kaum jemand
3	deutlich von den meisten Menschen	von einigen Menschen
10	Verdopplung	deutlich von den meisten Menschen
20	Vervierfachung	stark von allen Menschen

# Wahrnehmung der Änderungen der Lautstärke

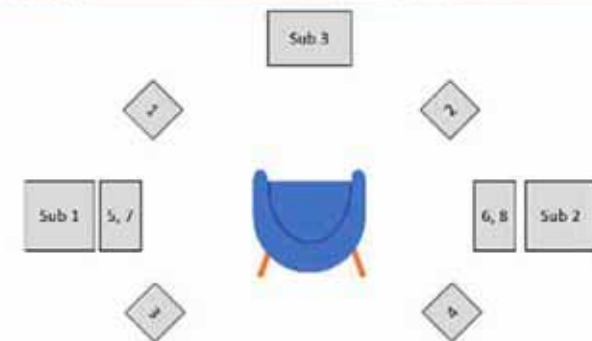
## Auswirkungen in der Praxis

- lärmgeplagte Menschen erwarten durch die Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen eine **deutliche** Verbesserung ihrer Situation
- Pegelangaben mit Nachkommastellen sind nur bei formalen Grenzwerten überhaupt sinnvoll
- eine Pegelsenkung von  $< 3$  dB hilft nur „auf dem Papier“
- nicht zu unterschätzen ist die psychologische Wirkung einer Schallschutzmaßnahme
- Bsp. Reduzierung der maximalen Verkehrsgeschwindigkeit
  - Quelle: Stevens / Lärmkongress Stuttgart 2023 => Halbierung der Geschwindigkeit => - 10 dB(A)
  - Tempo 30 statt 50 km/h => realer Effekt nachvollziehbar
  - Tempo 120 statt freier Fahrt => reale Pegelsenkung ca. 1.0 dB(A) – bei 10% Lkw-Anteil
  - praktisch kaum wahrnehmbar, aber: positiver Effekt - Politik tut etwas => Anwohner fühlen sich besser
- Bsp.: Wärmepumpe 2 dB zu laut => Annahme: Schallschutzhaube reduziert Lärm um ca. 3 dB(A)
  - **Fall A:** Nachbar wurde gerichtlich angewiesen einen zusätzlichen Schallschutz zu integrieren
  - Effekt ist nach längeren Umbauarbeiten kaum hörbar, aber es bleibt das erhebende Gefühl des Siegers im Nachbarschaftsstreit
  - **Fall B:** Eigentümer der Wärmepumpe fühlte sich gestört
  - nach längeren Umbauarbeiten ist die Verbesserung kaum hörbar => Kunde vermutlich unzufrieden mit Lösung

