

7. Schwingungs- und Lärminderung im Gerätebau



Schwerpunkte der Vorlesung

GERÄT und UMWELT

Umwelt

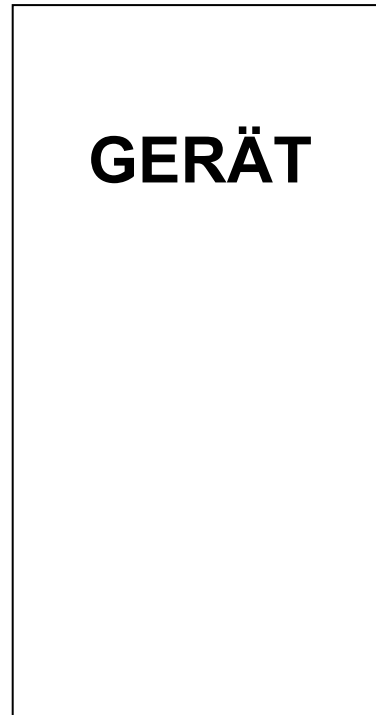


Klima
Fremdkörper
Staub
Wasser
Feuchte
Felder

Mensch



mechanische
Beanspruchung
Schwingungen
Lagerung
Transport
Einsatz-
bedingungen



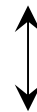
Umwelt

Felder
Wärme
Schwingungen



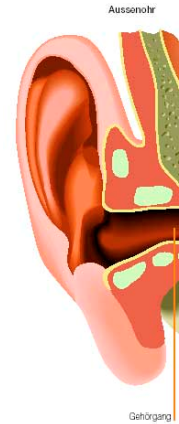
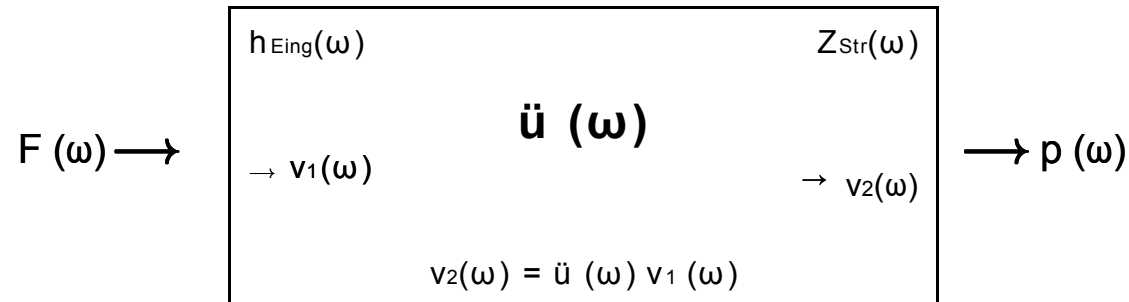
Mensch

Zuverlässigkeit
Sicherheit
Schutzklasse
Genauigkeit
Wärme
Felder
mechanische
Beanspruchung
Schwingungen
Geräusche
Ergonomie



Wärme
Felder
Schwingungen

Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung



Kraftanregung mit $F(\omega)$
führt zu $v_1(\omega)$ mit
 $v_1(\omega) = h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot F(\omega)$
bzw. direkte
Geschwindigkeits-
anregung $v_1(\omega)$

Übertragung des Körperschalls durch
das Gerät mit Übertragungsfunktion
 $\ddot{u}(\omega)$

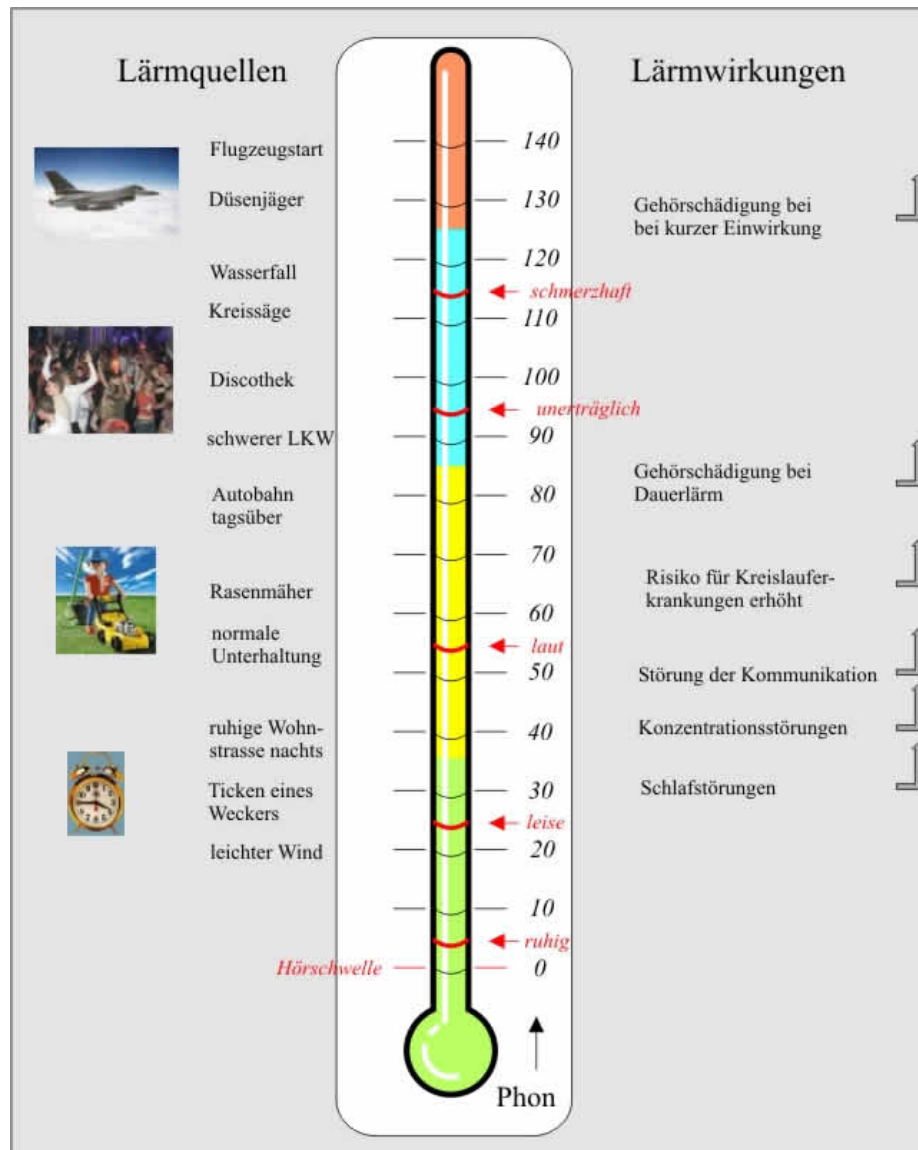
$$v_2(\omega) = \ddot{u}(\omega) \cdot v_1(\omega)$$

Abstrahlung als Luft-
schall $p(\omega)$

$$p(\omega) = Z_{\text{Str}}(\omega) \cdot v_2(\omega)$$

$$F(\omega) \cdot h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot Z_{\text{Str}}(\omega) = p(\omega)$$

Praktikum Lärmmessung (praktische Vorführungen)



Termin
06.02.13
11.30 – 13.00



Literatur zu Abschnitt 7:

- /38/ Krause, W.: Lärminderung in der Feinwerktechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- /39/ Klotter, K.: Technische Schwingungslehre. Berlin: Springer-Verlag 1978.
- /40/ Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag (Abschnitt O).
- /41/ Schiehlen, W.: Technische Dynamik. Stuttgart: Teubner-Verlag 1986.
- /42/ Holzweißig, F.; Dresig, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. Wien: Springer-Verlag 1994.
- /43/ Göbel, E. F.: Gummifeder-Berechnung und Gestaltung. Berlin: Springer-Verlag 1969.
- /44/ Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.
- /45/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall - Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag 1967.

Literatur zu Abschnitt 7:

- /46/ VDI-Handbuch Schwingungstechnik, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /47/ VDI-Handbuch Lärminderung, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /48/ Tuffentsammer, K.: Lärmarm Konstruieren. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart 1979.

Ausgewählte Normen und Richtlinien zu Schwingungen:

- /49/ VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen.
- /50/ VDI 2062: Schwingungsisolierung.
- /51/ VDI 3831: Schutzmaßnahmen gegen die Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen.
- /52/ DIN 45661: Schwingungsmesseinrichtungen, Begriffe.
- /53/ DIN 45662: Schwingungsmesseinrichtungen, allgemeine Anforderungen und Prüfung.

Ausgewählte Normen und Richtlinien zu Schwingungen:

- /54/ DIN 45664: Ankopplung von Schwingungsmessgeräten und Überprüfung auf Störeinflüsse (zurückgezogen).
- /55/ DIN 45666: Schwingstärkemessgerät; Anforderungen (zurückgezogen).
- /56/ DIN 45669: Messung von Schwingungsimmissionen.
- /57/ DIN EN ISO 8041: Schwingungseinwirkung auf den Menschen.
- /58/ DIN EN 28662 ff: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf das Hand-Arm-System.
- /59/ DIN 45676: Mechanische Eingangsimpedanz und Übertragungsfunktion des menschlichen Körpers (zurückgezogen).

Ausgewählte Normen und Richtlinien zu Geräuschen:

- /60/ VDI 2058: Beurteilung von Arbeitslärm.
- /61/ DIN ISO 5128: Akustik - Innengeräusche in Kraftfahrzeugen.
- /62/ DIN ISO 14163: Akustik - Leitlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer.
- /63/ DIN ISO 15667: Akustik - Leitlinien für den Schallschutz durch Kapseln und Kabinen.
- /64/ VDI 3720: Lärmarm Konstruieren.
- /65/ VDI 3727: Schallschutz durch Körperschalldämpfung.
- /66/ VDI 3738 ff: Emissionswerte technischer Schallquellen.
- /67/ DIN EN ISO 1683: Akustik - Bevorzugte Bezugswerte für Pegel ...
- /68/ DIN EN ISO 3740 ff: Akustik - Bestimmung des Schalleistungspegels von Geräuschquellen ...
- /69/ DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln.

Emissionswerte für technische Schallquellen:

- /70/ VDI 3738 ff: Emissionswerte technischer Schallquellen.
/71/ DIN EN 60704-3: Elektrische Geräte für den Hausgebrauch -
Prüfvorschriften für die Bestimmung der Luftschallemission.

Beurteilung von Lärm:

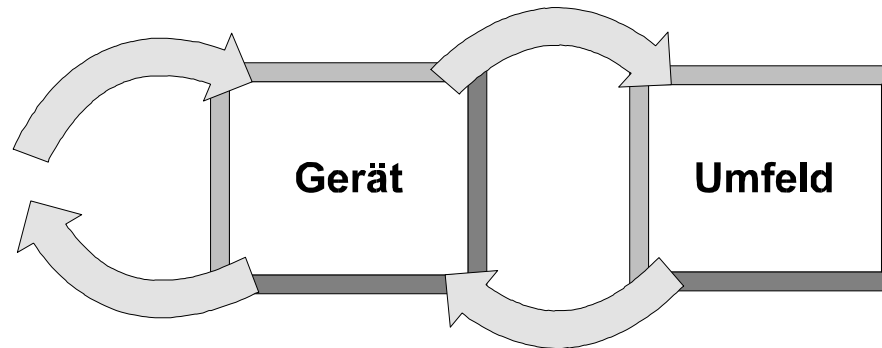
- /72/ VDI 2058: Bl. 1 Beurteilung von Arbeitslärm in der
Nachbarschaft
 Bl. 2 Beurteilung von Arbeitslärm
 hinsichtlich Gehörschäden
 Bl. 3 Beurteilung von Lärm am
Arbeitsplatz unter
Berücksichtigung
unterschiedlicher Tätigkeiten.
/73/ DIN EN 61672-1: Schallpegelmesser (Definition verschiedener
Bewertungskurven).
/74/ DIN 45645: Einheitliche Ermittlung des Beurteilungspegels für
Geräuschemissionen.

7.1 Einführung



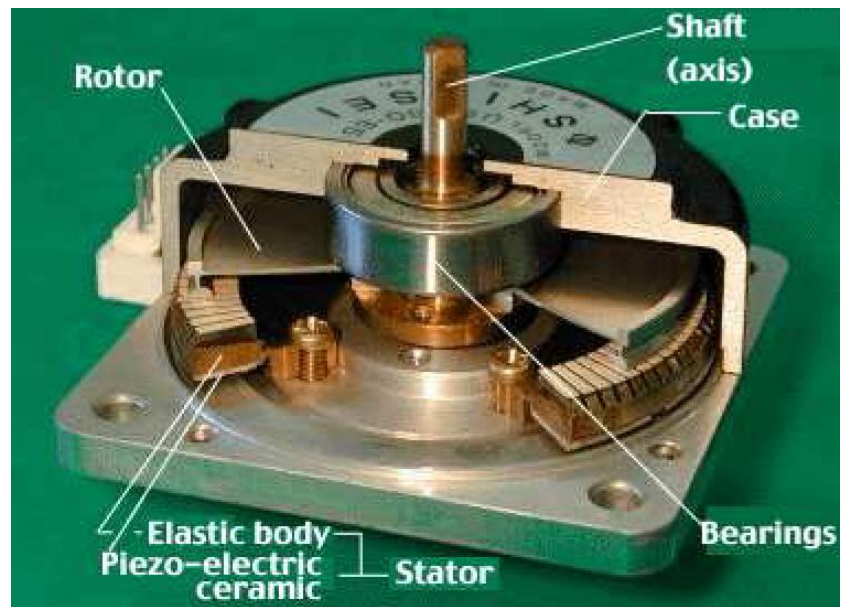
Einführung

Entstehung und Wirkung von Schwingungen – Wirkungsrichtungen der Schwingung

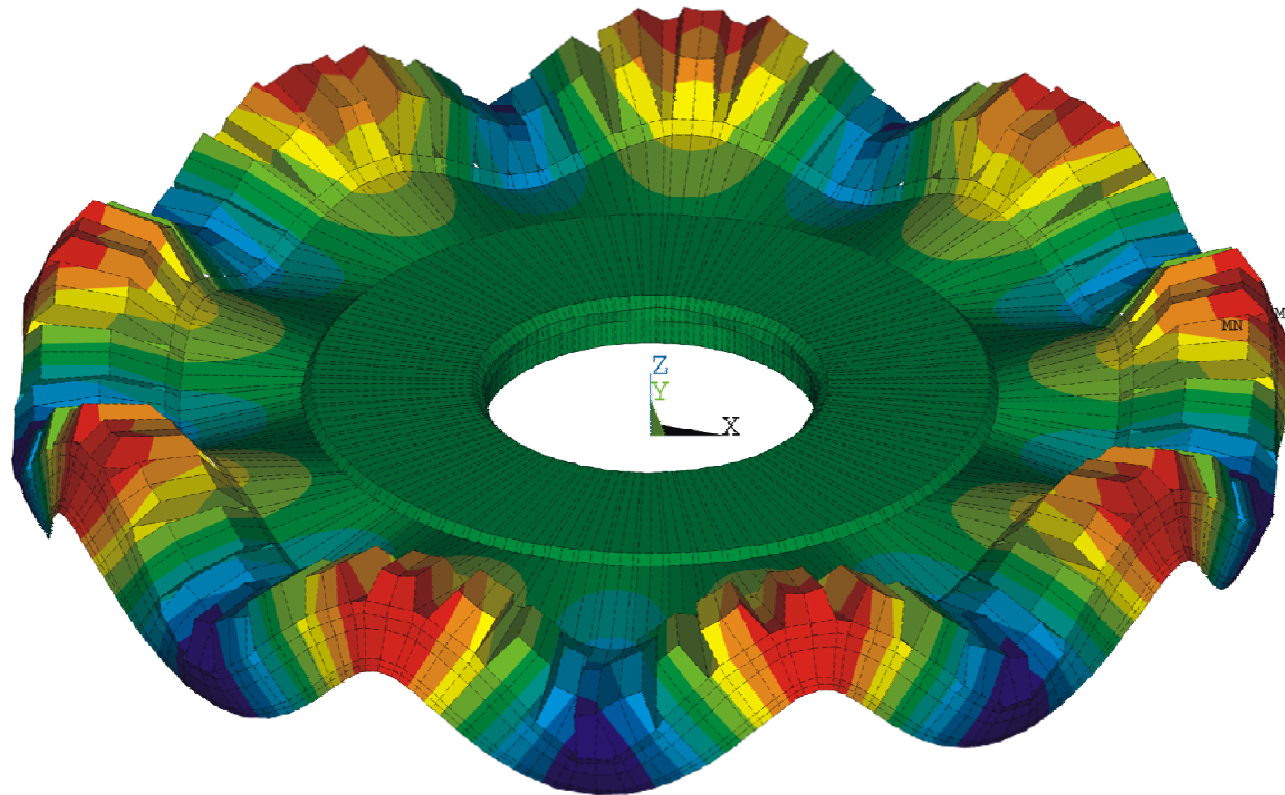


In Geräten treten eine Vielzahl von statischen und dynamischen Wechselwirkungen auf:

- **statische Beanspruchung** und die **für die Gerätefunktion erforderlichen dynamischen Beanspruchungen** werden oft bei der Dimensionierung berücksichtigt und sollen hier nicht betrachtet werden
- daneben sind jedoch auch **unerwünschte „kleine“ Bewegungen (Schwingungen)** vorhanden, die in den massebehafteten elastischen Systemen weitergeleitet werden und unter Anderem zu Geräuschen führen können. Diese werden hier behandelt.



Quelle: Shinsei



Quelle: IKFF

Ursachen mechanischer Schwingungen:

- **äußere Einflüsse**, wie beispielsweise
 - Schwingungsübertragung über die Aufstellfläche, das Fundament, das Gebäude
 - Einsatz in Fahrzeugen, Transport in Fahrzeugen
 - Luftbewegungen u. a.
- **innere Einflüsse**, wie beispielsweise
 - gewollte Bewegungsvorgänge im Gerät
 - Unwuchten rotierender Teile
 - Anregung von Resonanzen, Lauf in Resonanznähe
 - Fertigungsungenauigkeiten und Spiel in Übertragungssystemen u. a.

Auswirkungen von Schwingungen:

a) auf das Gerät

- in Form nicht vorhergesehener Materialbeanspruchungen, die zu einer **Verringerung der Lebensdauer** und der **Zuverlässigkeit** oder im Extremfall zur **Schädigung oder Zerstörung** führen können (z. B. bei Resonanzerscheinungen)
- in Form zusätzlicher **Verformungen**, die zu einer Beeinträchtigung der **Genauigkeit** und der **Gerätefunktion** selbst führen (z. B. Schwingungen in Elektromotoren, Rotoren, Turbinen)

b) auf das Umfeld (Umwelt)

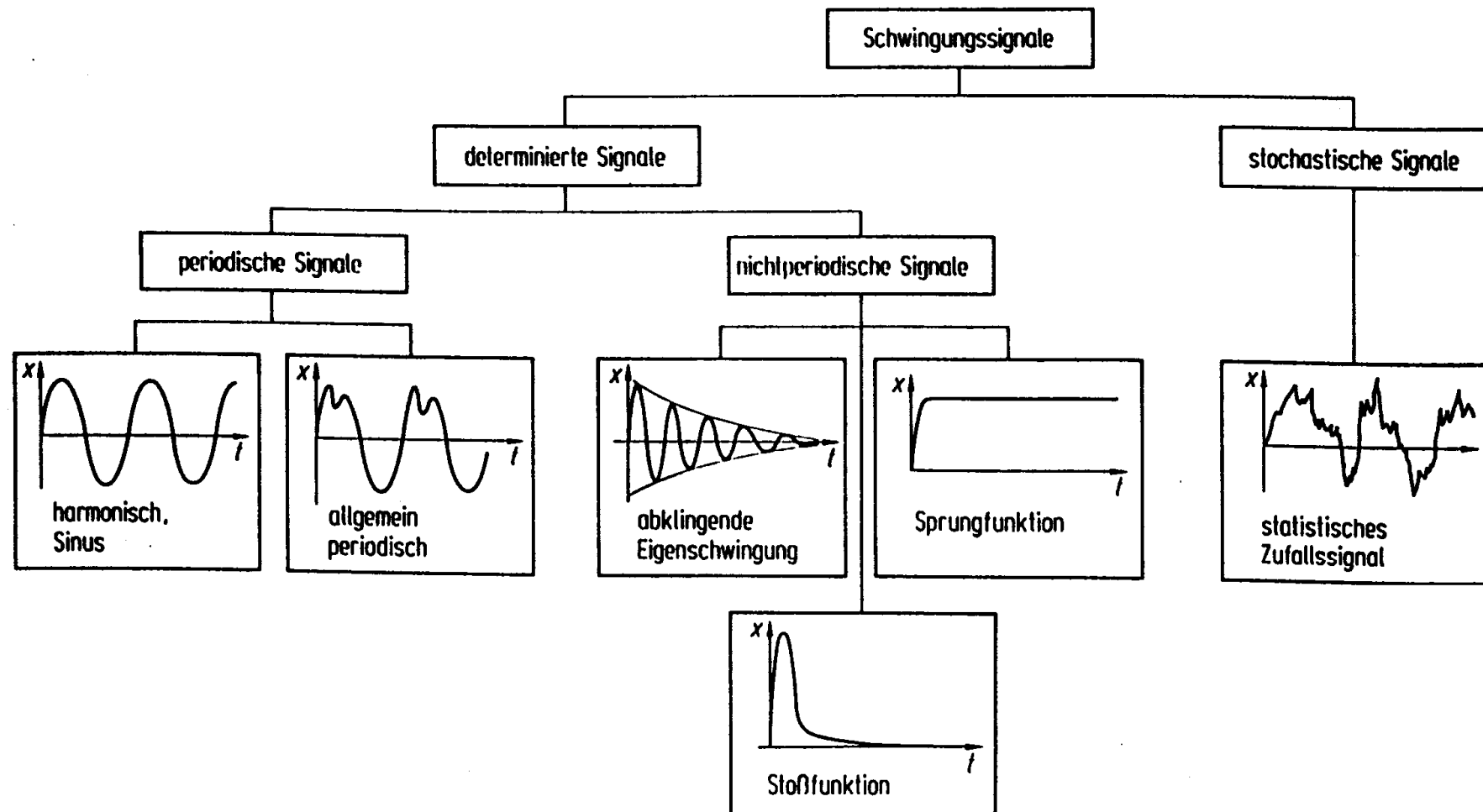
- in Form der Beeinträchtigung **anderer Geräte** (z. B. durch Schwingungsübertragung auf den Aufstellort)
- in Form von **Körperschall**, der zur **Geräuschabstrahlung** und u. U. als Lärm zur Beeinträchtigung des Menschen führt
- in Form einer direkten Schwingungsübertragung auf den **Menschen** als Ganzkörperschwingungen oder Hand-/Arm-Schwingungen, die akute oder chronische Gesundheitsschäden bewirken können.