# Trittschallschutz in Mehrparteien-Wohngebäuden

## Studie zur Lästigkeit von Trittschall

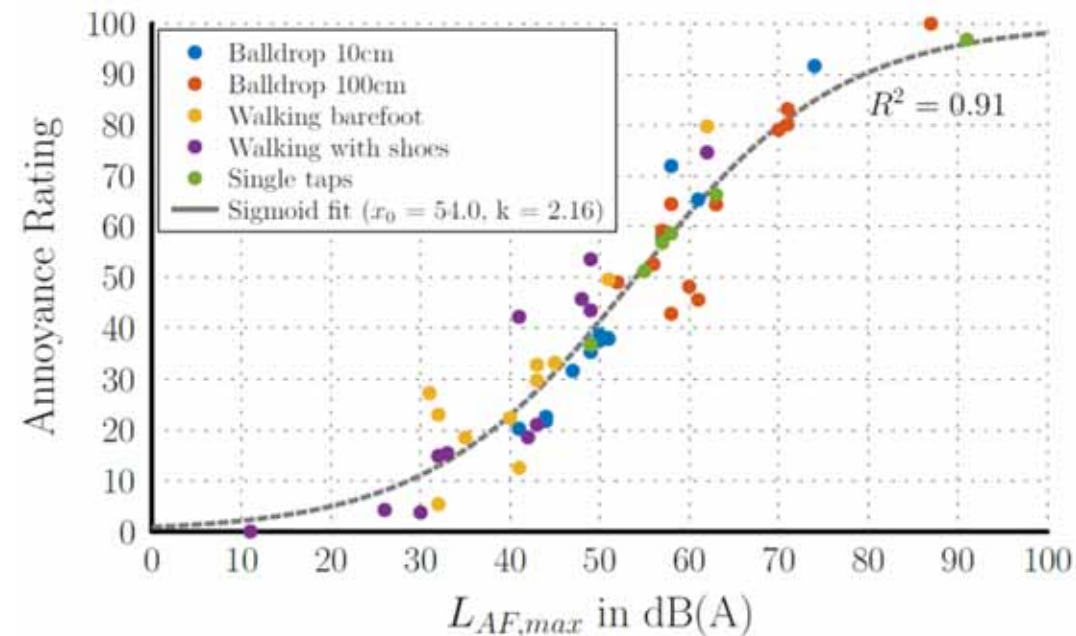
- **Studie:** durchgeführt am NRC-Kanada in Kooperation mit HFT-Stuttgart und Kangwon National University-Korea veröffentlicht auf *Internoise 2020*
- **Frage:** Wie lästig wirken unterschiedliche Trittschallanregungen bei diversen Deckenaufbauten?
- **Aufbauten:** 12 unterschiedliche Konstruktionen aus verleimten Schichtholzplatten, Holzböden mit diversen Auflagen und Unterdeckenkonstruktionen
- **Anregungen:** 6 verschiedene: leichtes Hammerwerk (ASTM E492), Einzelhammerwerk, Gummiball mit Fallhöhe 10 cm und 100 cm, Gehen barfuß und mit Schuhen
- **Bewertung:** Aufnahmen mit Ambisonic-Mikrofonen, Wiedergabe mit Lautsprecher-Array, 26 Probanden (19-60 Jahre)



# Trittschallschutz in Mehrparteien-Wohngebäuden

## Lästigkeit von Trittschall - Ergebnisse

- Präsentation der Trittschalle und Abfrage der Lästigkeit (0-nicht lästig bis 100-sehr lästig) über Matlab-Script und Graphical User Interface (GUI)
- wichtigster Einflussfaktor für die Lästigkeit scheint der  $L_{A,F,max}$  in dB(A) am Empfänger
- nichtlineare Regressionsanalyse mit Sigmoid-Funktion
- über alle Geräusche beste Kurvenanpassung ergab Regressionskoeffizient von  $R^2 = 0.91$
- bei einzelnen Lästigkeitsniveaus variieren jedoch die Pegel um mehr  $> 10$  dB(A)!



# Schutz vor Verkehrslärm in Wohngebäuden

## Motivation und Durchführung

- **Studie:** durchgeführt an der HFT-Stuttgart und in Kooperation mit dem NRC-Kanada veröffentlicht auf DAGA 2023
- **Frage:** Wie lästig wirken unterschiedliche Vorbeifahrgeräusche bei diversen Fassaden?
- **Aufbauten:** 2 unterschiedliche Fassaden, Straßen und Abstände
- **Anregungen:** 10 verschiedene Vorbeifahrten (Motorrad, Pkw, Lkw) in konstanter und beschleunigter Fahrt
- **Bewertung:** Aufnahmen mit Schwenkmikrofon im Empfangsraum (zeitlich und räumlich gemittelt über je 30 s)



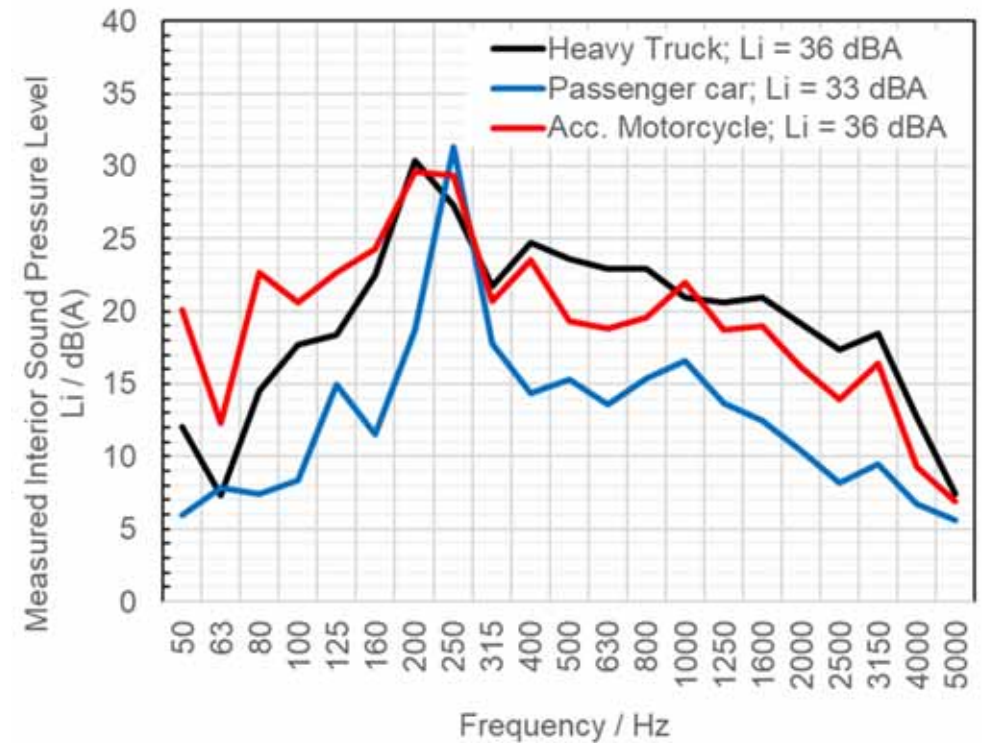
	Tübingen	Stuttgart
Distance from façade to centre of the road ca. (m)	22	16
Façade area $S_s$ (m <sup>2</sup> )	10	12,4
Room floor area $S_G$ (m <sup>2</sup> )	18	30
Room volume $V$ (m <sup>3</sup> )	43	76
Sound Reduction $R'_{tr,s}$ (dB)	31	22
Spectrum adaptation terms $C, C_{tr}$ (dB)	-2, -3	-1, -1



# Schutz vor Verkehrslärm in Wohngebäuden

## Zwischenergebnisse

- Fassadendämmung der untersuchten Gebäude variieren ebenso wie die Anregungen durch den rollenden Verkehr
- Spektrogramm vom Innenpegel bei Lkw-Vorbeifahrt
- wenig Geräusch unter 100 Hz und über 4 kHz, aber viel bei ca. 200 Hz
- dies bestätigen auch andere Studien sowie der Vergleich mit anderen Fahrzeuganregungen
- **Frage:** Wie lästig sind diese Geräusche für die Menschen in den Gebäuden?



# Schutz vor Verkehrslärm in Wohngebäuden

## Hörversuch und seine Ergebnisse

- Hörversuch mit 32 Probanden
- dargeboten wurden 10 gemessene Innenpegel der Vorbeifahrten mit 30 s Dauer
- die Pegel wurden jedoch zuvor auf den gleichen Außenpegel von 74 dB(A) normiert
- ausgewertet wurde Lästigkeit im Vergleich zu den sich ergebenden Innenpegeln sowie der Lautheit  $N_{10}$
- **Ergebnisse:**
  - bei gleichem A-bewerteten Außengeräusch  $L_a$  sind Innenpegel und Lästigkeit deutlich unterschiedlich
  - Lästigkeit innen korreliert gut mit  $L_i$  und besser mit der Lautheit, aber
  - konstante Geräusche (Tü\_g) sind weniger lästig und stark instationäre Geräusche (Tü\_b) sind deutlich lästiger

Measurement Name	Pass-by vehicle	$L_i$ / dB(A)	Loudness $N_{10}$	Psychoacoustic Annoyance
TÜ_a	Heavy Truck	35,2	2,6	5,5
TÜ_b	Passenger car Horn	40,5	4,1	6,9
TÜ_c	Const. Motorbike	38	3,6	5,9
TÜ_d	Bus	39,7	3,1	5,1
TÜ_e	Truck	36,6	2,9	5,2
TÜ_f	Acc. motorbike	37,2	2,9	6,1
TÜ_g	Flowing traffic	40,9	3,3	4,9
ZFB_a	Pass car	46,5	6,2	7,4
ZFB_b	Acc. Pass car	46,6	6,6	7,1
ZFB_c	Const. Pass car	47,9	7	7,2