Typisch auftretende Schwingungsformen:

- **periodische** (stationäre) Vorgänge, z. B.
 - harmonische Schwingungen
(differenzieren, integrieren führt wieder zu einer harmonischen Schwingung)
 - allgemeine periodische Signale
- **nichtperiodische** (nichtstationäre) Vorgänge, z. B.
 - Stöße
 - Sprungfunktionen
 - ab- oder aufklingende Schwingungen, z. B. An- und Auslaufvorgänge
- **stochastische** Signale

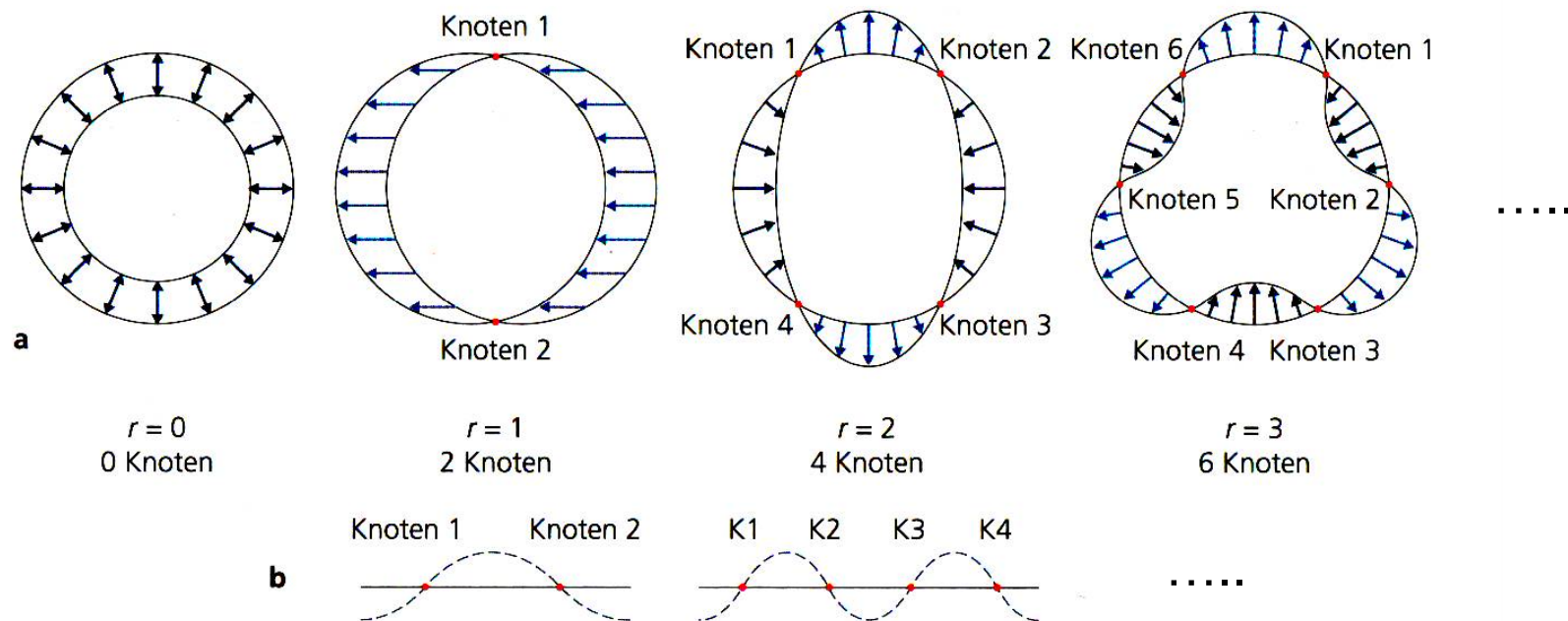
Übliche Schwingungsformen

(Dubbel: Taschenbuch Maschinenbau), aus /40/:



Kontinuierliche Systeme

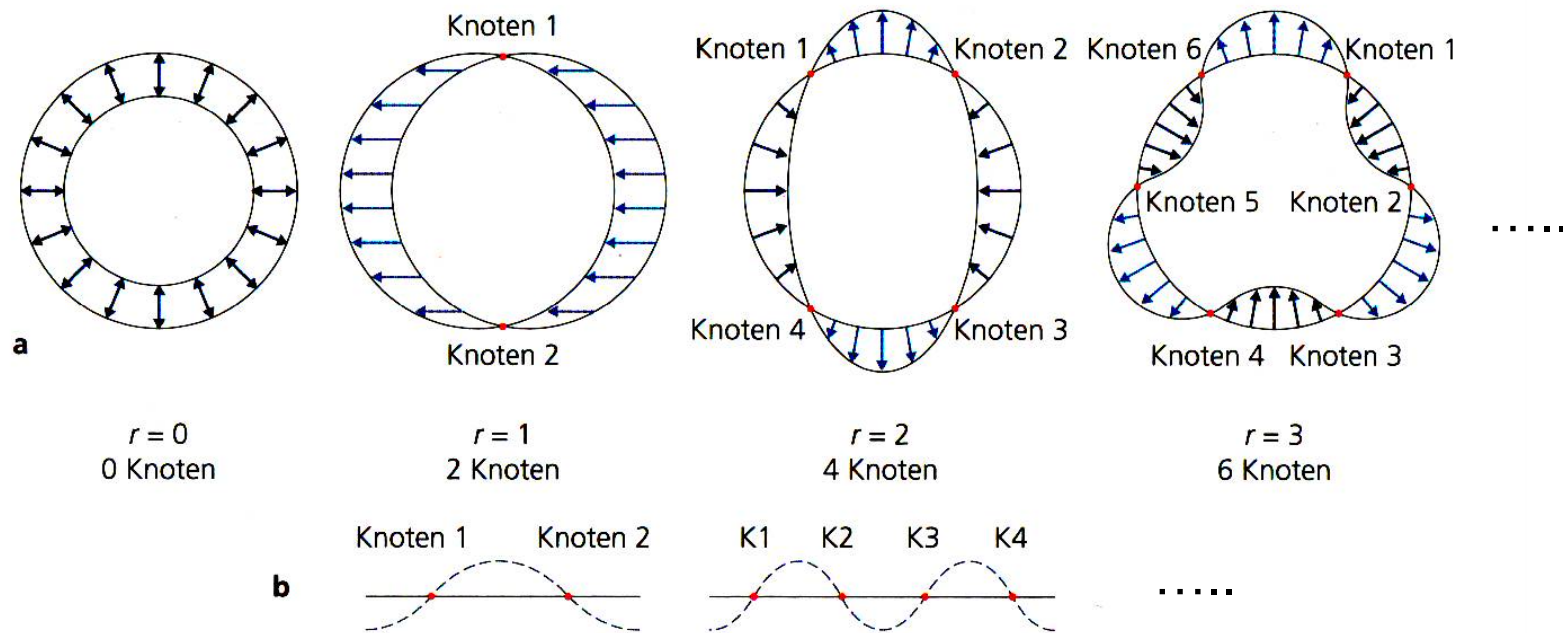
- sind mehrgliedrige Schwinger mit Gliedrigkeit unendlich,
- haben also viele Massen und Elastizitäten
- d. h. beliebig viele Eigenformen und Eigenfrequenzen höherer Art



Schwingungsmoden eines Kreisrings (a) und eines Balkens (b)

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe

Eigenformen

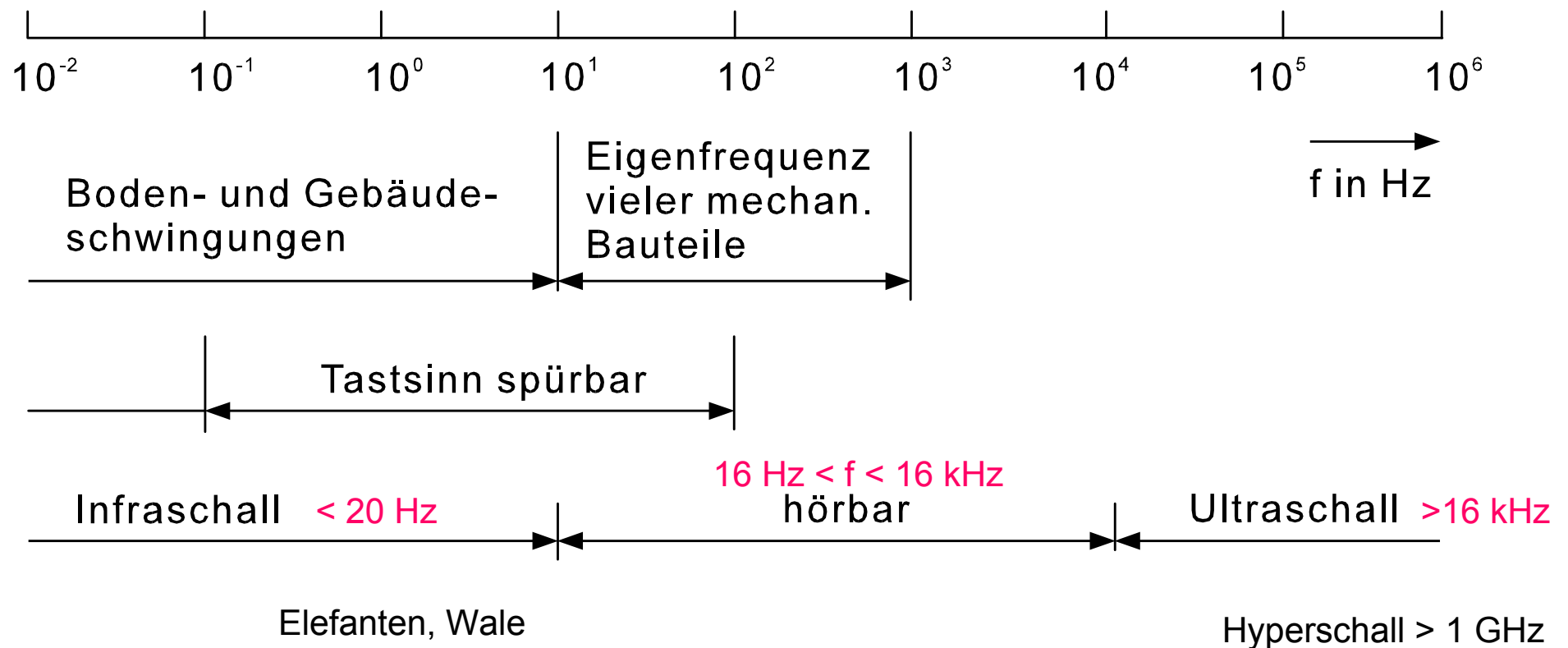


Schwingungsmoden eines Kreistrings (a) und eines Balkens (b)

Ordnungszahl = Modenzahl = Anzahl der Knoten / 2
entspricht Vielfachem der Grundschwingung

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe

Typische Frequenzen mechanischer Schwingungen



Typische Stoßbelastungen in Geräten

Belastungsart	Maximale Beschleunigung in g	Bemerkungen
Lochen (Stanzen)	10	Locher der EDV
Sondergeräte	100	Militärtechnik
Abdruck/Anschlag	1000 (100 ... 1000)	Typenhebel-Schreibmaschine, Mosaikdrucker
Belastbarkeit des Menschen	10	(zum Vergleich)
Prüfbelastung von Geräten und Elementen	15 bzw. 60	
Erdbeben	1	mittlere Stärke
Fundamentstöße	100	Stanzen, Schmieden, Rammen,
Metallische Schläge	10 000	Kolbenkompressoren
Stoßprüfmaschinen	500	
Beschleunigungsaufnehmer	20 000	

7.2 Grundlagen der Geräuscentstehung und -ausbreitung in Geräten



Geräusche und Lärminderung in der Feinwerktechnik:

- feinwerktechnische Geräte und -systeme sind im Allgemeinen weniger lärmintensiv als beispielsweise Werkzeugmaschinen oder Kfz
- gesundheitliche Grenzen werden selten überschritten
- allerdings sind feinwerktechnische Geräte üblicherweise in sehr geräuscharmer Umgebung eingesetzt (Büro, Wohnzimmer, Schlafzimmer)
- deshalb Geräuscentstehung auch für feinwerktechnische Geräte von Interesse

7.2.1 Kenngrößen des Schalls in seiner Ausbreitung



Kenngrößen des Schalls in seiner Ausbreitung:

Schall mit dem Gehör wahrnehmbare Schwingungen im Hörbereich **16 Hz bis 16 kHz** , mit

Luftschall (Schwingungen in Luft und Gasen),
Flüssigkeitsschall (Schwingungen in Wasser oder Öl)
Körperschall (Schwingungen in festen Körpern).

Lärm störendes Geräusch mit in der Regel hohem Pegel.

Ausbreitungsursache für den Schall ist das Vorhandensein schwingungsfähiger Systeme in Form von

- Luftteilchen und ihrer Kompressibilität
- Massen und Elastizitäten in festen Körpern bzw.
- massebehafteter elastischer Flüssigkeiten.

Kenngrößen von Luftschall

(Luftteilchen schwingen um ihre ortsfeste Ruhelage, es wird keine Strömung betrachtet):

Schallschnelle v Schwinggeschwindigkeit der Teilchen, i. A. vergleichsweise niedrig. Bewegungsamplituden der Schwingungen im Mikrometerbereich.

$$v = v_a \cos(\omega t + \psi_0) = dx/dt$$

Dem statischen, atmosphärischen Luftdruck wird dadurch ein Wechseldruck, der

Schalldruck p als die wichtigste, auch messtechnisch erfassbare Größe überlagert

$$p = p_a \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Kenngößen von Luftschall

Betrachtet werden zunächst nur die Effektivwerte der Summe aller Schalldruckanteile der verschiedenen Frequenzen

als (Gesamt-)Schallschnelle v

Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit der Teilchen

als (Gesamt-)Schalldruck p

Effektivwert des Schalldruck

Kenngößen von Luftschall

Schallgeschwindigkeit c als Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Kugelwelle von der Quelle (longitudinale Schwingung).

Beispielsweise ist der Schalldruck in Raum und Zeit

$$p(x,t) = p_a \cos (x/\lambda - \omega t - \varphi)$$

Schallgeschwindigkeit in Luft von $c = 340 \text{ m/s}$.

Wellenlänge	bei 20 Hz	17,2 m
	bei 1 kHz	34,3 cm
	bei 16 kHz	2,1 cm

(Körperschallgeschwindigkeit in Metallen 6.000 m/s)

Impedanz Z (Schallwellenwiderstand)

$$Z = \frac{\underline{p}}{\underline{v}},$$

ist komplexe Größe, wegen der Schwingungen.

Z wird auch als Feldimpedanz oder Schallkennimpedanz bezeichnet.

Schallschnelle v und Schalldruck p werden durch Betrag und Phasenlage charakterisiert, so dass die Impedanz Z einen komplexen Wellenwiderstand darstellt.

In **Luft** gilt bei nicht vorhandener Dämpfung

$$Z_o = \frac{p}{v} = \rho \cdot c = 408 \frac{Ns}{m^3}$$

für die **Kennimpedanz Z_o** als realer Wert bei vorgegebener Dichte ρ der Luft und Schallgeschwindigkeit in Luft von $c = 340 \text{ m/s}$.

Schalldruck p als Wechseldruck bewirkt einen Geräuscheindruck beim Menschen in Abhängigkeit:

- vom Abstand von der Quelle
- von der Richtcharakteristik der Quelle
- von der Raumgröße und Beschaffenheit.

Körperschall:

häufig entsteht ein Luftschall nicht direkt, sondern zunächst wird Körperschall angeregt, der sich über mechanische Strukturen des Gerätes ausbreitet und dann von bestimmten Bauteilen bzw. Elementen als Luftschall abgestrahlt wird.

Für Körperschall gilt:

mechanische Impedanz

$$z = \frac{F}{v} \quad \left[\frac{Ns}{m} \right]$$

bzw.

mechanische Admittanz

$$h = \frac{1}{z} = \frac{v}{F} \quad \left[\frac{m}{Ns} \right]$$

Diese beiden komplexen Größen kennzeichnen den möglichen Anregungsmechanismus in Form von Kraft- oder Geschwindigkeitsanregung.

Im Gegensatz zu sich kugelförmig als Longitudinalwelle ausbreitenden Luftschall schwingen Teilchen in festen Körpern in allen Schwingungsformen (Longitudinal-, Transversal- oder Torsionswellen).

Wahrnehmbarkeitsgrenzen des Menschen:

Hörschwelle (bei einer Frequenz von 1 kHz)

$$\tilde{p}_{HS} = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20 \mu\text{Pa} = p_0$$

dient als **Bezugsschalldruck** p_0 . (v_0 in Luft ist dann $50 \cdot 10^{-9}$ m/s; $x_0 = 11 \cdot 10^{-12}$ m)

Schmerzgrenze

$$\tilde{p}_{SG} = 2 \cdot 10^2 \mu\text{bar} = 20 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20 \text{ Pa} .$$

(v_{SG} in Luft ist dann 50 mm/s; $x_{SG} = 11 \mu\text{m}$)

Die Spannweite zwischen Bezugsschalldruck (Hörschwelle) und Schmerzgrenze beträgt **sechs Zehnerpotenzen**.

Vergleich: Atmosphärischer Luftdruck ca. 1 bar, normale Sprache ca. 1 μbar !

Schalldruckpegel L_p (zur besseren Handhabung des großen Dynamikumfangs) :

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_o^2} \right) dB$$

bzw.

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_o} \right) dB$$

Schalldruckpegel L_p :

Eignet sich zur Beschreibung des auf das Ohr einwirkenden Schalls, unabhängig von Ursache.

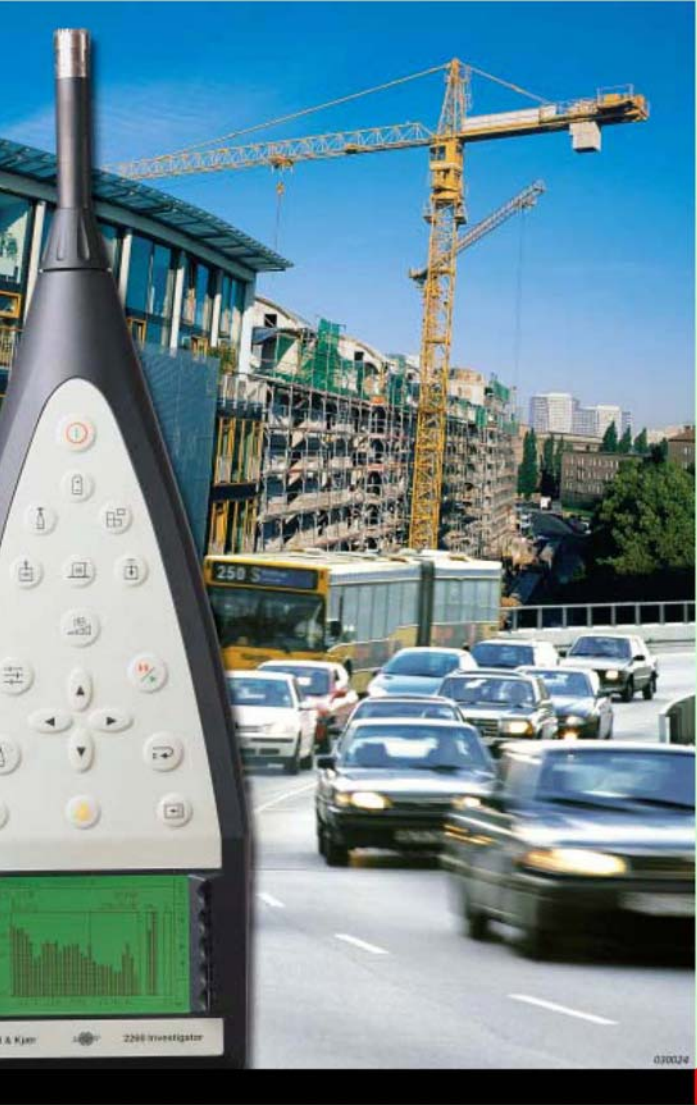
Maßeinheit ist Dezibel (dB; Bel für lg; 0,1 lg).

Hörschwelle entspricht nun 0 dB,
Schmerzgrenze 120 dB,
Dynamikumfang bei einem kHz damit 120 dB.

Schalldruckpegelmessung

DATEN UND FAKTEN

**Modul-Schallanalysator — 2260 Investigator™
mit Schallanalyse-Software BZ 7206 und BZ 7210**



Der 2260 Investigator™ ist ein handgehaltener, programmierbarer Schallanalysator. Sein eingebettetes Betriebssystem gleicht der PC-Architektur und ist eng mit einem digitalen Signalprozessor (DSP) und Signalkonditionierung für zwei Mikrofonkanäle integriert. Damit stellt er eine vielseitige Plattform für hochwertige Schallanalysen in Echtzeit dar.

Wie beim PC wird Anwendungssoftware für verschiedene Aufgabenstellungen in den 2260 Investigator geladen. Die Basis-Schallanalyse-Software BZ 7210 wird mit dem 2260 Investigator geliefert und verwandelt ihn in einen Präzisions-Schallpegelanalysator. Weitere Anwendungen sind:

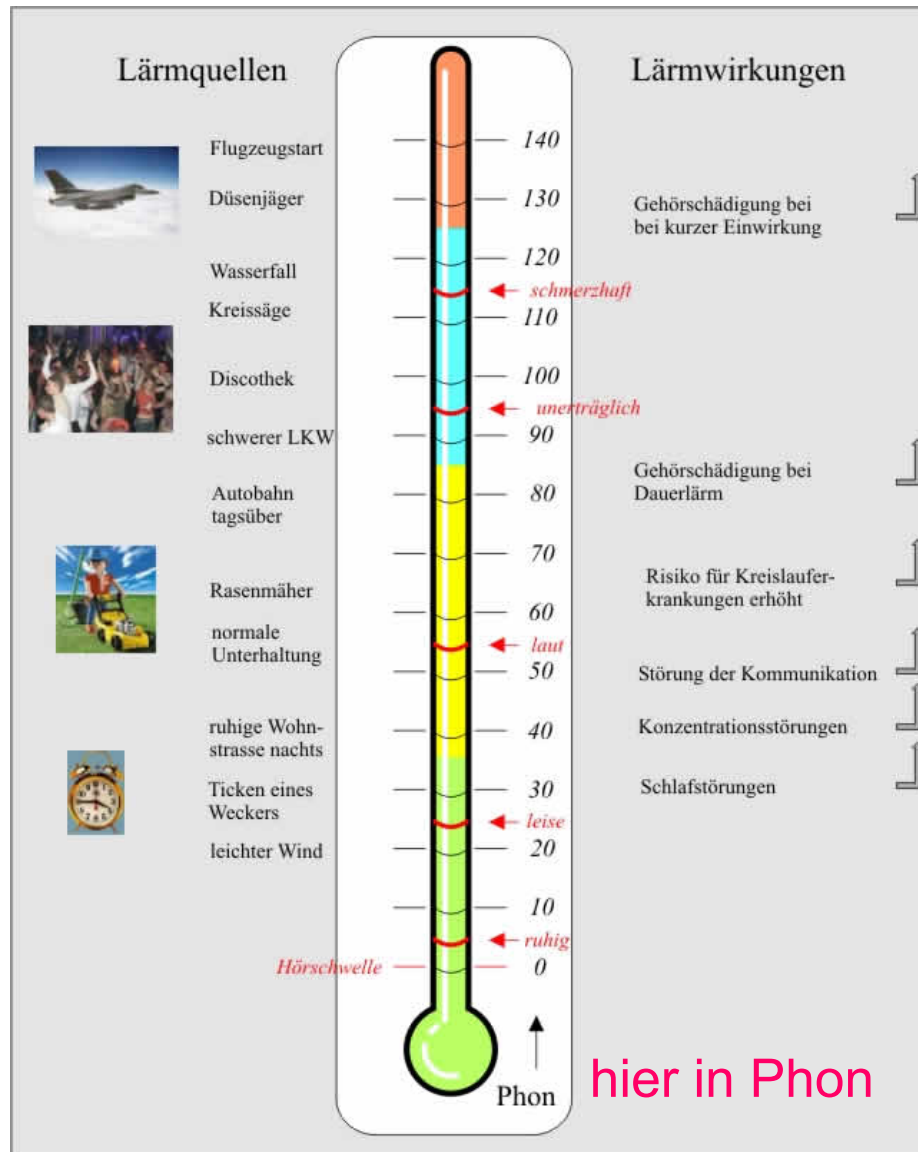
- Lärmprofile (BZ 7203)
- Bauakustik (BZ 7204)
- Schallintensität (BZ 7205)
- Erweiterte Schallanalyse (BZ 7206)
- Raumakustik (BZ 7207)
- FFT-Analyse (BZ 7208)

Mit seiner Kombination aus hochwertiger Hardware und spezieller Anwendungssoftware ist der 2260 Investigator weiterhin das Spitzenprodukt unter den handgehaltenen Schallanalysatoren.

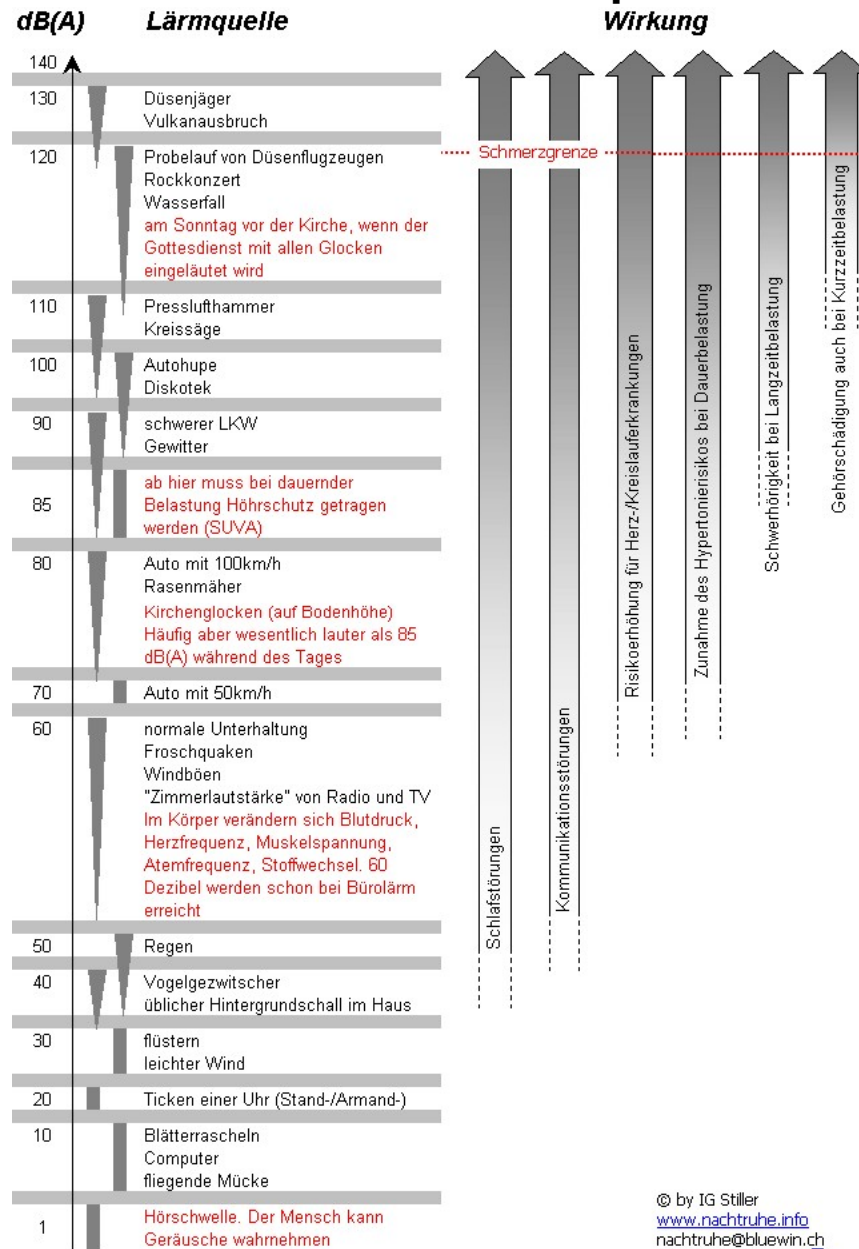
2260/BZ 7206/BZ 7210

Brüel & Kjær 

Geräuschempfinden und Wirkung, aus /40/:



Geräuschempfinden und Wirkung, aus /40/:



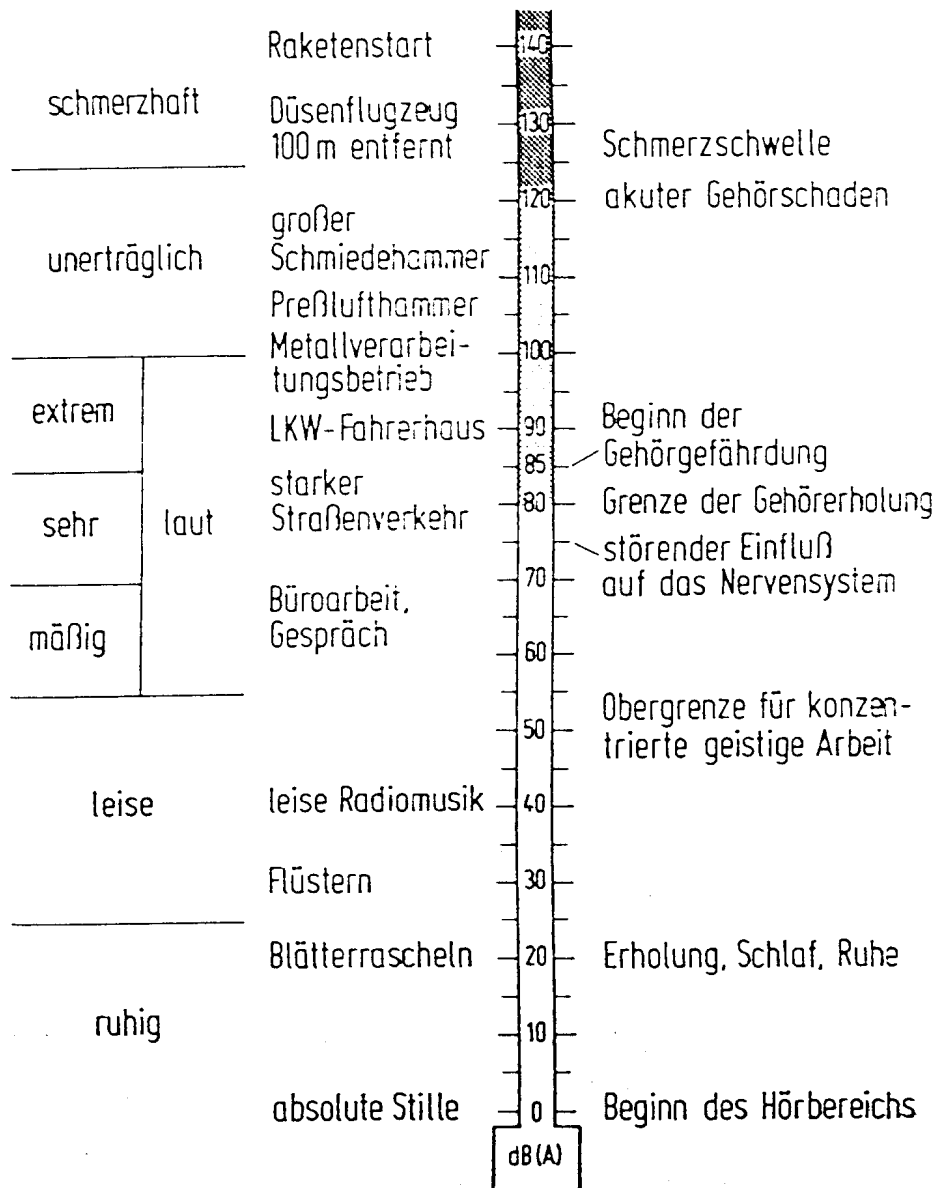
© by IG Stiller
www.nachtruhe.info
nachtruhe@bluewin.ch



Institut für Konstruktion und Fertigung
 in der Feinwerktechnik
 Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Geräuschmessung

Geräuschempfinden und Wirkung, aus /40/:



Das **Ohr empfindet logarithmisch:**

- 10 dB Erhöhung werden als Verdopplung des Schalldruckpegels wahrgenommen.
- Normale Sprache liegt bei einem Schalldruck von 1 μbar , d. h. das Ohr löst ein Millionstel des Luftdruckes noch fein auf.

Schalldruck ist nur in Verbindung mit Entfernungs- und Richtungsangaben zur Kennzeichnung einer Geräuschquelle aussagefähig, da die Höhe des Pegels vom Abstand von der Quelle, deren Richtcharakteristik und dem umgebenden Raum abhängt.

Deshalb sind weitere Kenngrößen zur Charakterisierung der Schallemission von Geräten nötig.

Schallleistung P

$$P = p \cdot v \cdot A = F \cdot v$$

bzw. der **Schallleistungspegel**

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_o} \text{ dB} \quad ,$$

wobei die Bezugsschallleistung $P_o = 10^{-12} \text{ W}$ eine Leistung kennzeichnet, die auf einer Kugelhüllfläche von 1m^2 gerade einen Schalldruck $p_o = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$, also die Hörschwelle, erreicht.

Schalleistung bzw. **Schalleistungspegel** stellen einen objektiven und damit vergleichbaren Wert als maschinenspezifische Größe dar. Diese hängen nicht von den Messbedingungen und vom Umfeld ab, sind jedoch auch nicht direkt messbar.

Ermittlungen des Schalleistungspegels durch Messung und Mittelwertbildung der Schalldruckpegel auf Hüllflächen im Messabstand r zur Quelle.

Beispielsweise gilt für eine Hüllhalbkugel

$$L_W = \bar{L}_p + 20 \lg \left(\frac{r}{r_g} \right) dB + 8 dB$$

mit $r_g = 1\text{m}$ als Bezugsgröße.



Typische Schallleistungen

Geräuschquelle	Schallleistung	Schallleistungspegel
Blätterrauschen	10^{-9} W	30 dB
Büro	10^{-6} W	60 dB
normale Unterhaltung	10^{-5} W	70 dB
lautes Radio	0,1 W	110 dB
großes Orchester	10 W	130 dB
Stahltriebwerk	100 000 W	170 dB
Rakete	40 000 000 W	196 dB

Schallintensität / als Vektorgröße (auch Schallstärke)

$$I = \frac{P}{A} = p \cdot v$$

Leistung $P = p \cdot v \cdot A = F \cdot v$

auf die Fläche bezogene Leistung als Effektivwert der Summe der der Anteile. $I_{eff} = I = \sqrt{\sum I_{eff}^2}$; *eigentlich gilt wieder $i(t) = p(t) * v(t)$*

Die Schallintensität ist ein Vektor, damit lassen sich Geräusche gerichtet bewerten und Fremdgeräusche, die in eine Hüllfläche hinein und wieder herausgehen, eliminieren.

Schallintensitätspegel L_I , (auch Schallstärkepegel oder Schallpegel)

$$L_I = 10 \lg \left(\frac{|I|}{I_0} \right) db$$

Schallintensitätsmessung als Vektorgröße

Handgehaltenes Schallintensitätssystem
(2260 Investigator und Intensitäts-Software BZ 7205 — Typ 2260E
und Schallintensitätssonden-Kit für 2260 — Typ 3595)



Mit dem handgehaltenen Schallintensitäts-System kann eine Person alle Schritte der Schallintensitätsmessung einfach und sicher durchführen. Die leistungsfähige Kombination aus 2260 Investigator™, der Software BZ 7205 und dem Schallintensitätssonden-Kit Typ 3595 ermöglicht Intensitätsmessungen für Schalleistung, Schallquellenortung und Schalldämmung. Automatische Meßanleitung und akustisches Feedback gestatten, sich bei der Messung auf das perfekte Scannen der Meßfläche zu konzentrieren. Das System liefert Vor-Ort-Analysen von Schalleistung und Schalldämmung und stellt eine der vielen Anwendungsmöglichkeiten der 2260 Investigator Plattform dar.

2260

Brüel & Kjær

Weitere Schallfeldkenngrößen zur Geräuschbeurteilung:

Neben den genannten physikalischen Kenngrößen des Schallfeldes

- **Psychoakustische Größen** (Hörwahrnehmung)
Lautheit in sone
Tonalität in tu
Rauigkeit in asper
Schärfe in acum
als lineare Größen (auch für Qualitätssicherung, Erkennung von
Änderungen in der Fertigung)
- **Psychologische Größen** (Hörbewertung)
Musik oder Lärm, was erwarte ich?

7.2.2 Rechnung mit Pegelgrößen



Die **Rechnung mit Pegelgrößen** ist etwas ungewohnt, Tafel 7.3 verdeutlicht deshalb Addition, Subtraktion und Mittelwertbildung von Pegeln.

Einprägsame Ergebnisse von Pegelrechnungen beispielsweise:

1. Zwei gleiche Quellen führen zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels um 3 dB, 10 gleiche Quellen um +10 dB, 100 gleiche Quellen um +20 dB
2. Die Addition eines um 6 dB geringeren Pegels führt lediglich zu einer gerade noch wahrnehmbaren Gesamtpegelerhöhung von +1 dB. Maßnahmen zur Lärminderung sind also nur an der stärksten Geräuschquelle sinnvoll!
3. Subjektiv wird eine Erhöhung des Pegels um 10 dB als Lautstärkeverdopplung empfunden. Es liegt jedoch eine 10fache Schallenergie vor.

Rechnung mit Pegelgrößen, aus /38/

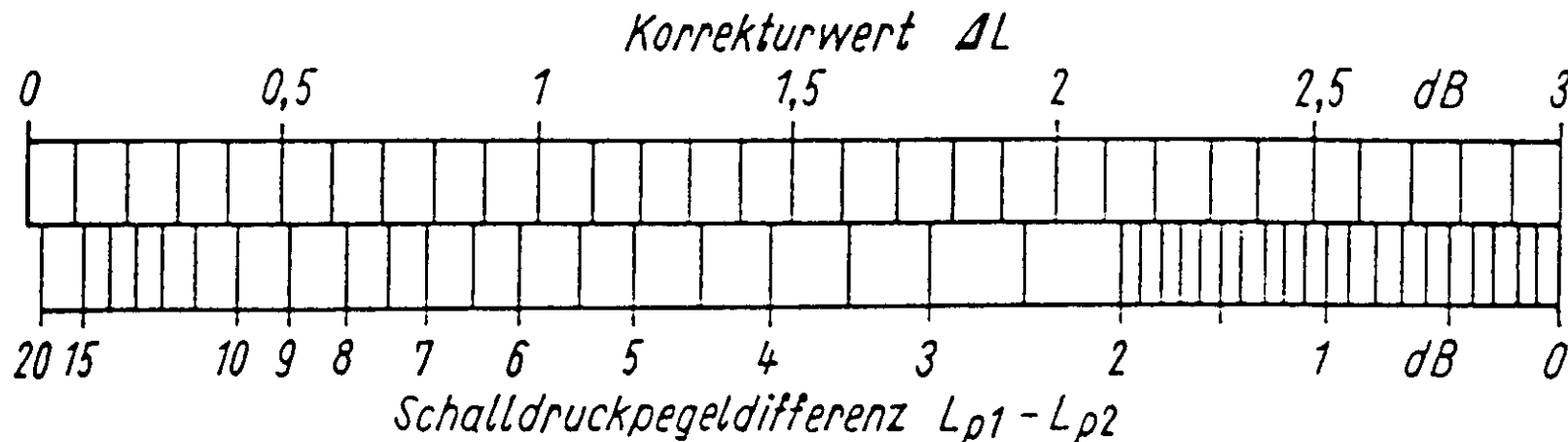
1. **Pegeladdition** (bei Überlagerung mehrerer inkohärenter Schalldrücke zur Bestimmung des Gesamtpegels)

$$L_{\text{p ges}} = 10 \lg \left(\sum_{v=1}^n \frac{p_v^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 10 \lg \left(\sum_{v=1}^n 10^{\frac{L_{pv}}{10}} \right) \text{ dB}.$$

Vereinfachtes Verfahren: Für zwei Schalldrücke gilt

$$L_{\text{p ges}} = 10 \lg 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \left(1 + 10^{-\frac{L_{p1} - L_{p2}}{10}} \right) \text{ dB} = (L_{p1} + \Delta L) \text{ dB}.$$

Bestimmung von ΔL aus nachstehendem Nomogramm:

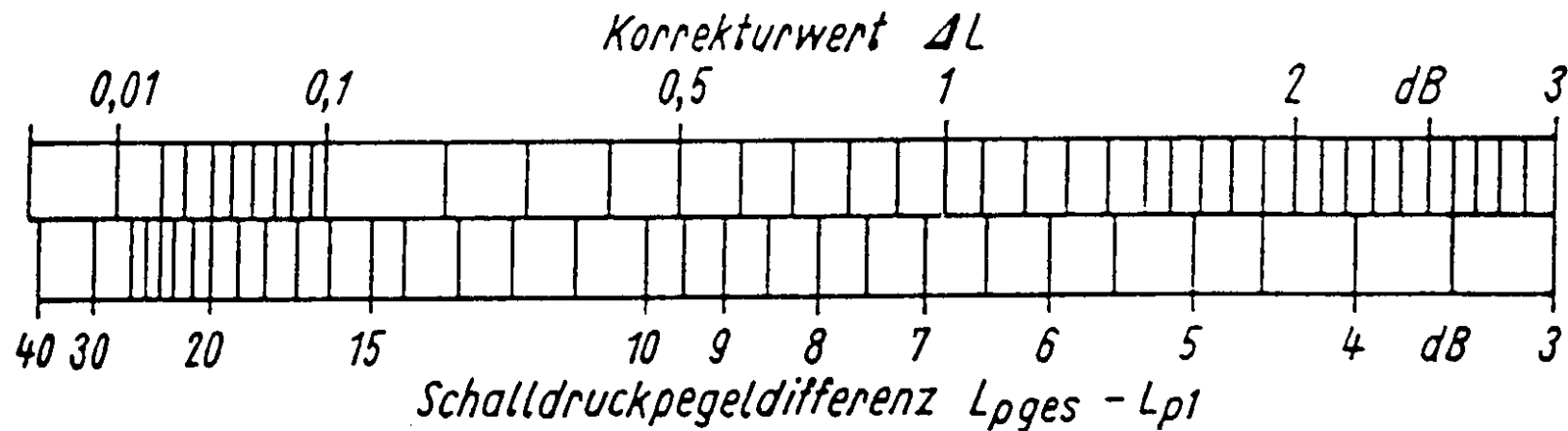


2. **Pegelsubtraktion** (zum rechnerischen Ausschalten eines unerwünschten Anteils, z. B. des Störpegels), Rechnung analog Addition.

Vereinfachtes Verfahren:

$$L_{p2} = \left[L_{p_{ges}} + 10 \lg \left(1 - 10^{-\frac{L_{p_{ges}} - L_{p1}}{10}} \right) \right] \text{ dB} = (L_{p_{ges}} - \Delta L) \text{ dB}.$$

Bestimmung von ΔL aus nachstehendem Nomogramm:



3. Mittelwertbildung mehrerer (inkohärenter) Pegel

$$L_{\text{pm}} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n \frac{p_v^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n 10^{\frac{L_{pv}}{10}} \right) \text{ dB}.$$

Näherungsformel, wenn die Differenz der einzelnen Pegel kleiner als 10 dB ist:

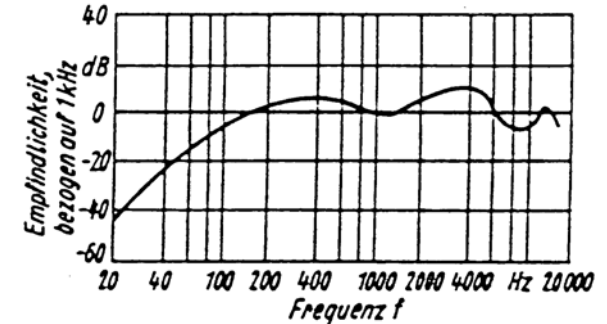
$$L_{\text{pm}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n L_{pv} \text{ dB}.$$

7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung durch den Menschen



Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung durch den Menschen:

Lautstärkeeindruck innerhalb des Hörbereiches von 16 Hz ... 16 kHz stark frequenzabhängig:



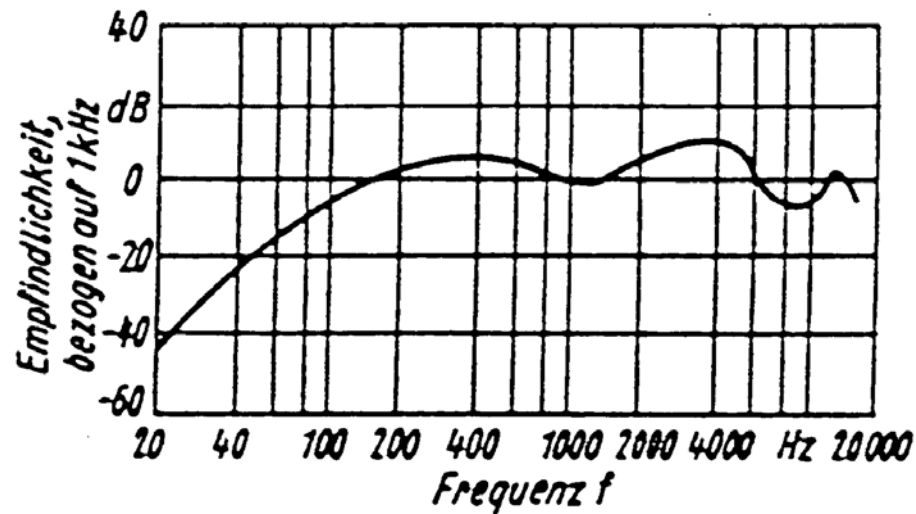
- **Maximale Empfindlichkeit** des Menschen im Frequenzbereich von 2 bis 5 kHz. Höchste Empfindlichkeit bei ca. 4 kHz
- Abnahme der Empfindlichkeit zu tiefen Frequenzen hin bis zu -50 dB bei 20 Hz
- Abnahme der Empfindlichkeit zu höheren Frequenzen hin bis zu -20 dB bei 8 kHz

Drastische subjektive Einflüsse müssen bei der Erfassung der Schallkenngrößen berücksichtigt werden. Dazu frequenzabhängige Bewertungen (Filterung) entsprechend dem menschlichen Hörvermögen nachempfunden.