## Zusammenfassung

- Psychoakustik stellt Bindeglied zwischen Physik und menschlichem Hörempfinden dar
- Systematische Hörversuche ergeben zuverlässige Ergebnisse / belastbare Aussagen
- die akustische Messgröße Schalldruckpegel mit Fast- und A-Bewertung ist die am weitesten verbreitete Größe in der Akustik
- häufig wird sie zur Beurteilung von Lautheit und Lärmbelästigung herangezogen, weil sie relativ einfach messbar und normativ verankert ist
- Lautheit und insbesondere Lästigkeit werden jedoch auch von zahlreichen weiteren Faktoren bestimmt
- ein Zusammenhang zwischen A-bewerteten Außengeräusch und Lärmbelästigung in Gebäuden ist nur vage gegeben



Source: UBA



# Psychoakustik am Bau

## Worum geht es am Ende?



- Die Hörwahrnehmung des Menschen ist komplex und hängt von vielen Einflussgrößen ab.
- Physikalische Messgrößen geben häufig nur Anhaltspunkte, aber:
- Letztlich entscheiden Menschen emotional darüber, ob eine Geräusch angenehm ist oder es als Lärm empfunden wird...
- oder anders gesagt:
- **"Entscheidend ist, was hinten rauskommt." – Helmut Kohl während einer Pressekonferenz am 31. August 1984; zitiert in DER SPIEGEL**



**Helmut Kohl**  
dt. Bundeskanzler  
1982-1998

ICH HOFFE, DAS WAR INTERESSANT FÜR SIE!  
DANKE FÜR IHRE ZEIT UND IHRE AUFMERKSAMKEIT!

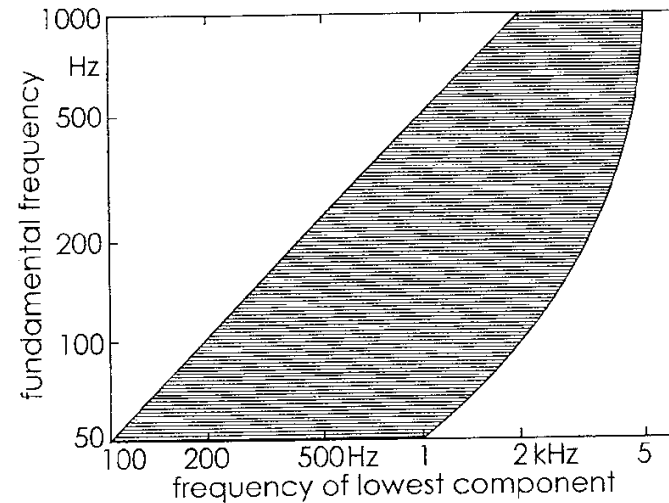
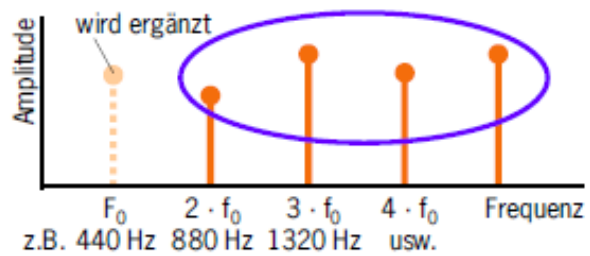


# Backup

# Was heißt Maskierung von Geräuschen ?

## Virtuelle Tonhöhenempfindung

PITCH PITCH



# Psychoakustik – Auswirkung in der Normung

## Beispiel DIN 4109

- **DIN 4109-1- Schallschutz im Hochbau - Mindestanforderungen**

- definiert verbindlich Mindestanforderungen an den Schallschutz in Gebäuden in D
- Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen unterscheiden sich
- je nach Raumart (Krankenhaus 25 dB, Wohnräume 30 dB, Büroräume 35 dB)
- je nach Lärmpegelbereichen und maßgeblichem Außenlärmpegel von 55 dB bis 80 dB
- 5 dB – Abstufungen => sinnvoll, weil klar unterscheidbar / wahrnehmbar

- **DIN 4109-5 - Schallschutz im Hochbau - Erhöhte Anforderungen**

- nicht baurechtlich eingeführt
- erhöhte Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen werden nicht erhoben
- Begründung: weil dadurch „das Grundgeräusch im Inneren eines Raums oder eines Gebäudes potenziell weiter gesenkt“ wird
- „Somit kann die Wahrnehmung von Geräuschen aus fremden Wohn- und Arbeitsbereichen begünstigt werden“
- Argumentation also: Maskierung von Innengeräuschen durch Außenlärm
- dies gilt jedoch nur bei mehr oder weniger Gleichzeitigkeit