Umsetzung als sogenannte **A-Bewertung**:

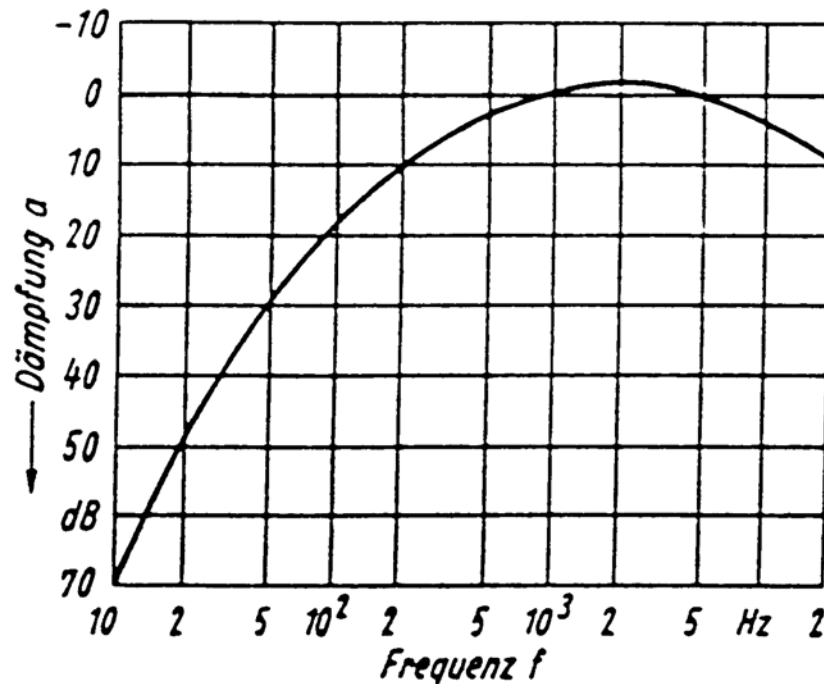
A-bewertete Schalldruckpegel L_{pA}

- Ziel ist **nicht** eine möglichst gute Annäherung an das menschliche Hörvermögen, sondern eine reproduzierbare Angabe einer Filter- bzw. Bewertungskurve
- daneben weitere Bewertungskurven, z. B. *d* für Fluglärm



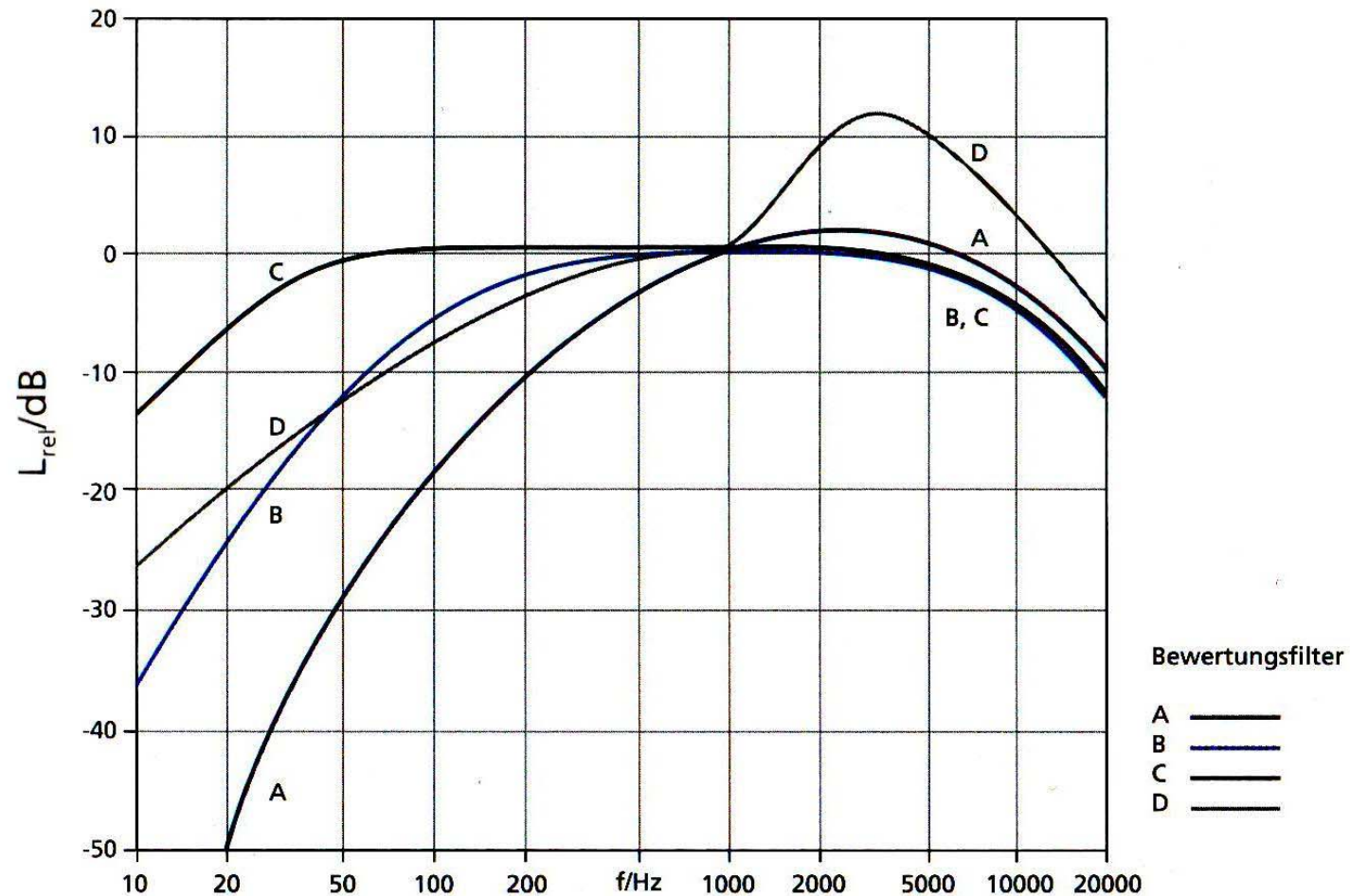
Frequenzempfindlichkeit und -bewertung, aus /38/

oben: Hörempfindlichkeit des Menschen



unten: Frequenzbewertungskurve A nach DIN IEC 651

Weitere Frequenzbewertungskurven nach DIN IEC 651



D Flugzeuglärm

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Abschnitt 7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung

Einfluss der Frequenzbewertung

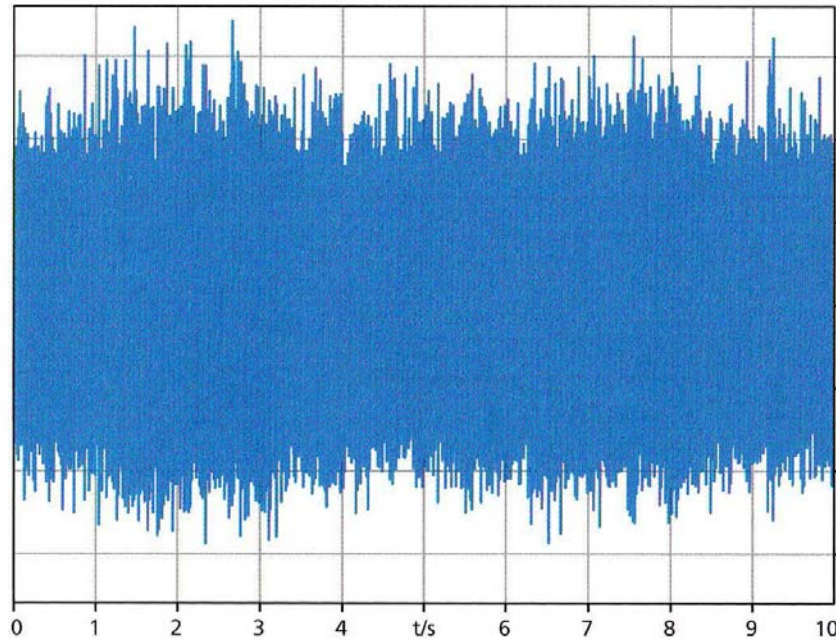


Abb. 5.3: Zeitlicher Verlauf eines Geräuscheignisses

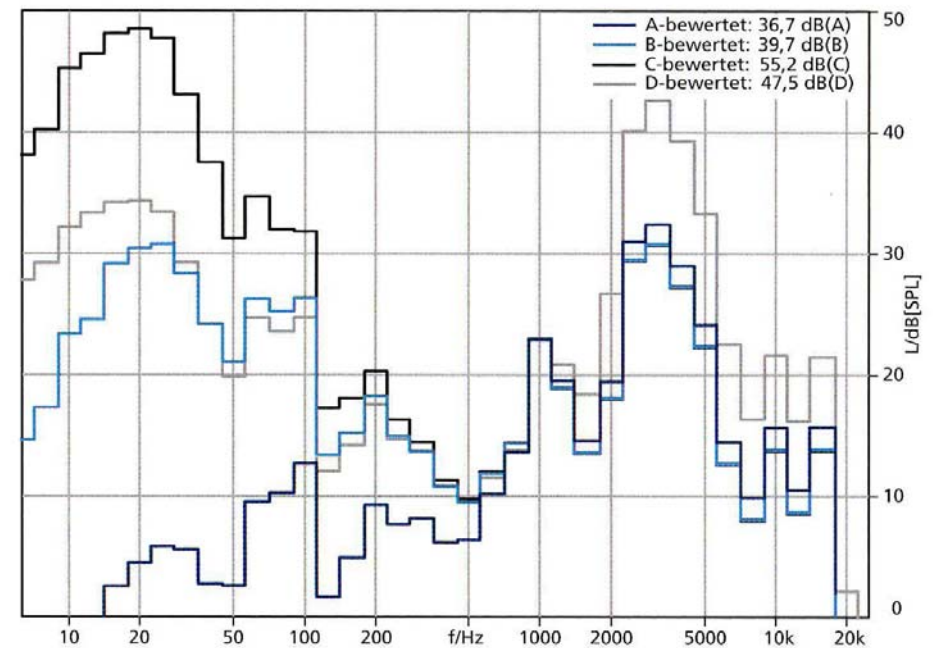


Abb. 5.4: Einfluss von Bewertungskurven auf die Terzanalyse eines Signals (16 Hz bis 20 kHz)

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

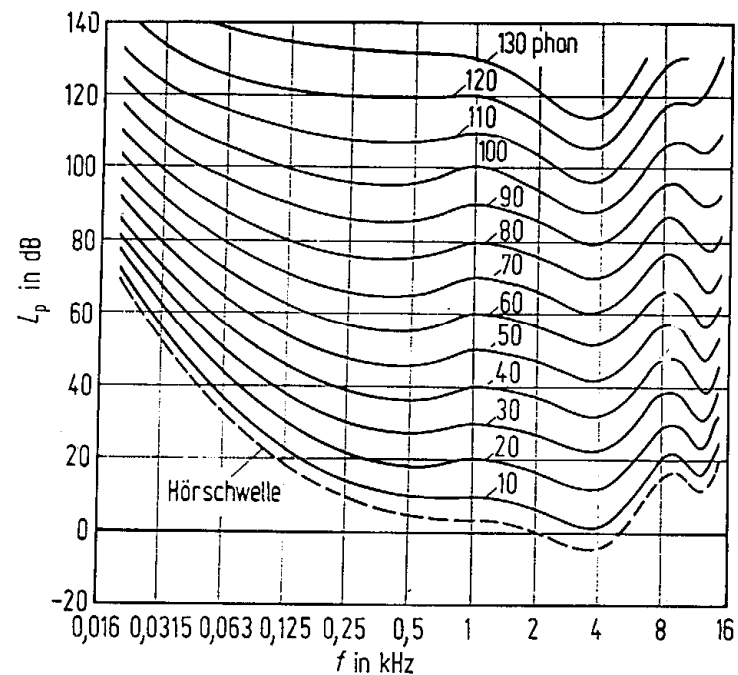
Abschnitt 7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung

Frequenzbewertung über den Lautstärkepegel L_N in Phon

Nur für subjektive Hörvergleiche

Nur bei 1 kHz gilt L_N in Phon = L_p in dB, sonst Umrechnung:

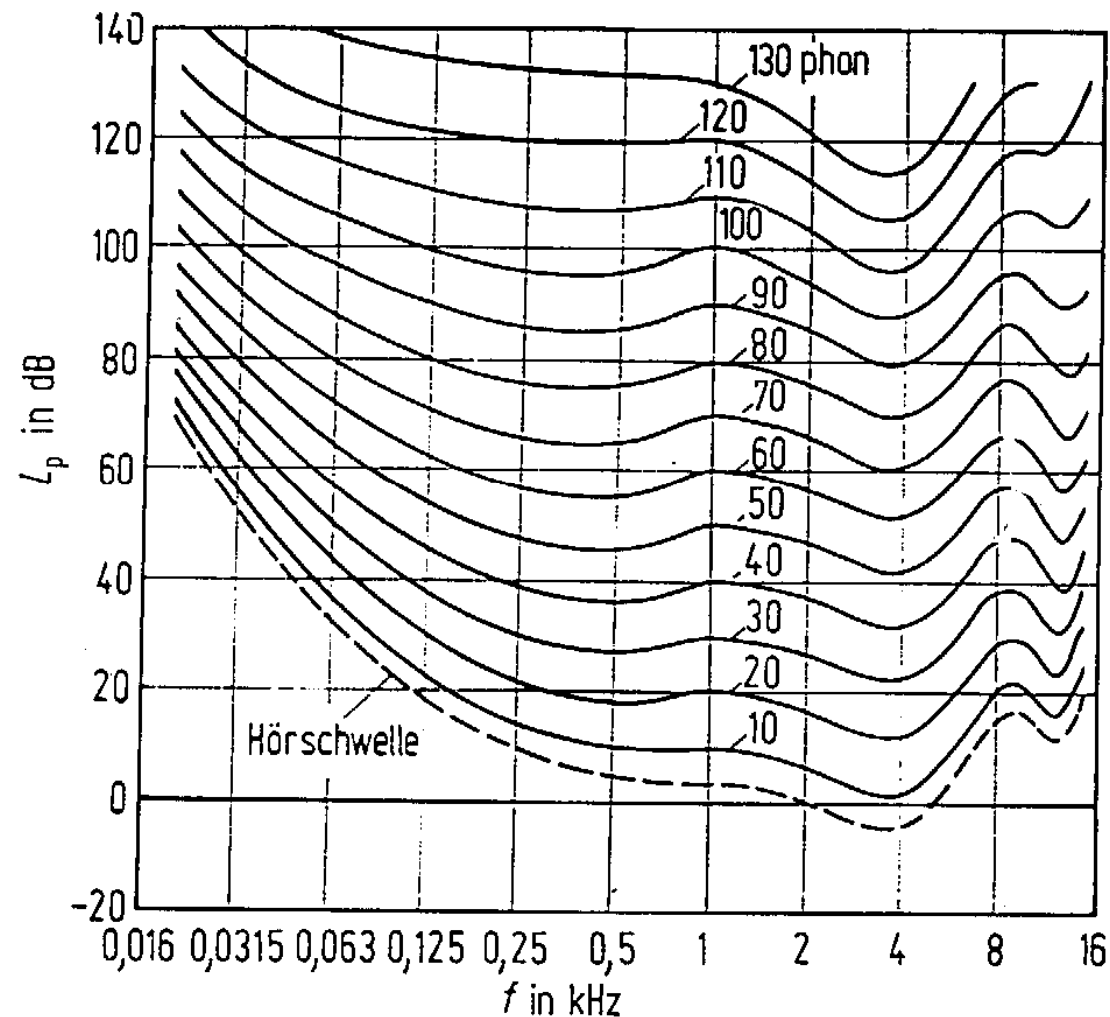
Normalkurven gleicher Lautstärke und Bewertungskurven (Dubbel-Taschenbuch Maschinenbau)



Normalkurven gleicher Lautstärke (DIN 46630 Bl. 2)

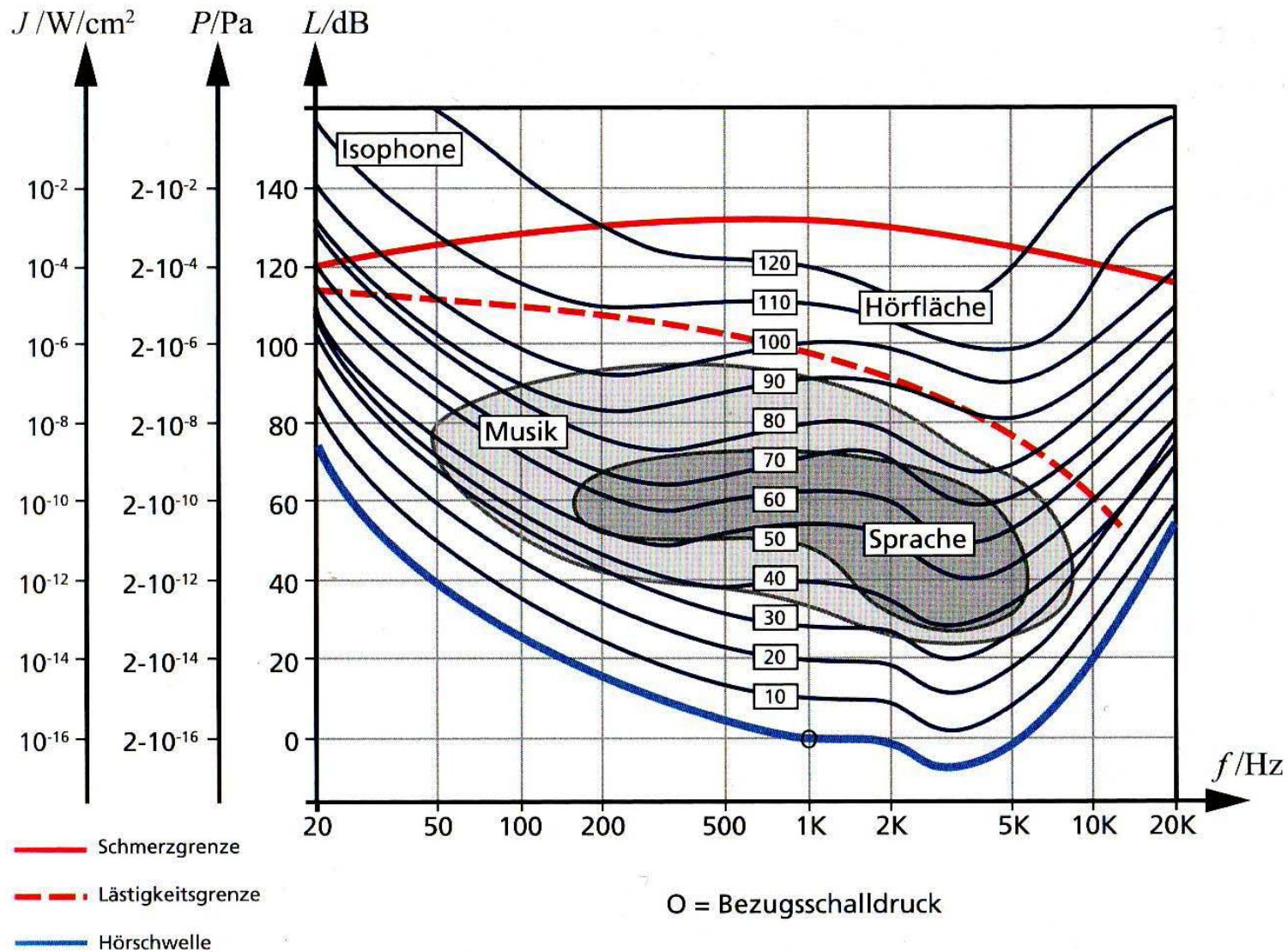
28

Normalkurven gleicher Lautstärke und Bewertungskurven (Dubbel-Taschenbuch Maschinenbau)



Normalkurven gleicher Lautstärke (DIN 46630 Bl. 2)

Normalkurven gleicher Lautstärke und Grenzkurven



Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Abschnitt 7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung

7.2.4 Mess- und Auswerteverfahren



7.2.4.1 Vorbemerkungen



Zwei prinzipiell **verschiedene Messaufgaben**:

- **Emission** einer Schallquelle ermitteln (**Geräuscherzeugung**)
- **Immission** auf den Menschen ermitteln (**Lärmeinwirkung**)

Zwei prinzipiell **verschiedene Messaufgaben**:

- **Emission** einer Schallquelle ermitteln (**Geräuscherzeugung**)
- **Immission** auf den Menschen ermitteln (**Lärmeinwirkung**)

Messung der **Emission** der Schallquelle als

- **abgestrahlte Schalleistung L_{WA}** (berechnet aus gemessenen Schalldrücken) oder
- **arbeitsplatzbezogenem Emissionswert L_{pAem}** (in Ohrnähe am Arbeitsplatz)

Zwei prinzipiell **verschiedene Messaufgaben**:

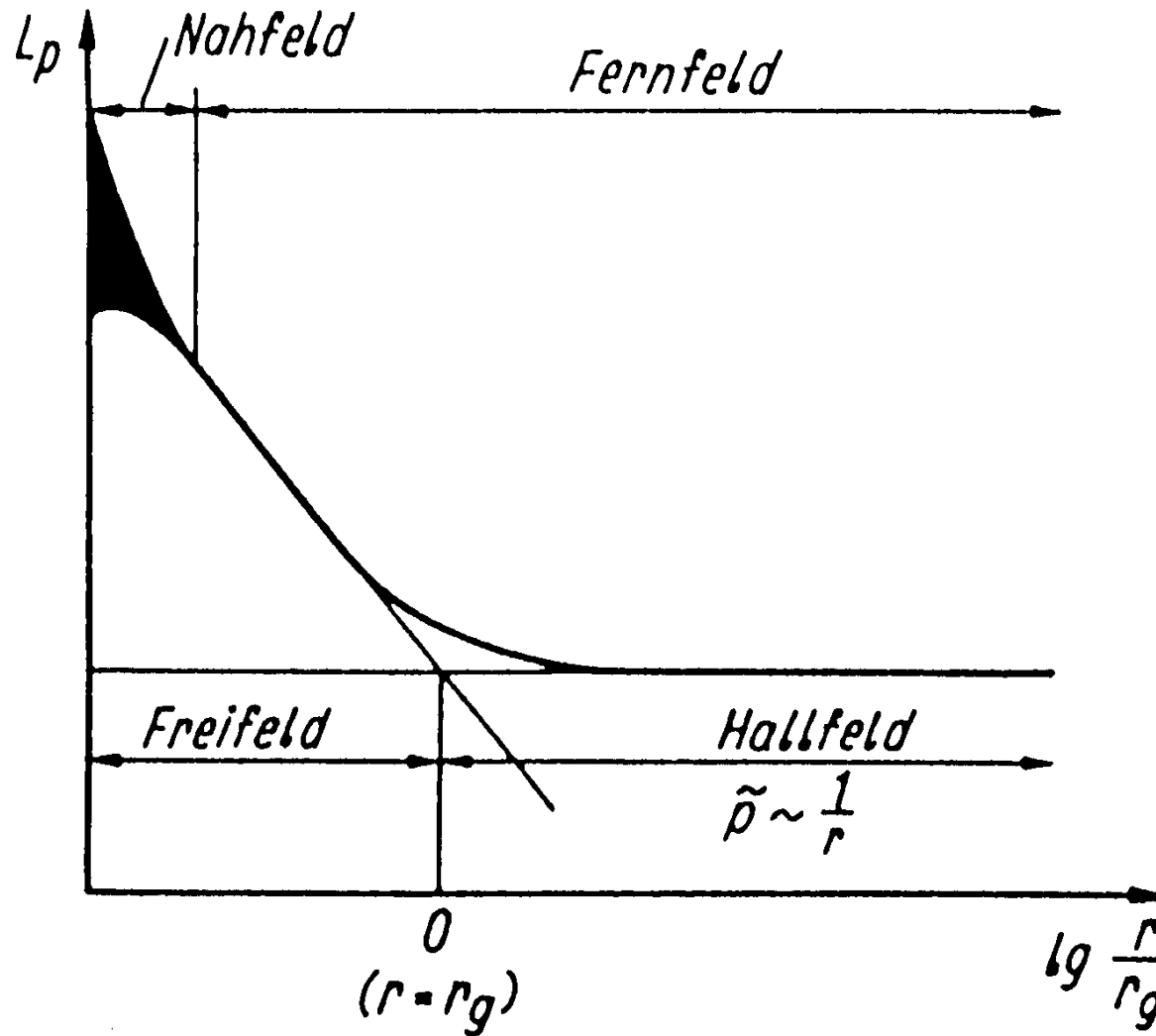
- **Emission** einer Schallquelle ermitteln (**Geräuscherzeugung**)
- **Immission** auf den Menschen ermitteln (**Lärmeinwirkung**)

Messung der **Immission** auf den Menschen

- als **A-bewerteter Schalldruckpegel** L_{pA} oder
- als weiter verarbeiteter **Beurteilungspegel** L_r
(vgl. Abschnitt 7.2.5).

Für die Geräteanalyse werden weitere Messgrößen genutzt.

Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle, aus /38/



Abstandsgesetze:

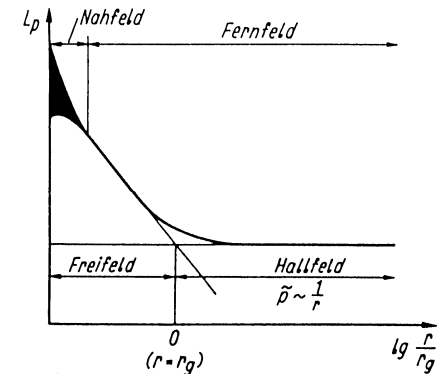
für Feldgrößen $\sim 1/r$
(Schalldruck-, Schallschnelle)

für Energiegrößen $\sim 1/r^2$
(Schalleistung)

für Pegelgrößen
- 6dB bei Verdopplung des
Abstandes

Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle

- a) Die **Umgebungsbedingungen** der Quelle beeinflussen das Messergebnis durch störende Reflexionen:

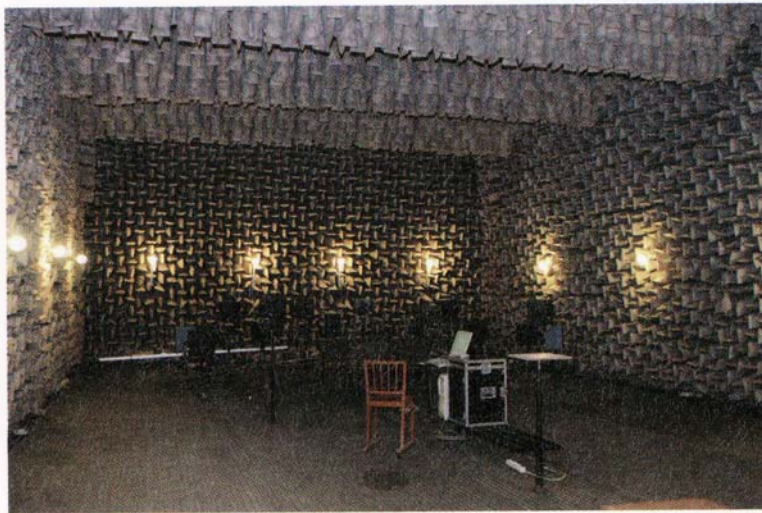


- a1) In einem so genannten **Freifeld** oder auch Direktschallfeld erfolgt eine gleichmäßige Ausbreitung in alle Richtungen ohne Hindernisse. Der Schalldruckpegel nimmt linear zum Logarithmus der Entfernung ab (- 6 dB je Entfernungsverdopplung). Dies ist im Freien oder in speziellen Messräumen (reflexionsarm bzw. „schalltot“) der Fall.
- a2) Sind allseitig reflektierende Begrenzungen vorhanden, erfolgt insbesondere bei sehr glatten, schallharten Oberflächen ein ständiges Reflektieren und ein vollständiges Durchmischen zu einem so genannten **Hallfeld** (diffuses Schallfeld), bei dem an jedem Punkt idealerweise gleiche Pegel auftreten. Sogenannte Hallräume mit allseitigen, glatten Betonwänden kommen dem sehr nahe.

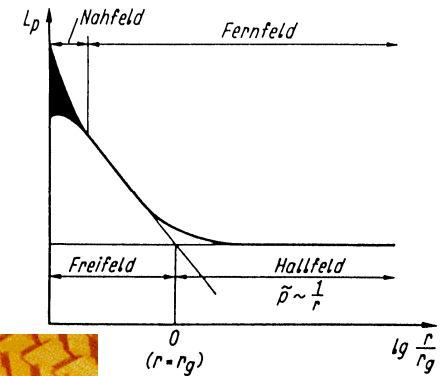
Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle

a) Die **Umgebungsbedingungen** der Quelle beeinflussen das Messergebnis durch störende Reflexionen:

a1) **Freifeld**
im schalltoten
Messraum



Reflexionsarmer Raum TU Dresden

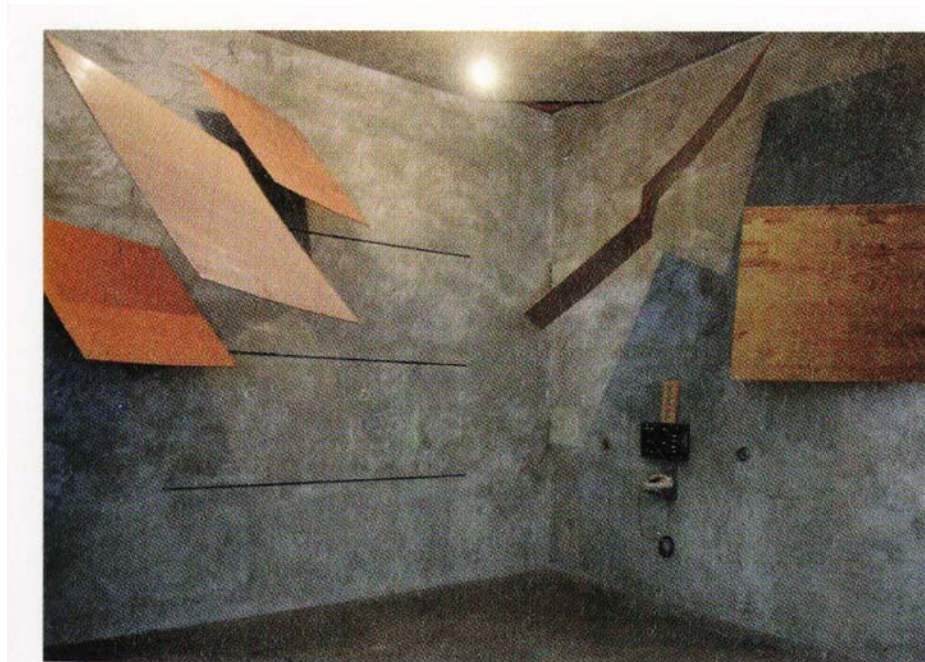
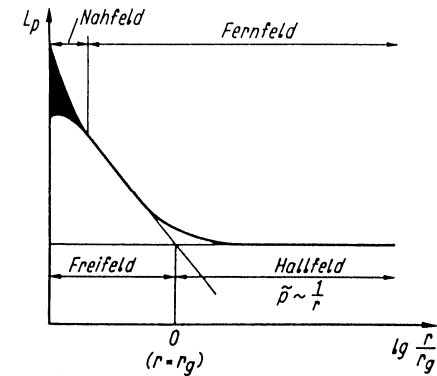


Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle

a) Die **Umgebungsbedingungen** der Quelle beeinflussen das Messergebnis durch störende Reflexionen:

a2) **Hallfeld**

diffuses konstantes Schallfeld im
Hallraum

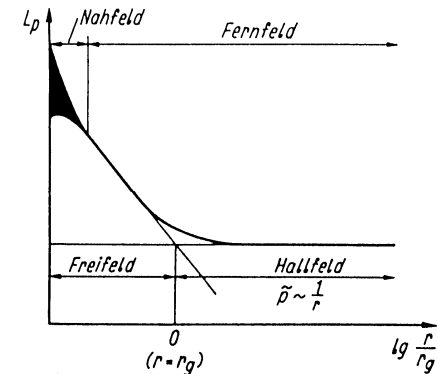


Hallraum TU Dresden

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe

Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle

- b) Die **Entfernung von der Quelle** hat zusätzlich Einfluss auf die gemessenen Werte:



- b1) In unmittelbarer Nähe der Quelle (wenige Zentimeter entfernt) herrschen sogenannte **Nahfeld**bedingungen; p und v sind nicht in Phase. Damit lässt sich die Schallleistung P wegen vorhandener Bildleistung nicht eindeutig bestimmen. Dieser Bereich ist also für Messungen zu meiden.
Erfahrungswert: für $f \leq 200$ Hz reicht der Nahfeldeinfluss bis ca. 25 cm.
- b2) Deshalb sollten Messungen stets im sogenannten **Fernfeld** erfolgen, wo p und v in Phase sind und die Schallschnelle proportional zu $1/r$ abnimmt, sofern noch kein Hallfeld vorliegt.

7.2.4.2 Messverfahren



Messung der arbeitsplatzbezogenen Schalldruckpegel L_{pAem} und L_{pA} (Immission):

Schalldruckpegel in Form

arbeitsplatzbezogener Emissionswerte L_{pAem} oder der Immissionswerte L_{pA}

werden über Mikrofone in Ohrhöhe erfasst.



Diese Messungen stellen also nur Relativmessungen dar und sind nur unter gleichen Bedingungen im Umfeld vergleichbar.

(Messung, Bewertung mit Filter, Addition der Frequenzanteile, logarithmieren)

Berechnung der abgestrahlten Schallleistung bzw. des Schallleistungspegels (Emission):

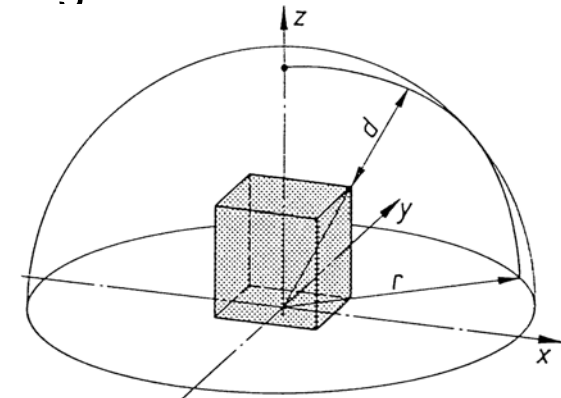
Über genormte

Hüllflächenverfahren im Freifeld (europäischer Raum) oder
Hallfeldmessung (amerikanischer Raum)

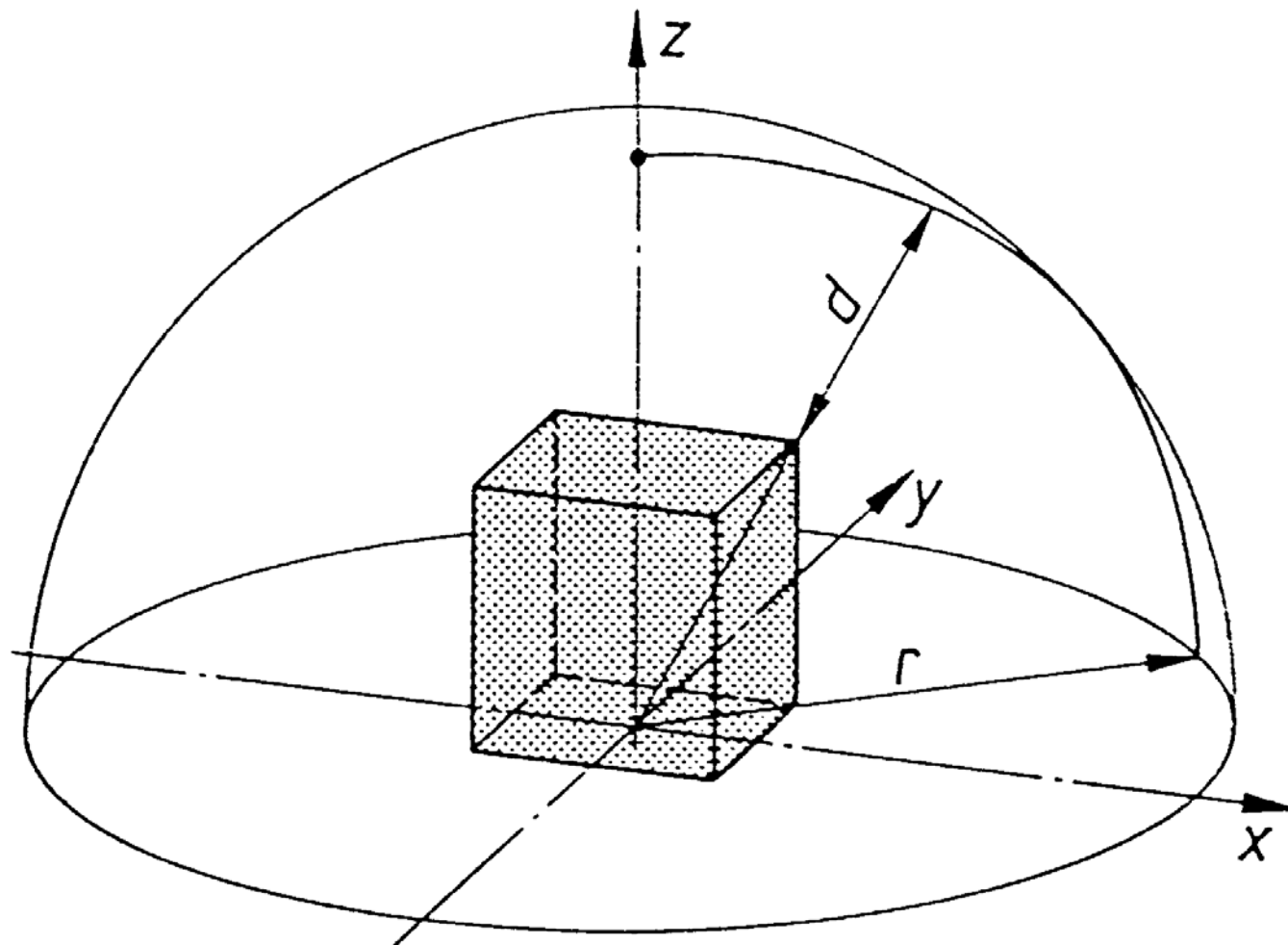
werden aus gemessenen Schalldruckpegeln Schallleistungspegel
berechnet.

Hüllflächenverfahren im Freifeld zur Schalleistungsmessung:

- Ausgangspunkt Messung von Schalldruckpegeln an verschiedenen Punkten auf einer Hüllfläche um das Messobjekt
- Hüllflächen sind genormt, beispielsweise als Quader oder Kugel bzw. Halbkugeln
- Messung erfolgt im Freifeld
- 5 bis 10 Messwerte je Messpunkt werden gemittelt
- Fremdgeräusche können durch zweite Messung ohne Gerätefunktion erfasst und schließlich herausgerechnet werden
- Berechnung des Schalleistungspegels unter Berücksichtigung des Hüllflächenmaßes

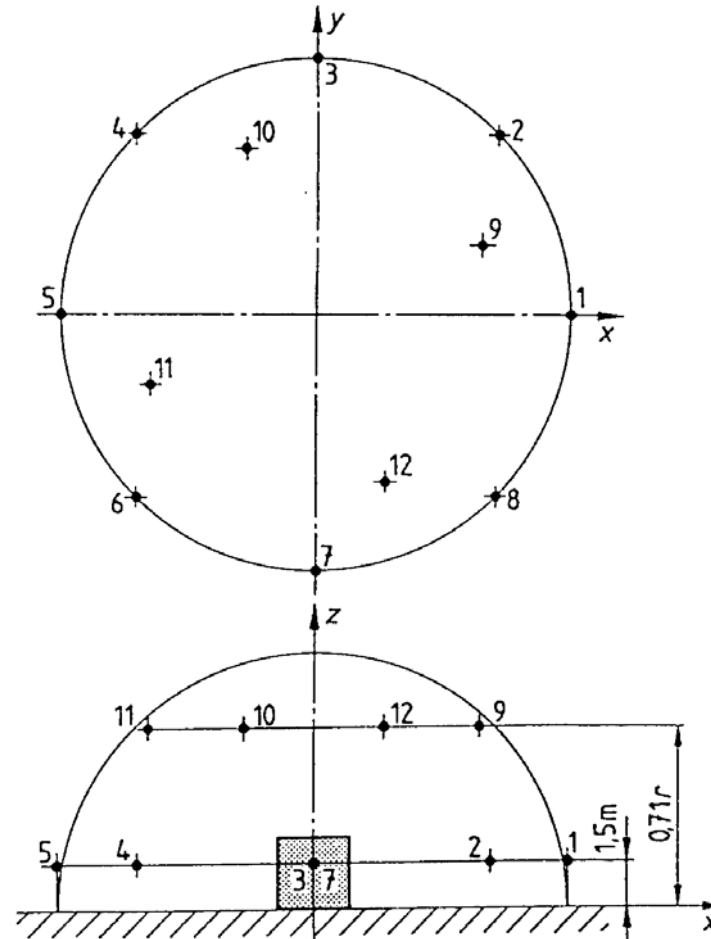


Hüllflächen, Beispiel Halbkugel



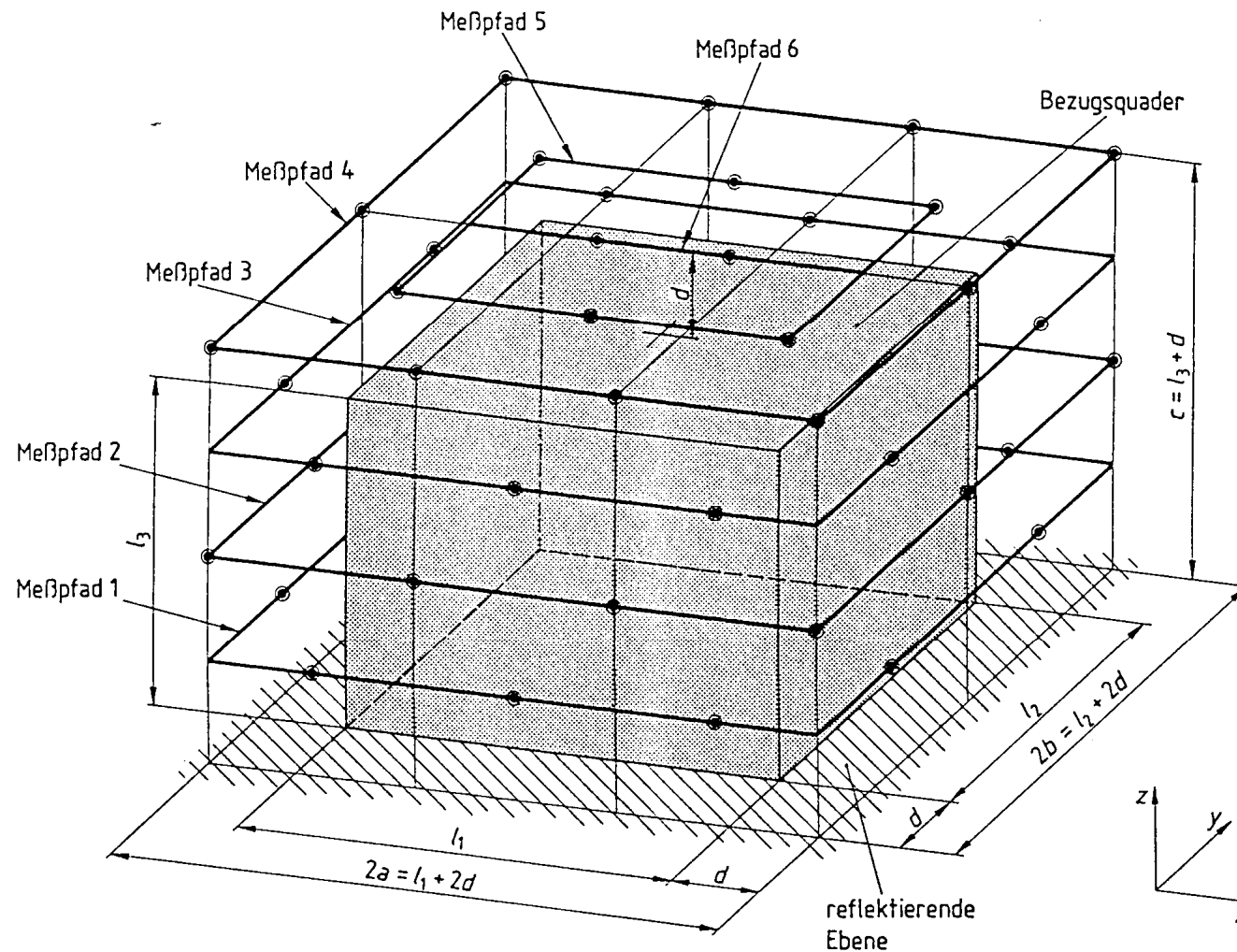
Hüllflächen, Beispiel Halbkugel

Meßpunkt	$\frac{x}{r}$	$\frac{y}{r}$	z
1	1	0	1,5m
2	0,7	0,7	1,5m
3	0	1	1,5m
4	-0,7	0,7	1,5m
5	-1	0	1,5m
6	-0,7	-0,7	1,5m
7	0	-1	1,5m
8	0,7	-0,7	1,5m
9	0,65	0,27	0,71 r
10	-0,27	0,65	0,71 r
11	-0,65	-0,27	0,71 r
12	0,27	-0,65	0,71 r



Halbkugel-Messfläche, Messpunktanordnung und Koordinaten, aus /68/

Hüllflächen, Beispiel Quader



Quader-Messfläche, Messpunkte und Messpfade bei großen Maschinen, aus /68/

Gleichungen dazu:

Mittelwertbildung:

$$\overline{L}_{pA} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum 10^{0,1 L_{pAi}} \right) \text{ dB}$$

Herausrechnung der Fremdgeräusche:

$$\overline{L}_{pA} = \overline{L}'_{pA} - \Delta L ,$$

$\overline{L}'_{pA}$ mit Fremdgeräuschen belasteter Pegel.

ΔL Korrekturwert durch reine Fremdgeräuschmessung.

Berechnung des Schalleistungspegels:

$$L_{WA} = \bar{L}_{pA} + L_A = \bar{L}_{pA} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB}$$

mit L_A als Messflächenmaß, in das die Hüllfläche A und eine Referenzfläche $A_0 = 1 \text{ m}^2$ eingeht.

Schallleistungsmessung im Hallfeld:

- Erfordert einen Hallraum, der ein möglichst ideales, gleichmäßiges Schallfeld durch Reflexionen erzeugt

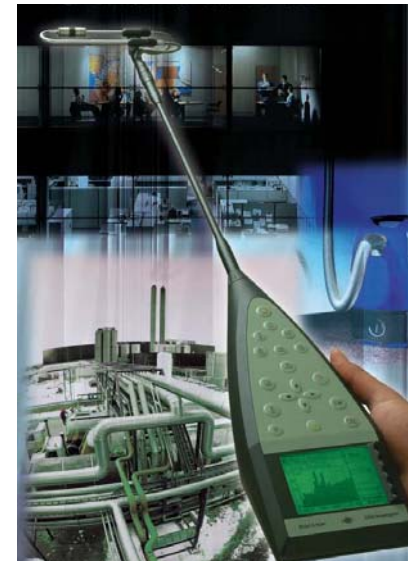
$$L_{WA} = \overline{\overline{L}}_{pA} + 10 \lg \frac{A}{A_o} \text{ mit } A = 0,163 \frac{V}{T},$$

Hallraumparameter sind das Raumvolumen V
und die Nachhallzeit T

Intensitätsmessung:

Sie sind auch im Nahfeld und bei zusätzlichen Fremdgeräuschen möglich, da vektorielle Größen erfasst werden.

Die Messtechnik ist jedoch deutlich aufwendiger. Hier soll nicht näher darauf eingegangen werden.



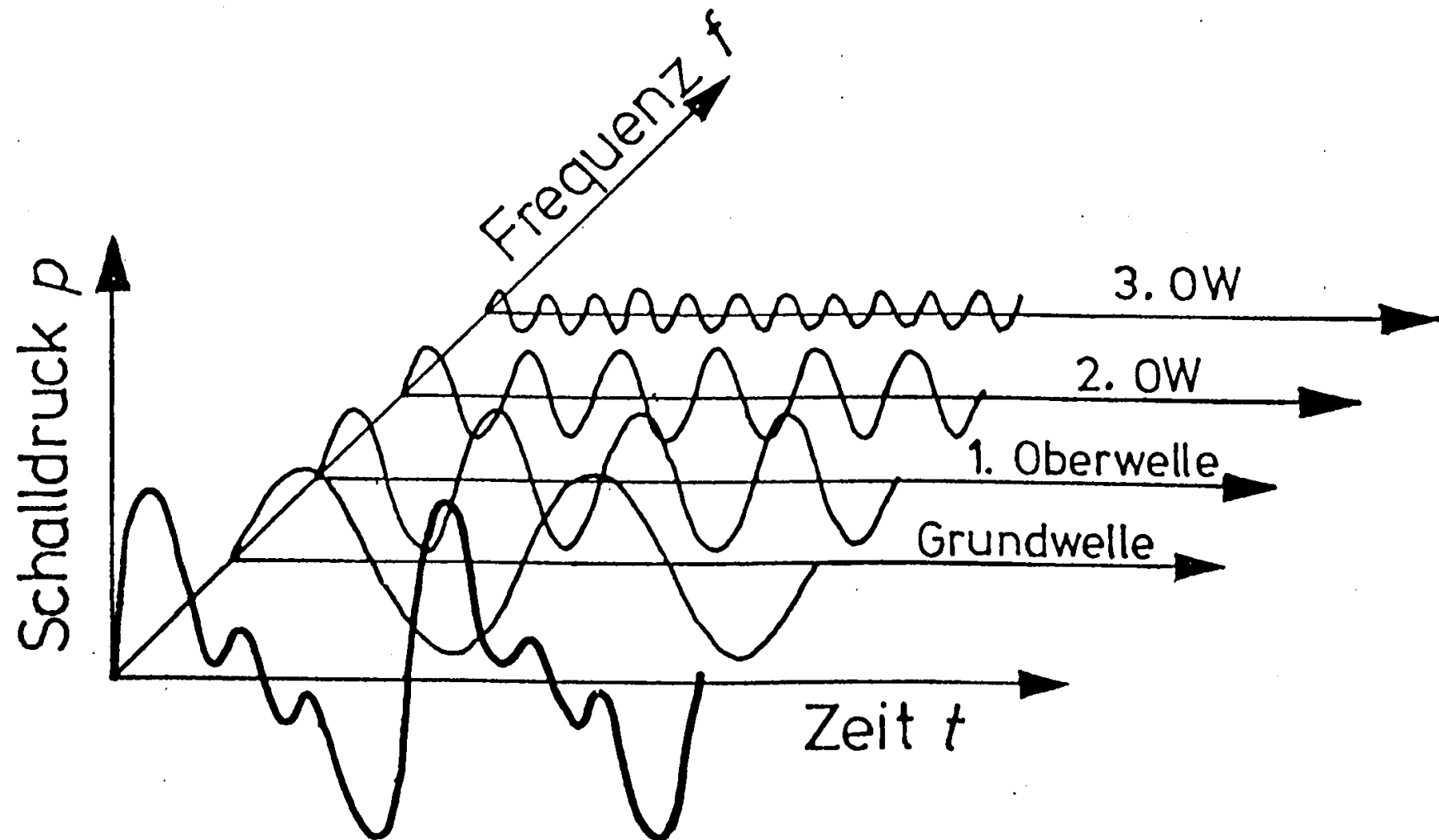
Frequenzgang der Messung:

Frequenzinformationen beinhalten Phase und Amplitude. Typischerweise nutzen viele Geräuschmessungen nur die Amplitude (Amplitudenspektrum).

Die Phaseninformationen bleiben weitgehend ungenutzt.



Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzebene, aus /48/

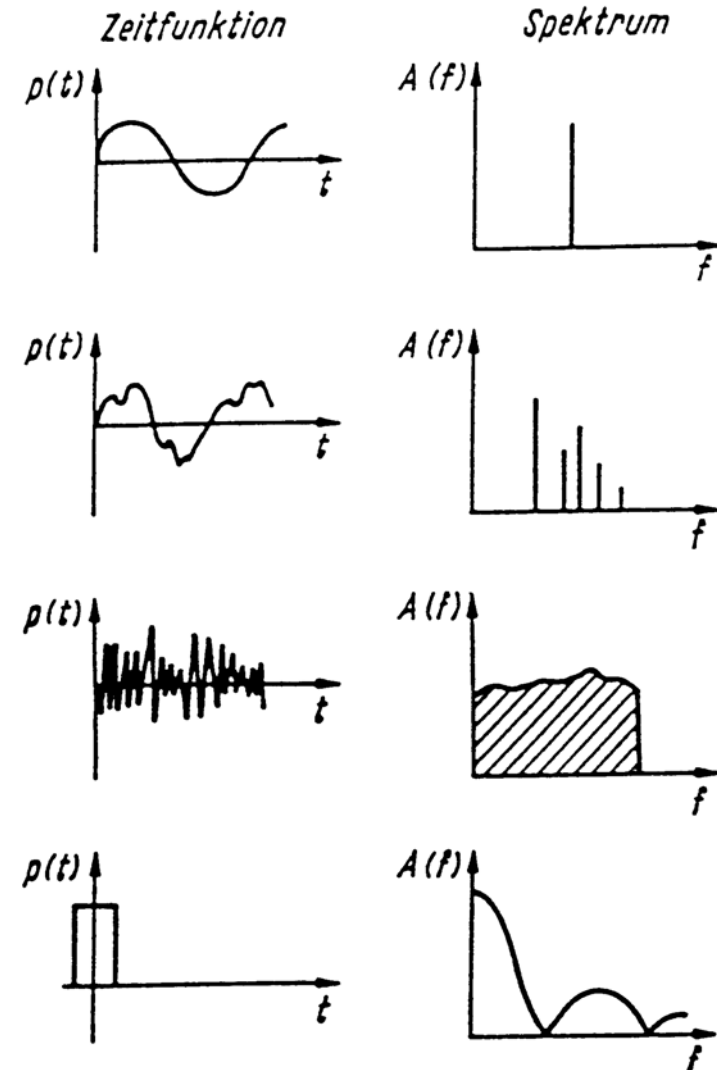


Charakteristische Zeitfunktionen und Spektren von Geräuschen, aus /38/

Charakteristische Zeitfunktion
eines Geräusches allgemein



Zeitfunktionen und
ihre Spektren



Schalldruckpegel als Gesamtpegel:

Werden vorzugsweise A-bewertet im gesamten Hörspektrum gemessen, ohne zusätzliche Frequenzinformation.

Frequenzanalysen (Filterung) mit folgenden Bandbreiten sind üblich:

Oktavanalyse

$$f_o = 2f_u$$

Terzanalyse

$$f_o = \sqrt[3]{2} f_u \approx \frac{5}{4} f_u$$

mit

$$f_m = \sqrt{f_o f_u}$$

als Mittenfrequenz des Bandes

Vergleich Terz- und Oktavfilterung

Oktave				Terz			
f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB	f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB
11	22	16	-56,7	14,1	17,8	16	-56,7
				17,8	22,4	20	-50,5
				22,4	28,2	25	-44,7
22	44	31,5	-39,4	28,2	35,5	31,5	-39,4
				35,5	44,7	40	-34,6
				44,7	56,2	50	-30,2
44	88	63	-26,2	56,2	70,7	63	-26,2
				70,7	89,1	80	-22,5
				89,1	112	100	-19,1
88	177	125	-16,1	112	141	125	-16,1
				141	178	160	-13,4
				178	224	200	-10,9
177	355	250	-8,6	224	282	250	-8,6
				282	355	315	-6,6
				355	447	400	-4,8
355	710	500	-3,2	447	562	500	-3,2
				562	708	630	-1,9
				708	891	800	-0,6

Vergleich Terz- und Oktavfilterung

Oktave				Terz			
f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB	f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB
710	1420	1000	0	891	1122	1000	0
				1122	1413	1250	+0,6
				1413	1778	1600	+1,0
1420	2840	2000	+1,2	1778	2239	2000	+1,2
				2239	2818	2500	+1,3
				2818	3548	3150	+1,2
2840	5680	4000	+1,0	3548	4467	4000	+1,0
				4467	5623	5000	+0,5
				5623	7079	6300	-0,1
5680	11360	8000	-1,1	7079	8913	8000	-1,1
				8913	11220	10000	-2,5
				11220	14130	12500	-4,3
11360	22720	16000	-6,6	14130	17780	16000	-6,6
				17780	22390	20000	-9,3

Schmalbandanalyse mit fester absoluter Bandbreite

$$\Delta f = 1 \text{ Hz bzw. } 4 \text{ Hz}$$

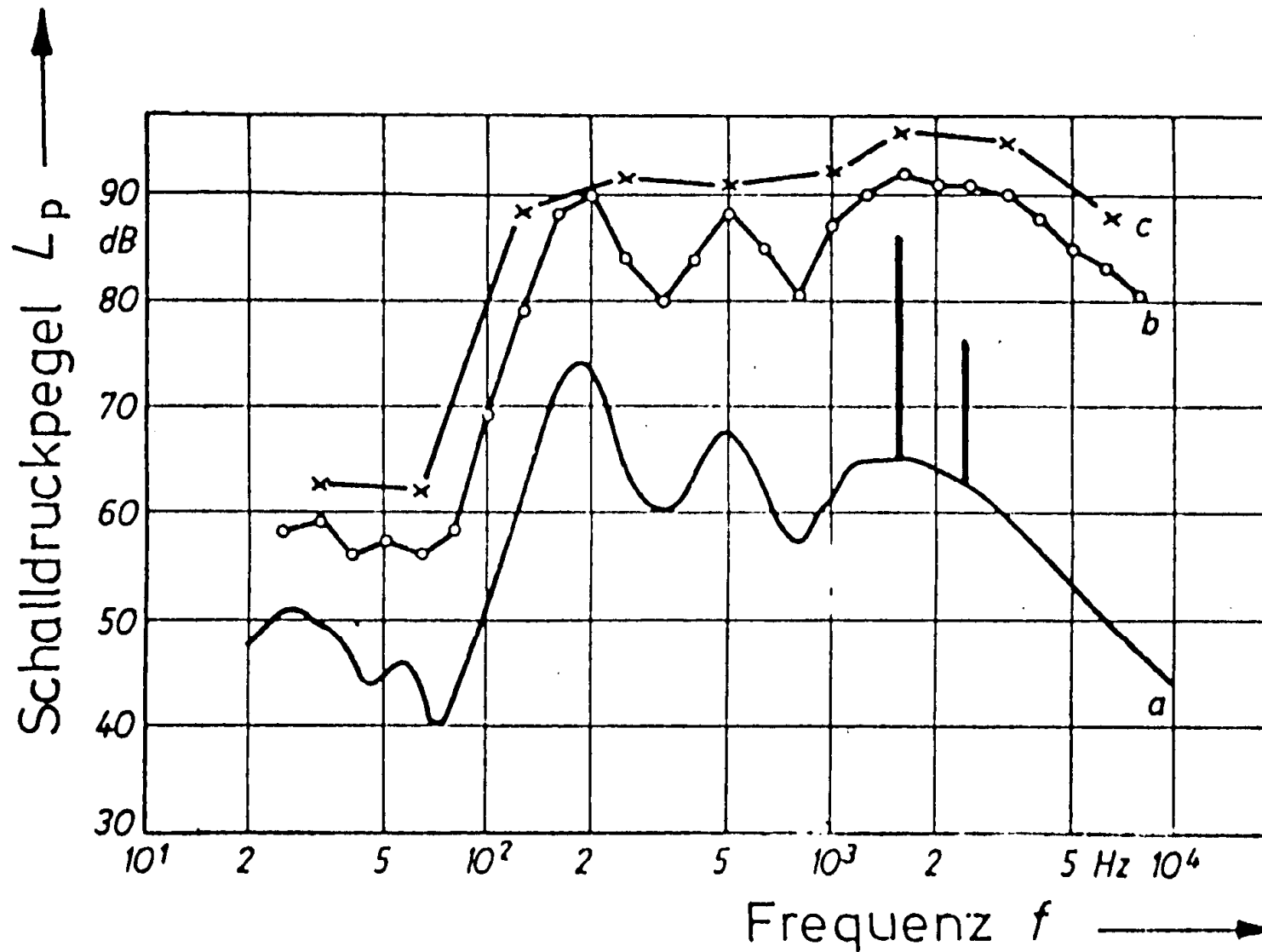
Schmalbandanalyse mit fester relativer Bandbreite

$$\Delta f = \frac{f_o - f_u}{f_m} = 10\%$$

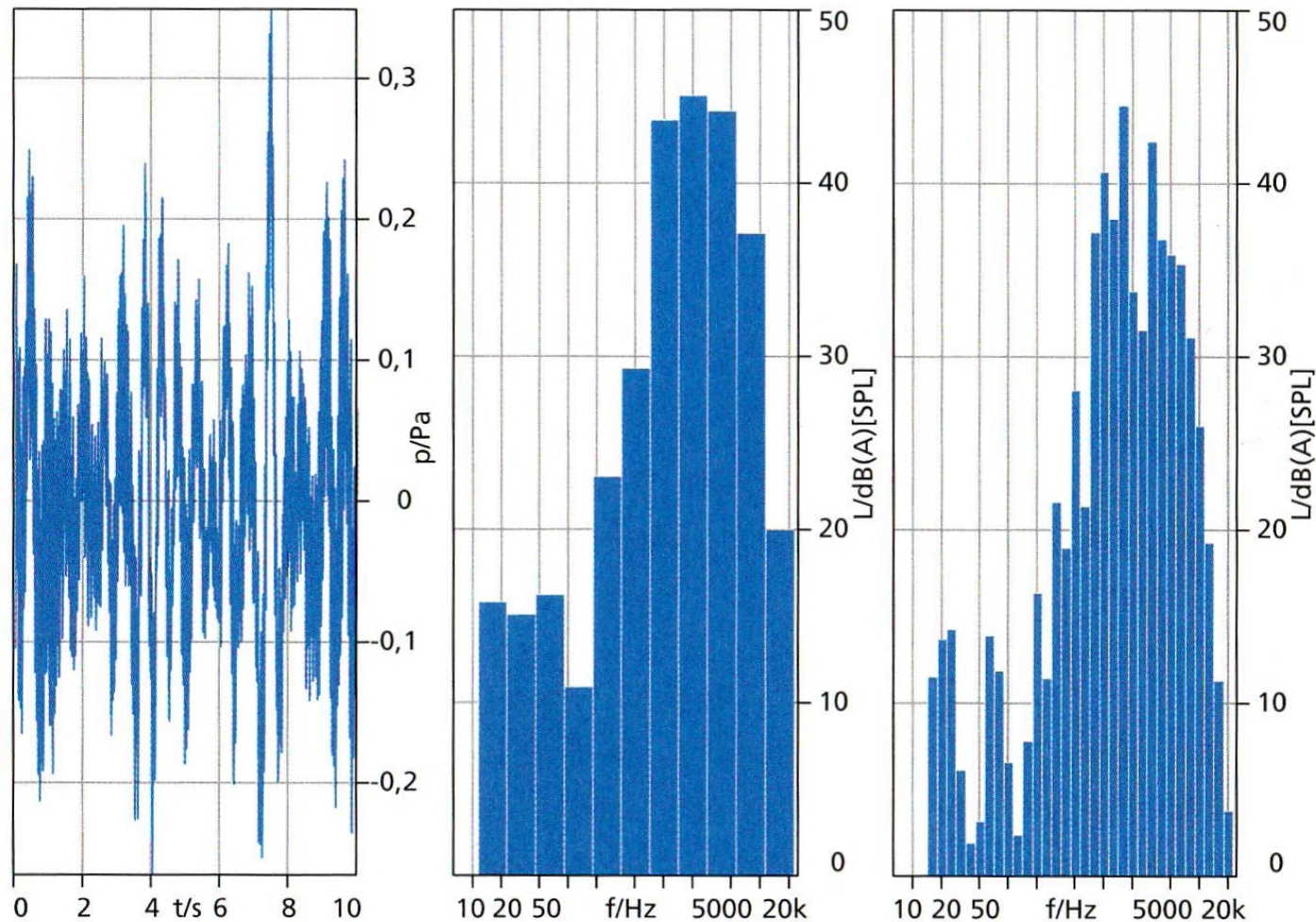
Achtung:

Eine Umrechnung ist nur zwischen Terz- und Oktavanalyse sowie dem Gesamtpegel möglich, nicht jedoch aus den Schmalbandanalysen.

Einfluss des Filtertypes auf das Schalldruckpegelspektrum, aus /48/
a) Schmalbandanalyse; b) Terzfilteranalyse; c) Oktavfilteranalyse



Einfluss des Filtertypes auf das Schalldruckpegelspektrum, Zeitsignal (links); Oktavfilteranalyse (mitte); Terzfilteranalyse (rechts)



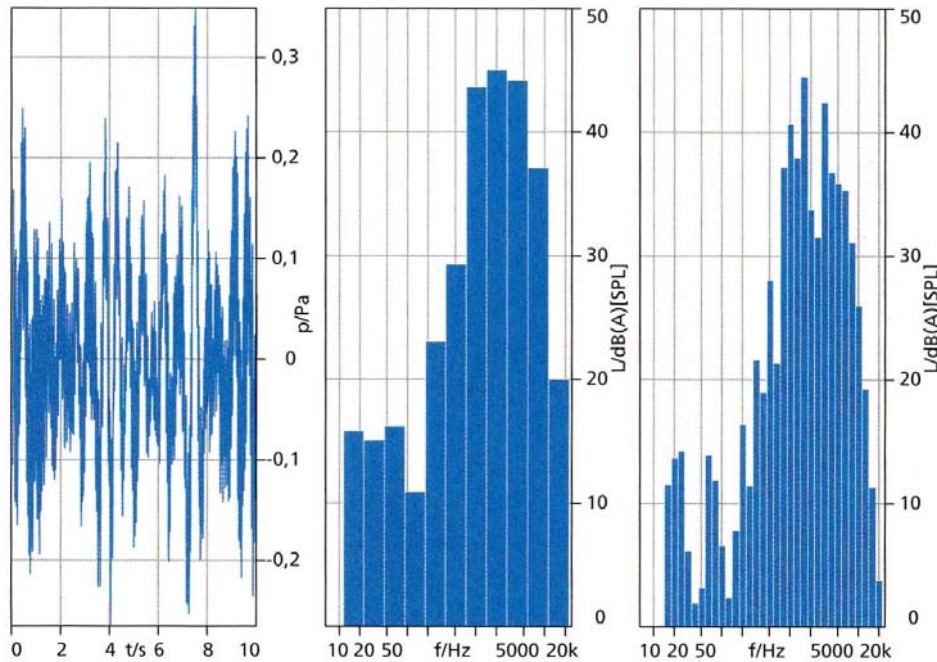
Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Abschnitt 7.2.4.2 Messverfahren

Einfluss des Filtertypes auf das Schalldruckpegelspektrum, Zeitsignal (links); Oktavfilteranalyse (mitte); Terzfilteranalyse (rechts)



Statt Funktionen von f (Frequenz)
auch Funktionen von n (Drehzahl) üblich = Ordnungsanalyse.

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Abschnitt 7.2.4.2 Messverfahren

Umrechnung von Terzpegeln in Oktavpegel:

$$L_{Okt} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{terz1}}{10}} + 10^{\frac{L_{terz2}}{10}} + 10^{\frac{L_{terz3}}{10}} \right)$$

$L_{terz 1}$, $L_{terz 2}$ und $L_{terz 3}$ sind die Terzpegel dreier benachbarter Terzen.

Umrechnung von Bandpegeln in den Gesamtpegel:

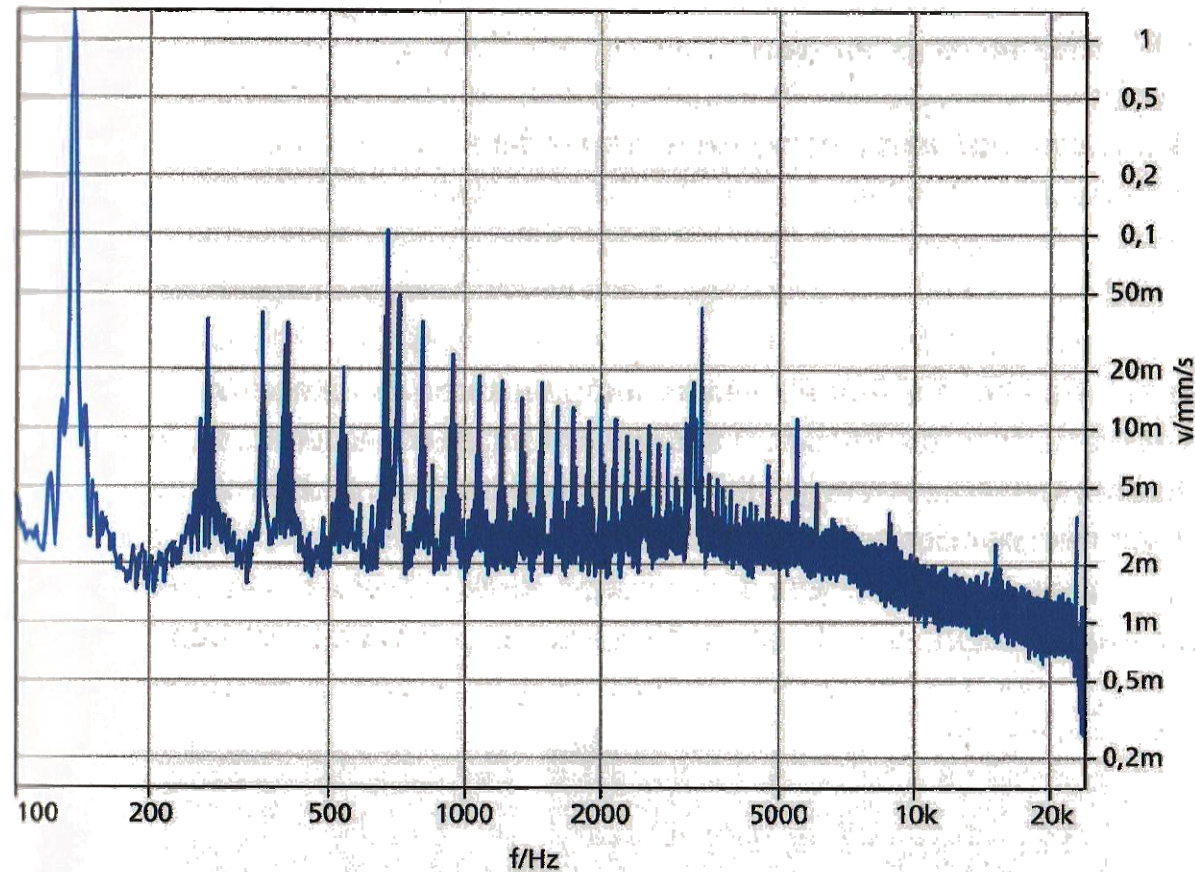
$$L_{\Sigma} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} \right)$$

L_i sind die Bandpegel aufeinanderfolgender Bänder.

Einfluss des Filtertypes auf das Schalldruckpegelspektrum

FFT-Analyse

(Fast-Fourier-Transformation, unendliche Reihe trigonometrischer Funktionen, harmonische Analyse)



Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Abschnitt 7.2.4.2 Messverfahren

Erfassung von Schalldrücken mit zeitlichen Schwankungen als energieäquivalenter Dauerschallpegel:

$$L_{pm} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 L_p} dt \right) \approx 10 \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1 L_{pi}} \right]$$

Achtung:

Alle angegebenen Messverfahren beziehen sich nur auf Luftschallmessungen.

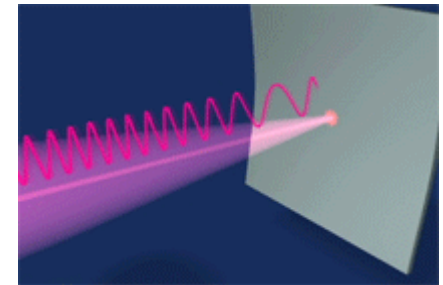
Körperschallmessung erfolgt im Allgemeinen über Druckaufnehmer bzw. Beschleunigungssensoren zur Erfassung der Schwingung selbst, der Schnelle der Schwingung.

Weitere Messungen zur Analyse der Ursachen

z. B. Körperschallmessung $a = \omega v = \omega^2 x$

mit Beschleunigungsaufnehmern (Piezo)
oder Kraftsensoren

Schwingungs- bzw. Schnellemessung
mit Laservibrometern oder
Wegsensoren



Weitere Messungen zur Wahrnehmung der Geräusche Ursachen

z. B. Kunstkopfmessung



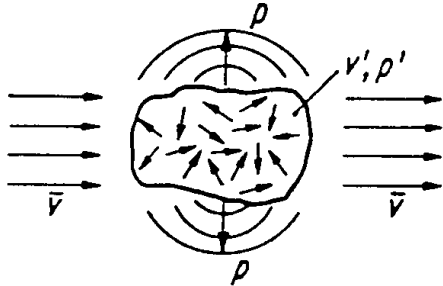
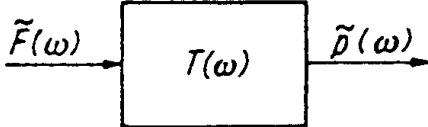
Quelle: Polytec

Quelle: Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe

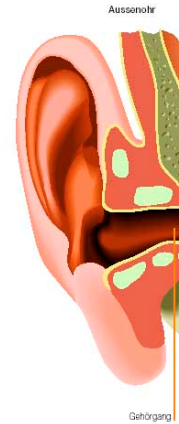
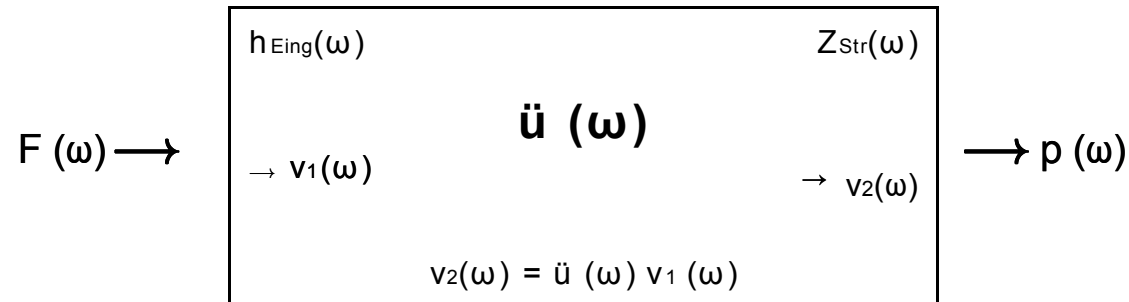
7.2.5 Geräuscentstehung und -weiterleitung



Direkte und indirekte Geräuscentstehung, aus /38/

	direkt erzeugte Geräusche	indirekt erzeugte Geräusche
Entstehungs- mechanismus	Zeitliche Schwankungen von Geschwindigkeit und Druck innerhalb eines Fluids infolge strömungsmechanischer Vorgänge erzeugen Wechseldruck im Hörbereich (Luftschall)	Wechselkräfte infolge von Bewegungs- oder anderen physikalischen Vorgängen regen mechanische Schwingungen im Hörbereich (Körperschall) an, die als Luftschall abgestrahlt werden.
Modell	 - zeitlicher Mittelwert	 ~ Effektivwert
Erläuterungen	$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit v' zeitlich schwankende Strömungsgeschwindigkeit p' zeitlich schwankender Druck im Strömungsbereich p Schalldruck	$\tilde{F}(\omega)$ Spektrum der anregenden Wechselkraft $T(\omega)$ Übertragungsfunktion der mechanischen Struktur (Schwingungs- und Abstrahlverhalten) $\tilde{p}(\omega)$ Frequenzspektrum des Schalldrucks

Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung



Kraftanregung mit $F(\omega)$
führt zu $v_1(\omega)$ mit
 $v_1(\omega) = h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot F(\omega)$
bzw. direkte
Geschwindigkeits-
anregung $v_1(\omega)$

Übertragung des Körperschalls durch
das Gerät mit Übertragungsfunktion
 $\ddot{u}(\omega)$

$$v_2(\omega) = \ddot{u}(\omega) \cdot v_1(\omega)$$

Abstrahlung als Luft-
schall $p(\omega)$

$$p(\omega) = Z_{\text{Str}}(\omega) \cdot v_2(\omega)$$

$$F(\omega) \cdot h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot Z_{\text{Str}}(\omega) = p(\omega)$$

7.2.5.1 Wirkungskette der direkten Geräuscentstehung



Wirkungskette der direkten Geräuscentstehung:

Abläufe/Vorgänge in Geräten, die direkt Luftdruckschwankungen und damit Luftschall erzeugen, sind beispielsweise Auswirkungen

aeropulsiver (Ansaugöffnungen, Auspuff)
aerodynamischer (Luftströmungen) oder
thermodynamischer Quellen (Explosion).

Es handelt sich dabei um eine direkte Wandlung von Druckänderungen oder von mechanischen Bewegungen in Schall

$$p(\omega) = Z(\omega) \cdot v(\omega)$$

mit

$Z(\omega)$ als Luftimpedanz (evtl. Impedanz eines Fluides).

In der Feinwerktechnik findet man direkte Geräuscherzeugung vorwiegend in Lüftern, insgesamt aber vergleichsweise selten.

7.2.5.2 Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung



Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung:

Zunächst erfolgt eine

Kraftanregung durch wechselnde Betriebskräfte oder eine

Geschwindigkeits- oder Fußpunktanregung durch bewegte bzw. schwingende Teile innerhalb von Geräten.

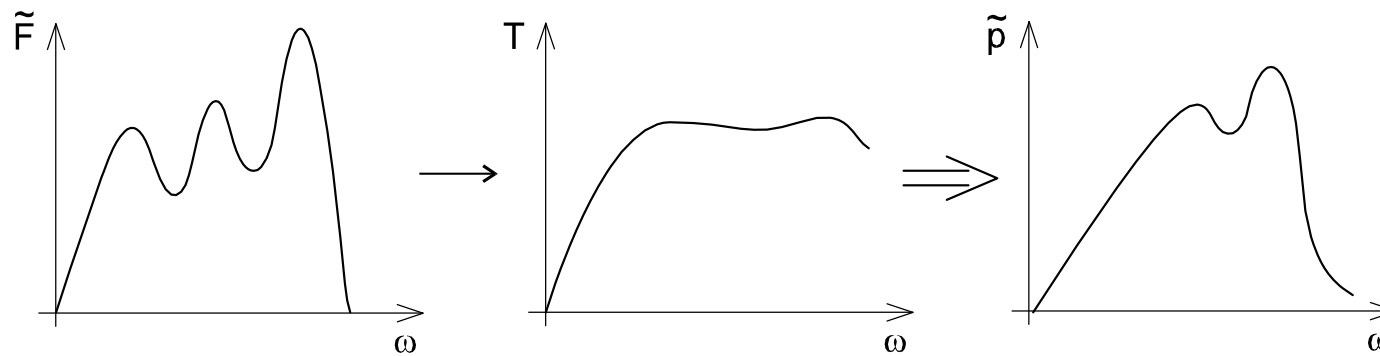
Danach erfolgt eine **Körperschallentstehung und -ausbreitung** in den mechanischen Strukturen des Gerätes.

Werden Begrenzungsflächen mit einer Schwingungsrichtung beaufschlagt die senkrecht dazu steht, kann eine

Luftschallerregung und -abstrahlung die Folge sein.

Man spricht von **indirekter Geräuscentstehung**, wobei dies meist die dominierende Geräuscherzeugung ist.

Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung:



$$\tilde{F}(\omega) \cdot T(\omega) = \tilde{p}(\omega)$$

$$p(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot v(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot h_{Eing}(\omega) \cdot F(\omega)$$

$$\text{mit } v(\omega) = h_{Eing}(\omega) \cdot F(\omega),$$

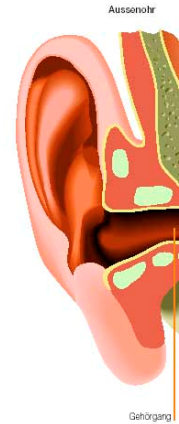
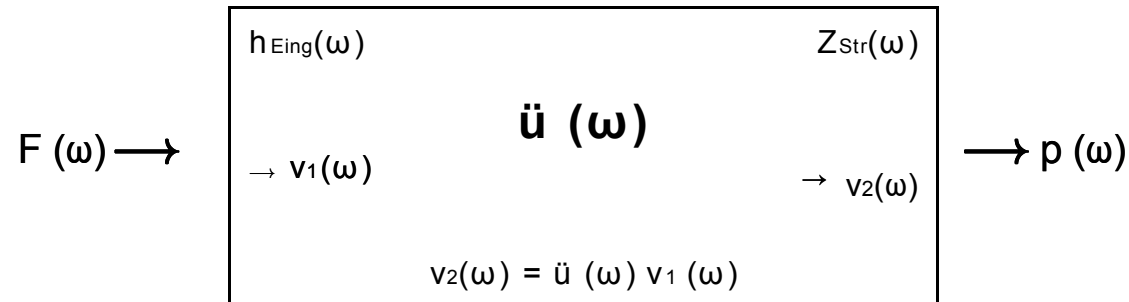
$\ddot{u}(\omega)$ Körperschallübertragung zur Abstrahlfläche

$Z_{Str}(\omega)$ Impedanz für die Schallabstrahlung

$F(\omega)$ Kraftanregung $h_{Eing}(\omega)$ Eingangsimpedanz für die Anregungsstelle der Kraftanregung

und $v(\omega)$ Geschwindigkeitsanregung.

Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung



Kraftanregung mit $F(\omega)$
führt zu $v_1(\omega)$ mit
 $v_1(\omega) = h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot F(\omega)$
bzw. direkte
Geschwindigkeits-
anregung $v_1(\omega)$

Übertragung des Körperschalls durch
das Gerät mit Übertragungsfunktion
 $\ddot{u}(\omega)$

$$v_2(\omega) = \ddot{u}(\omega) \cdot v_1(\omega)$$

Abstrahlung als Luft-
schall $p(\omega)$

$$p(\omega) = Z_{\text{Str}}(\omega) \cdot v_2(\omega)$$

$$F(\omega) \cdot h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot Z_{\text{Str}}(\omega) = p(\omega)$$

1. Körperschallerregung

a) Kraftanregung

$$p(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot h_{Eing}(\omega) \cdot F(\omega)$$

Periodische oder impulsartige Betriebskräfte werden insbesondere dann, wenn die Impedanz des Systems sehr groß gegenüber der des Erregers ist, nicht zu einer Aufprägung einer Bewegung auf das Gesamtsystem führen, sondern die Kraftwirkung erregt im schwingungsfähigen Gesamtsystem Körperschall. Dabei erfolgt diese Anregung nicht nur an der Einleitungsstelle selbst, sondern an allen Stellen, die in den Kraftfluss einbezogen sind.

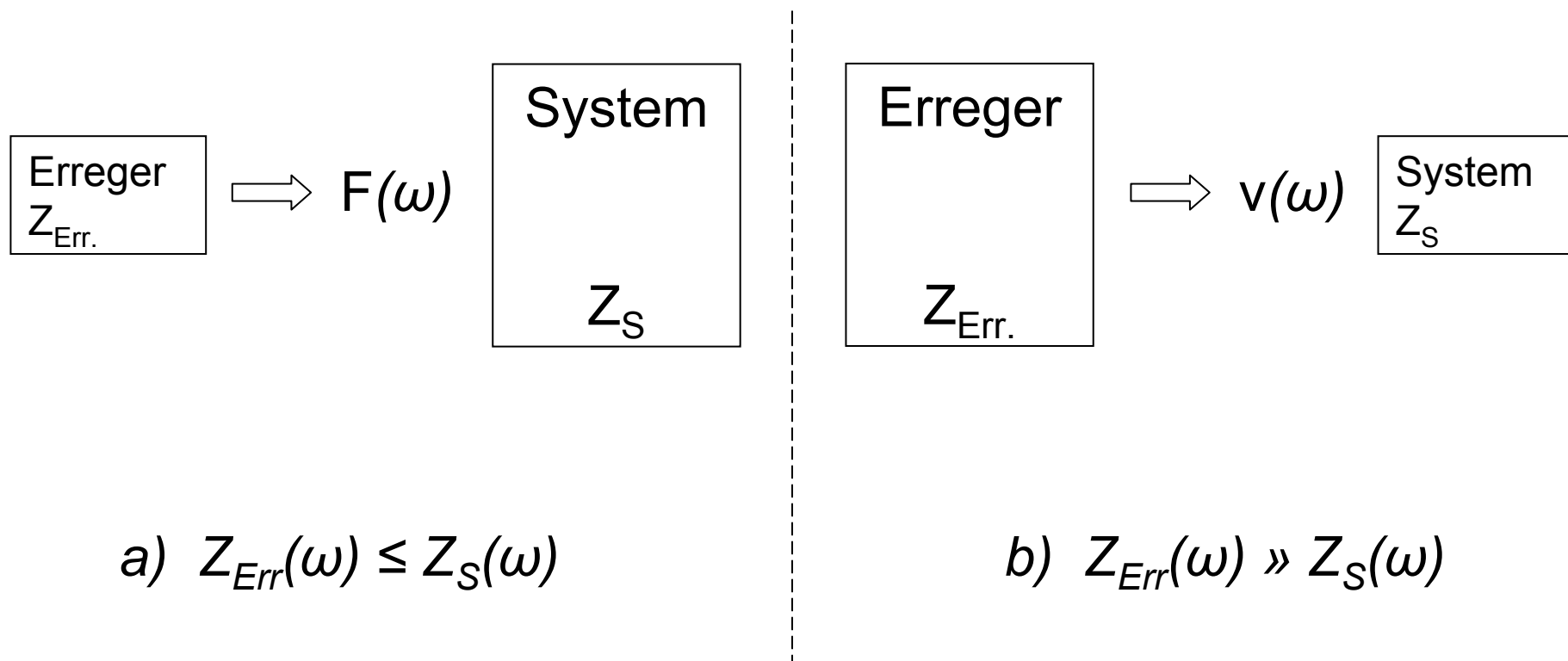
b) Geschwindigkeitsanregung (Schnelle- oder Fußpunktanregung)

$$p(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot v(\omega)$$

Wird dagegen an einem Erreger hoher Impedanz beispielsweise eine sehr leichte Struktur (z. B. ein Abdeckblech) mit vergleichsweise sehr kleiner Impedanz angekoppelt, so ist eine Aufprägung der Erregerbewegung direkt auf dieses Gebilde/System möglich.

Diese Teile müssen dabei nicht im Kraftfluss liegen, können jedoch trotzdem mitbewegt werden.

Veranschaulichung von Kraft- und Geschwindigkeitsanregung:



2. Körperschallübertragung

Nach Anregung des Körperschalls erfolgt eine Übertragung im Inneren des Gerätes mit verschiedensten Schwingungsrichtungen.

Es erfolgen häufige Reflexionen an den Bauteilgrenzen und keine nennenswerte Bedämpfung. Somit entsteht ein **Körperschallhallfeld** im Gerät mit **annähernd konstanter Schwingenergiedichte**.

Hier wird die Übertragungsfunktion zwischen Erregerstelle und Abstrahlfläche als **Gesamtübertragungsfunktion $\ddot{u}(\omega)$** betrachtet.



Innere Verluste bei der Körperschallübertragung:

Für feinwerktechnische Geräte gilt häufig $\eta \approx 10^{-2}$ als gute Näherung, durch optimale Beschichtungen mit viskoelastischen Materialien (Entdröhmittel) können auch $\eta \approx 0,1$ erreicht werden. Trotzdem sind die Bedämpfungen vergleichsweise niedrig.

Innere Verluste bei der Körperschallübertragung:

Material /Konstruktion	Verlustfaktor ¹⁾	Dämpfungsmechanismus
Stahl, Aluminium	10^{-4}	reine Werkstoffdämpfung
feinwerktechnische Strukturen	$(1 \text{ bis } 5) \times 10^{-2}$	Dämpfung der Verbindungsstellen, Werkstoffdämpfung
Automobilkonstruktionen	10^{-2}	
Verbundbleche, Bleche mit Entdröhnschicht	$(2 \text{ bis } 8) \times 10^{-1}$	Werkstoffdämpfung optimal durch Aufbau des Verbundsystems zur Geltung gebracht
reale Zahndämpfung bei Zahnradgetrieben	$(0,3 \text{ bis } 1) \times 10^{-1}$	Reibung, Werkstoffdämpfung
Hartgummi	1	Werkstoffdämpfung

- 1) Verlustfaktor η als Verhältnis der in Wärme umgewandelten zur gesamten mechanischen Energie. Beachte auch den wesentlich höheren Verlustfaktor realer Konstruktionen ($\eta \approx 10^{-1}$) gegenüber reinen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium.

3. Luftschallabstrahlung

Die Luftschallabstrahlung erfolgt meist an mit Biegeschwingungen beaufschlagten, plattenförmigen Bauteilen. Die analytische Betrachtung ist relativ unanschaulich und nur für sehr eingegrenzte Fälle möglich, sie soll deshalb hier nicht vertieft werden.

7.3 Zulässige Lärmbelastungen



7.3.1 Geräuschimmission



Zulässige Werte für die Schallimmission oder Geräuschemission beziehen sich vorwiegend auf die **Geräuschimmission am Arbeitsplatz oder im Wohnbereich**.

Messbedingungen (stark vereinfacht nach DIN 45645, /69/):

- für Geräuschimmission auf Menschen am Arbeitsplatz
→ Mikrofon dort anordnen, wo Mensch tätig ist, in Ohrhöhe
- für Geräuschimmission in der Nachbarschaft (also z. B. im Wohnbereich)
→ im Allgemeinen 0,5 m außen vor Mitte des geöffneten Fensters des am stärksten betroffenen Raumes.

Messgröße: L_{pA} als mittlerer Wert.

Bewertungsgröße:

Einführung eines **Beurteilungspegels** L_r unter Berücksichtigung von Zuschlägen, da nicht nur der Geräuschpegel, sondern auch das Spektrum subjektiv zu bewerten ist:

$$\text{Heimbereich: } L_r = L_{pA} + \underset{\downarrow}{K_I} + \underset{\downarrow}{K_T} + \underset{\downarrow}{K_R}$$

Impulszuschlag Tonzuschlag Zuschlag
für Ruhezeiten

$$\text{Arbeitsplatz: } L_r = L_{pA} + K_I + K_T + 10 \lg \frac{T}{T_r} \text{ dB.}$$

T_r - Bewertungszeitraum tagsüber,

T - Zeit der Geräuscheinwirkung innerhalb T_r .

Impulszuschlag K_I : $\rightarrow K_I = L_{Imp.} - L_{pA}$

Tonzuschlag K_T :
+ 3dB für auffällige Töne;
+ 6dB für besonders auffällige Töne

Ruhezuschlag K_R : z. B. + 6 dB für Sonn- und Feiertage.

Falls kein stationäres Geräusch über die gesamte Zeit vorliegt,
sondern Messungen in Teilzeiten nötig waren:

$$L_r = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^m T_i \cdot 10^{(L_{pAi} + K_{Ii} + K_{Ti} + K_{Ri})/10} \text{ dB} \right] \text{ dB}$$

$$\text{mit } T_r = \sum_{i=1}^m T_i$$

(Je i sollten 3 unabhängige Meßwerte gemittelt werden).

Vergleichsgrößen / zulässige Werte:

a) hinsichtlich einer **Gehörgefährdung** (VDI 2058 Bl. 2, /72/):

$L_r \geq 85 \text{ dB}$	allgemeine Gefahr des Entstehens von Gehörschäden
$85 \leq L_r \leq 89 \text{ dB}$	Gefahr des Entstehens von Gehörschäden nur bei länger andauernder Belastung
$L_r \geq 90 \text{ dB}$	Gefahr des Entstehens von Gehörschäden auch bei kürzerer Einwirkung möglich, bei ohrgesunden Personen ab nachfolgendem Zeitraum Schädigung : → 90 dB ab 6 Jahre 87 dB ab 10 Jahre 85 dB ab 15 Jahre
$L_r \geq 120 \text{ dB}$	akute Gehörschäden schon nach wenigen Minuten
$L_r \geq 135 \text{ dB}$	Schäden bereits durch Einzelschallereignisse (Knalle, Explosionen)

b) hinsichtlich einer Beeinträchtigung / Störung

(VDI 2058 Bl. 3, /72/):

am Arbeitsplatz:	$\leq 55 \text{ dB (A)}$	für überwiegend geistige Tätigkeiten
	$\leq 70 \text{ dB (A)}$	einfache, überwiegend mechanisierte Bürotätigkeiten
	$\leq 85 \text{ dB}$ (bis + 5 dB zulässig)	sonstige Tätigkeiten

im Wohnbereich:
(VDI 2058 Bl. 1)

Außen

Kurgebiete
(Krankenhäuser)

tagsüber
 $\leq$ dB (A)

nachts
 $\leq$ dB (A)

45

35

reine Wohngebiete

50

35

allgemeine Wohngebiete

55

40

Mischgebiete

60

45

Gewerbegebiete

65

50

Industriegebiete

70

70

Innen

Unabhängig von Lage in obigen Gebieten:

tagsüber

$\leq$ 35 dB (A)

nachts

$\leq$ 25 dB (A)

(kurzzeitige Geräuschspitzen bis + 10 dB zulässig).



7.3.2 Geräuschemission von Geräten und Maschinen



Geräuschemission von Geräten und Maschinen

Für den Entwickler ist die Frage der Geräuschemission maßgebend. Hier sind die Festlegungen relativ unkonkret. Hersteller sind verpflichtet:

- Geräte und Maschinen entsprechend den fortschrittlichen, in der Praxis bewährten Regeln der Lärminderung auszulegen
- die Lärmemission der Geräte/Maschinen anzugeben in Form des
 - Schalleistungspegels L_{WA}
 - arbeitsplatzbezogenen Emissionswertes L_{pA}
(am Arbeitsplatz von Maschinen / Geräten auftretender Schalldruckpegel ohne Reflexionen).

Grenzwerte für die Geräuschemission wegen der verschiedenen Einsatzbedingungen und Einsatzumfelder nicht festgelegt, die VDI-Vorschriften enthalten jedoch Vergleichswerte für den aktuellen Stand der Technik.

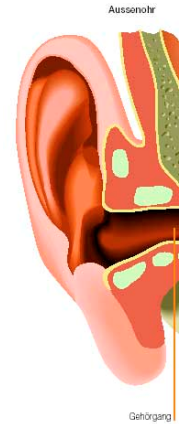
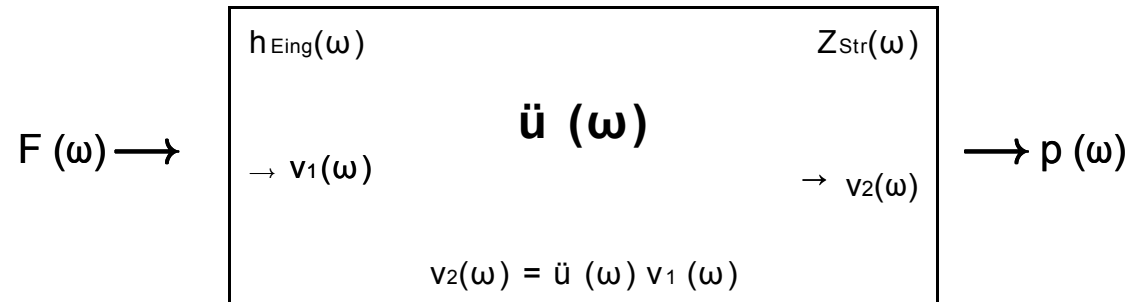
Beispiele typischer gemessener Emissionskennwerte, nach /70//71/:

Gerät	L _{WA} in dB	L _{pA} in dB
Schreibmaschinen	70...75	65...70
Bürokopierer	67	71
Computer:		
im typischen Betrieb	57	--
im Leerlauf	50	42
Komponenten:		
Tastatur	59	56
Diskettenlaufwerk	56	50
Festplattenlaufwerk	53	45
Küchenmaschine	79...83	
Geschirrspüler	68...72	
Staubsauger	76...80	
Waschmaschine:		
Waschen	62...66	
Schleudern	72	
Trockner	59...68	
Kühlschränke	41...43	

7.4 Maßnahmen zur Lärminderung im Gerätebau



Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung



Kraftanregung mit $F(\omega)$
führt zu $v_1(\omega)$ mit
 $v_1(\omega) = h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot F(\omega)$
bzw. direkte
Geschwindigkeits-
anregung $v_1(\omega)$

Übertragung des Körperschalls durch
das Gerät mit Übertragungsfunktion
 $\ddot{u}(\omega)$

$$v_2(\omega) = \ddot{u}(\omega) \cdot v_1(\omega)$$

Abstrahlung als Luft-
schall $p(\omega)$

$$p(\omega) = Z_{\text{Str}}(\omega) \cdot v_2(\omega)$$

$$F(\omega) \cdot h_{\text{Eing}}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot Z_{\text{Str}}(\omega) = p(\omega)$$

Prioritäten bei den Maßnahmen der Lärminderung ergeben sich aus der Wirkungskette:

Primäre Maßnahmen :
1. Minderung anregender Kräfte $F(\omega)$ bzw. Geschwindigkeiten $v(\omega)$
2. Minderung der Einkopplung der angeregten Schwingungen in das Gerät ($h_{\text{Eing}}(\omega)$)
3. Dämmung bzw. Dämpfung der Weiterleitung des Körperschalls im Gerät ($\ddot{u}(\omega)$)
4. Minderung der Abstrahlung ($Z_{\text{Str}}(\omega)$)
Sekundäre Maßnahmen :
5. Minderung der Ausbreitung $p(\omega)$
6. Körperschutzmaßnahmen

Zusätzliche Kriterien sind:

- beginnend mit der Hauptgeräuschquelle
- die Überlagerung zweier Quellen mit 6 dB Unterschied erhöht den Gesamtpegel nur um kaum merkliche + 1 dB
- Lärminderung muss bereits in der Aufgabenpräzisierung bedacht werden, im gesamten Entwicklungsprozess erfolgen und nicht am Ende aufgesetzt werden
- lärmarme Wirkprinzipie bringen die größte Pegelsenkung

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der Anregung von Geräuschen

- Verringerung der direkten Luftschallanregung durch:
 - Vermeidung von Luftströmungen bzw. Realisierung möglichst niedriger Strömungsgeschwindigkeiten
 - Vermeidung von Störungen in Luftströmen, die zu Verwirbelungen führen
 - Vermeidung sprunghafter Querschnittsänderungen in Strömungskanälen und an Ausgangsöffnungen zur Realisierung konstanter Geschwindigkeitsprofile und wirbelfreier Einläufe.

- Verringerung der Anregung von Körperschall durch:
 - Vermeidung bzw. Verringerung anregender Kräfte, Geschwindigkeiten und Drehzahlen (z. B. durch anderes Wirkprinzip, Auswuchten schnell rotierender Teile, Masseausgleich)
 - Vermeidung diskontinuierlicher Kraftwirkungen (z. B. bei Zahnrädern)
 - Vermeidung von Gleichzeitigkeiten in der Anregung (Prinzip der Schrägung)
 - Vermeidung der Anregung von Resonanzen durch Verschiebung der Anregungsfrequenz. Mechanische Schwingungen direkt besitzen meist unkritische Frequenzen bis ca. 100 Hz, regen aber Resonanzfrequenzen und Oberwellen im hörbaren Bereich an

- Minimierung der ersten und zweiten, eventuell auch höherer Ableitungen der Zeitfunktion der Anregung, um einen steilen Abfall des Spektrums bei höheren Frequenzen zu sichern
- Vermeidung von Stößen (und deshalb auch von Spiel) in der Bewegung, da Stöße ein sehr breites Spektrum anregen
- Verringerung des Stoßimpulses $J = mv$, Halbierung von m oder v bringt -6 dB!
- Verlängerung der Stoßdauer, zeitliche Verdoppelung führt zu -6 dB !
- Einengung oder Beseitigung von Spiel
- Vermeidung von Verbindungsstellen, die sekundäre Stoßstellen bilden können (Klappern).

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der **Körperschall-einkopplung und –übertragung**:

- Eingangsimpedanzen an Krafteinleitungsstellen möglichst hoch ausbilden (Massekonzentration / Erhöhung der Steifigkeit der Abkoppelstelle)
- An Stellen von Geschwindigkeitsanregung möglichst durch weichelastische Gummi- und Federelemente entkoppeln (Körperschallisolation), dämpfungsarm, elastisch in Schwingungsrichtung, möglichst an Knotenpunkten der Schwingung
- Kraftfluss kurz halten
- Gehäuseteile an kraftführender Struktur körperschallisoliert anbringen (Befestigungspunkte möglichst an steifen, massehaltigen Punkten, an Knotenpunkten der Eigenschwingungen)

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der **Körperschall-einkopplung und –übertragung**:

Unterscheidung:

- hoch abstimmen, steifer (Eigenfrequenz wird höher)
- tief abstimmen, weicher (Eigenfrequenz verringert bei kleinerer Amplitude, muss dann aber schnell durchfahren werden)

Schalldämpfung

- Große Laufstrecken und viele Reflexionen dämpfen den Körperschall, für feinwerktechnische Abmessungen bleiben die Einflussmöglichkeiten jedoch stark eingeschränkt
- Nutze Materialien mit hohem Absorptionsgrad zur inneren Dämpfung (z. B. hochpolymere Kunststoffe oder Verbundwerkstoffe, z. B. -3 dB auf 20 cm Länge in Kunststoffen)
- Dämpfung durch Entdröhnbeläge erfordert sehr dicke Schichten, um messbare Lärminderungen zu erzielen.

Primäre Maßnahmen zur **Verminderung der Schallabstrahlung**:

- Kraftfluss auf möglichst engen, inneren, massiven und steifen Kreis beschränken und nicht über Außenflächen (Abstrahlflächen) führen
- Abstrahlende Oberfläche so klein wie möglich halten (Ausbrüche, Lochung)
- Verringerung der Biegesteifigkeit der abstrahlenden Fläche
- Aufbringung von mehrschichtigen, allerdings sehr dicken schallabsorbierenden Schichten.

Sekundäre Maßnahmen:

- Verminderung der Geräuschemissionen des Gerätes durch Verminderung der Schallausbreitung, Schalldämmung, z. B. durch
 - Kapselung, Schallschutzkabinen.
- Verminderung der Geräuschimmission auf den Menschen, z. B. durch
 - raumakustische Maßnahmen am Arbeitsplatz
 - individuellen Gehörschutz.
 - Gegenschall/Aktivschall (z. B. Kopfhörer von Piloten gegen Dröhnen der Triebwerke)

Tafel 7.9

Allgemeine Regeln zur Lärminderung, aus /38/

Tafel 7.9 bis Tafel 7.13
Allgemeingültige Regeln
zur Lärminderung
in abstrakter Form

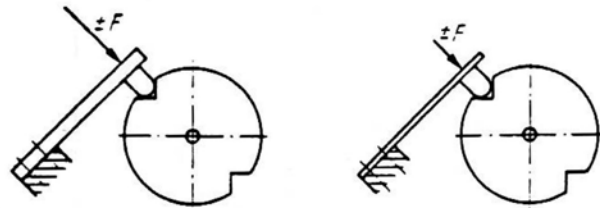
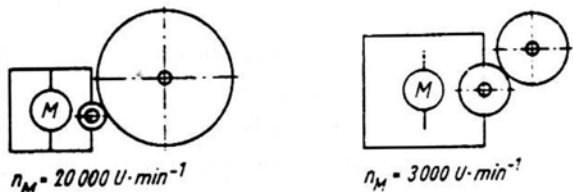


Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Regel	Erläuterungen
① Die Hersteller sind verpflichtet, für ihr Produkt das Einhalten von Best- oder Zielwerten der Geräuschemission zugrunde zu legen!	Best- oder Zielwerte der Geräuschemission sind Werte, die sich am internationalen Höchststand von Wissenschaft und Technik orientieren und dem jeweiligen Erkenntnisstand sowie den technisch-ökonomischen Möglichkeiten der Lärminderung entsprechen.
② Bei der Entwicklung und Konstruktion von Produkten darf die Lärminderung nicht als separate Aufgabenstellung betrachtet werden, sondern muß in jede Phase des konstruktiven Entwicklungsprozesses integriert sein!	Die gesonderte Betrachtung der Lärminderung würde zu einem absoluten Vorrang der Gerätefunktion führen und dazu, daß der Aufwand für dann im Nachhinein notwendige Maßnahmen steigt.
③ Die Lärminderung muß bereits bei der Wahl des Verfahrensprinzips (Wirkprinzips) für die Gerätefunktion [13, 15] beginnen!	Beispiele dafür sind der Ersatz mechanischer durch elektronische Bauelemente für informationsverarbeitende Baugruppen, die Anwendung von Schrittmotoren zum Realisieren von beliebigen Bewegungsabläufen an Stelle von Schrittmechanismen, das Ablösen des Typendruckes durch Thermo- oder Tintenstrahldruck, die Verwendung von Magnetbändern oder Disketten statt Lochstreifen usw. Dabei sind jedoch stets die technisch-ökonomischen Randbedingungen zu beachten.
④ Parallel zum Erarbeiten der aus dem Verfahrensprinzip abzuleitenden Funktionsstruktur und des technischen Prinzips eines Gerätes [13, 15] sind die wichtigsten Anregungsstellen, Übertragungswege und Abstrahlflächen in Form eines Schallflußbildes (s. Abschnitt 7 und Bild 8-5) aufzuzeichnen und zu optimieren!	Beim Aufstellen des Schallflußbildes lassen sich Erfahrungen und Vergleiche mit ähnlichen Geräten, evtl. vorliegende Meßergebnisse und Erkenntnisse aus dem Studium von Beispiellösungen mit heranziehen.
⑤ Beim Festlegen von Lärminderungsmaßnahmen ist die Orientierung auf das Bekämpfen der Geräuschenstehung (aktive Lärminderung) vorrangig!	Geräusche lassen sich am wirksamsten und sehr ökonomisch an ihrer Quelle bekämpfen. Die Minderung einmal entstandener Geräusche (passive Lärminderung) sollte hauptsächlich auf funktionsbedingte Geräusche beschränkt bleiben.
⑥ Maßnahmen der Lärminderung sind in erster Linie an solchen Baugruppen anzusetzen, die den Gesamtpegel des Gerätes bestimmen!	Geräuschmäßig dominierende Baugruppen liegen mit ihrem anteiligen Schallpegel um 5 dB oder mehr über dem der anderen Baugruppen. Sind derartige Baugruppen nicht vorhanden, so müssen sich die Maßnahmen der Lärminderung auf alle Baugruppen erstrecken. Dabei ist immer zu beachten, daß die Senkung des Geräuschpegels einer oder mehrerer Baugruppen entsprechend der Pegelrechnung wenig Erfolg bringt, solange es noch andere Baugruppen mit größerem Pegel gibt.

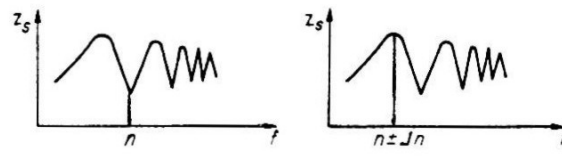
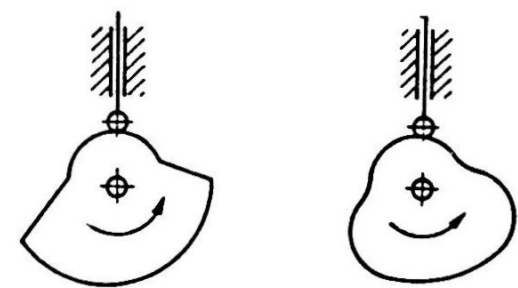
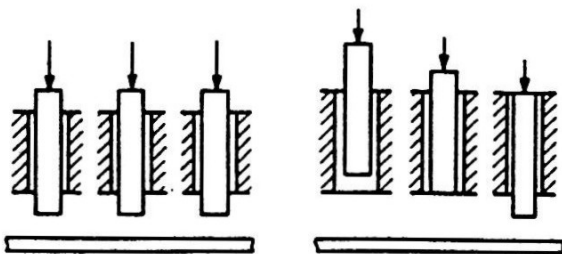
Tafel 7.10

Regeln zur Verminderung
der Körperschallanregung,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① <i>Funktionsnotwendige Kräfte sind nicht größer als unbedingt erforderlich zu wählen!</i> Das Minimieren der Betriebskräfte hat zur Folge, daß nur ein technisch begründetes Mindestmaß an Körperschall entstehen und in Luftschall umgewandelt werden kann. Gleichzeitig werden Energieökonomie und Lebensdauer des Gerätes verbessert.		
② <i>Die Drehzahl rotierender Bauteile soll so niedrig wie möglich liegen!</i> Die Körperschallanregung durch Unwuchten wächst progressiv mit der Drehzahl. Das Senken der Drehzahl auf die Hälfte bewirkt ein Vermindern der Unwuchtanregung auf ein Viertel (um 12 dB). Die Anregung rechts im Bild beträgt bei gleicher Unwucht nur noch $(3\,000/20\,000)^2$, d.h. 2 % gegenüber der links dargestellten Variante.		

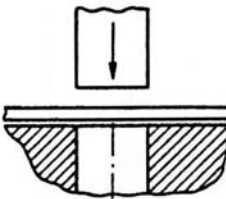
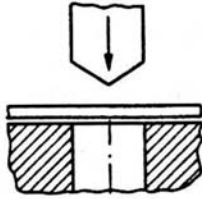
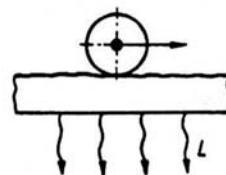
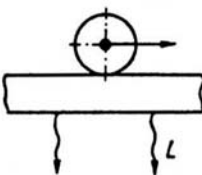
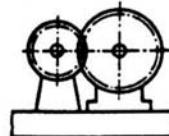
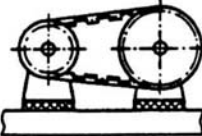
Tafel 7.10

Fortsetzung 1,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
③ <i>Durch geringe Änderung tonaler Anregungsfrequenzen (Drehzahl, Zahneingriffsfrequenz) oder der Bauteilgeometrie kann die Übereinstimmung mit Biegeeigenfrequenzen vermieden werden!</i> Die aufgrund von Resonanzüberhöhungen entstehenden hohen Geräuschpegel treten infolge ihrer Schmalbandigkeit besonders störend in Erscheinung. Die ungünstige Lösung zeigt das Anregen einer Platte durch die Drehzahl n in einem Gebiet geringer Impedanz (starkes Mitschwingen). Durch Drehzahländerung $\pm \Delta n$ wird ein besseres akustisches Verhalten erreicht.		
④ <i>Die Zeitfunktion periodischer Betriebskräfte ist so zu gestalten, daß Anstieg und Krümmung möglichst klein sind!</i> Das Minimieren der ersten und zweiten (ggf. auch höheren) Ableitungen der Zeitfunktion bewirkt eine Lärminderung bei höheren Frequenzen ab einigen hundert Hertz. Aus dem gleichen Grund sollen z.B. die Bewegungsgesetze von Kurvengetrieben bis zur 3. Ableitung stetig sein [16].		
⑤ <i>Mehrere unabhängig voneinander wirkende Anregungsvorgänge sind zeitlich zu versetzen!</i> Zwei gleiche Anregungsvorgänge, die zeitlich gestaffelt sind, z.B. versetzte Lochstempel, weisen einen um 3 dB niedrigeren Spitzenpegel auf als bei gleichzeitigem Ablauf.		

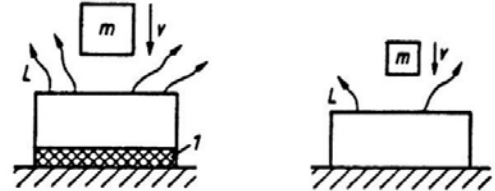
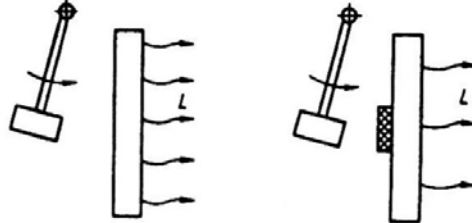
Tafel 7.10

Fortsetzung 2,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑥ Eine zeitliche Dehnung des Anregungsvorganges bewirkt eine stetigere Kraftübernahme und damit einen geringeren Körperschallpegel! Eine zeitliche Dehnung läßt sich durch das Schrägungsprinzip erreichen. Schrägverzahnte Getriebe laufen im allgemeinen ruhiger als geradverzahnte; Stanznadeln mit Dachschriff (Bild) arbeiten leiser als solche mit senkrechter Schnittfläche [18].		
⑦ Hohe Präzision bei Herstellung und Montage sowie Spielfreiheit durch elastische Bauweise tragen zur Lärminderung bei! Oberflächenrauheiten sowie Form- und Lageabweichungen an Laufflächen (Bild), Spiel, Unwuchten u.ä. führen zum Auftreten nicht funktionsnotwendiger Kräfte und damit zu Körperschallanregung.		
⑧ Zum Realisieren von Übertragungs- und Stützfunktionen sind vorzugsweise elastische und/oder dämpfende Bauteile einzusetzen! Zahnriemengetriebe (Bild) sind günstiger als Zahnrad- oder Kettengertriebe; Gleitlager laufen in der Regel leiser als Wälzlager [16, 17].		
⑨ Nicht funktionsnotwendige Stoßstellen (Anschläge, Spiel in Gelenken) sind zu vermeiden oder zu minimieren! Häufig sind Anschläge oder spielbehaftete Bauteile dominierende Geräuschquellen in einem Gerät.		

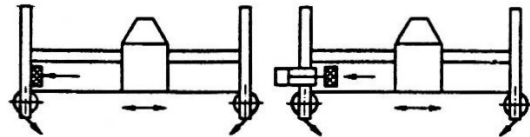
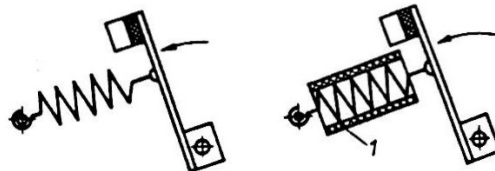
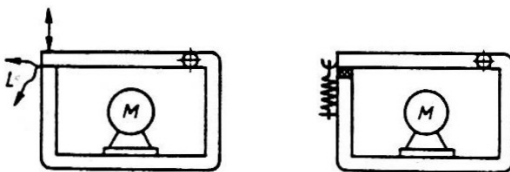
Tafel 7.10

Fortsetzung 3,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑩ <i>Stoßerzeugte Geräusche lassen sich wirksam nur an der Stoßstelle bekämpfen!</i> Stoßgeräusche werden im Gegensatz zu kontinuierlichen Geräuschen von der unmittelbaren Umgebung der Anregungsstelle stärker abgestrahlt. Außerdem sind körperschallisierende Maßnahmen (z.B. elastische Unterlage 1) nur auf einen Teil (höhere Frequenzen) des angeregten breiten Spektrums begrenzt. Deshalb sollten bevorzugt die anregenden Größen (z.B. m und v) beeinflusst werden.		
⑪ <i>Stoßgeräusche können durch Verringern der wirksamen Stoßmasse und der Auftreffgeschwindigkeit minimiert werden!</i> Das Produkt aus Stoßmasse und Auftreffgeschwindigkeit (Stoßimpuls) bestimmt die Höhe des konstanten Teils vom angeregten Spektrum, deshalb z.B. schwere Hebel durch leichte ersetzen, die durch geringere Kräfte beschleunigt werden.		
⑫ <i>Die Dauer der Kraftwirkung während eines Stoßes (Stoßdauer) sollte bei gleichzeitigem Verringern der Spitzenkraft verlängert werden!</i> Beim Stoß bewegter Massen ist das zeitliche Dehnen der Kraftwirkung im allgemeinen mit einer Senkung der Spitzenkraft verknüpft, und der angeregte Frequenzbereich wird dadurch eingeschränkt. Das Verlängern der Stoßdauer kann durch die Wahl des Werkstoffes, die Nachgiebigkeit der Berührungsflächen (z.B. elastische Zwischenlagen) und die Beeinflussung der effektiv wirksamen Masse erfolgen.		

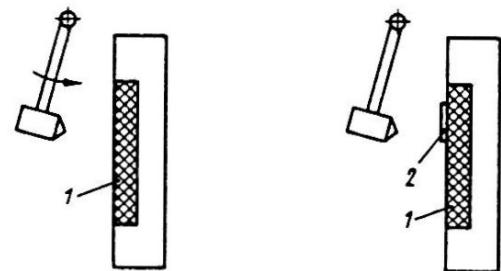
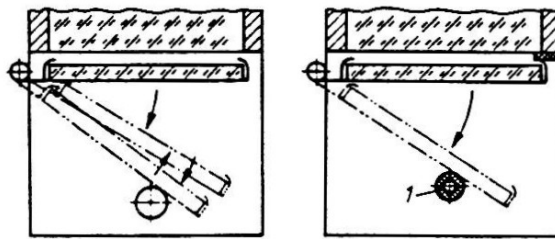
Tafel 7.10

Fortsetzung 4,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑬ Eine sehr große zeitliche Dehnung der Kraftwirkung ist nur durch zusätzliche Elemente realisierbar! In einigen Fällen (hohe Stoßenergie) läßt sich allein durch Verändern konstruktiver Parameter (Regel ⑪) die erforderliche große Dehnung nicht erzielen. Hier sind zusätzliche Mechanismen (pneumatische oder hydraulische Stoßfänger, Wirbelstrombremsen, spezielle Federkombinationen) einzusetzen, die die Stoßenergie langsam abbauen und gleichzeitig die Spitzenkraft herabsetzen; z.B. Endanschlag eines Mosaikdruckkopfes (Bild).		
⑭ Stoßstelle mit ausgeprägten Eigenresonanzen (langes Nachklingen) sind zu dämpfen! Dämpfungsmaßnahmen beeinflussen hauptsächlich die durch den Stoßimpuls angeregten Eigenresonanzen, weniger das Stoßgeräusch (Nachklingen gespannter Federn, z.B. vermeidbar durch dämpfende Umhüllung 1).		
⑮ Bei der Gestaltung des Geräteaufbaus ist das Auftreten "sekundärer" Stoßstellen (sog. Klapperstellen) zu vermeiden! Schwingungsfähige Bauteile (Abdeckbleche, Hebel), die selbst keine Wechselkräfte übertragen, können durch andere Stoß- oder Schwingungsquellen im Gerät zum Anschlagen (Klappen) angeregt werden. Diese Bauteile sind ebenso wie "primäre" Quellen (Regeln ⑨ und ⑫) zu gestalten.		

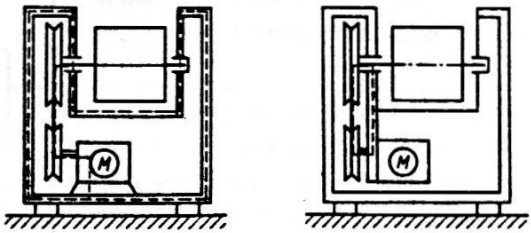
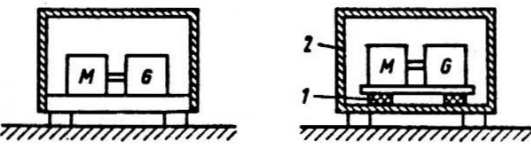
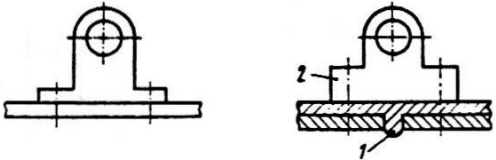
Tafel 7.10

Fortsetzung 5,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
①⑥ <i>An den Berührungsstellen von Stoßteilen sollte bevorzugt der Schichtaufbau Anwendung finden!</i> Bei akustisch günstig gestalteten Stoßstellen (kleine Berührungsflächen, weiche Materialien) wird oft die zulässige Flächenpressung überschritten. Einen akustisch-konstruktiven Kompromiß bildet der Schichtaufbau, bei dem man ein weiches Material 1 mit einer (dünnen) harten Oberfläche 2 versieht.		
①⑦ <i>Das Auftreten von Mehrfachstößen (Prellen) ist zu verhindern!</i> Die Spektren dicht aufeinanderfolgender Stöße (Prellen) überlagern sich zur Erhöhung des abgestrahlten Geräusches. Zum Vermeiden des Prellens gibt es verschiedene konstruktive Möglichkeiten (s. Abschnitt 6), z.B. elastisches Material 1 am 45°-Anschlag des Spiegels einer Spiegelreflexkamera.		

Tafel 7.11

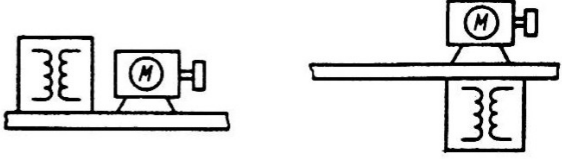
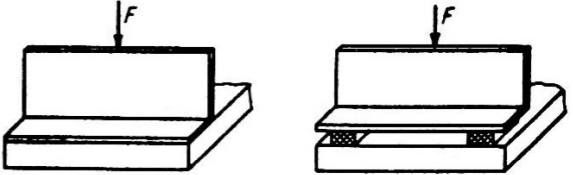
Regeln zur Verminderung
der Körperschallübertragung
und -ausbreitung,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① <i>Der Kraftschluß zwischen Bauteilen bzw. Baugruppen soll als direkte Verbindung und kurz gestaltet sein!</i> Der Kraftschluß (---) ist über kompakte und steife Teile mit minimaler Oberfläche zu führen, ohne dabei Außenflächen des Gerätes mit einzubeziehen. Dadurch werden die Voraussetzungen für eine Körperschallausbreitung bereits wesentlich eingeschränkt; im Bild z.B. beim Antrieb einer Trommelwaschmaschine.		
② <i>Zwischen den Teilen im Kraftschluß und dem Gehäuse bzw. den Gerätefüßen ist zur Körperschallisolierung eine möglichst weiche elastische Verbindung vorzusehen!</i> Die Körperschallisolierung 1 bei einer Motor-Getriebe-Baugruppe MG unterbricht den Körperschallfluß zu den Abstrahlflächen in Form des Gehäuses 2 bzw. verhindert die Körperschallanregung der Anstellfläche.		
③ <i>Als Befestigungspunkte für körperschall-erzeugende Baugruppen sind solche mit großer Impedanz bzw. geringer Admittanz zu wählen (Massenkonzentration, hohe Steifigkeit)!</i> Die Auswahl von Befestigungspunkten mit großer Impedanz bzw. geringer Admittanz bewirkt eine Fehlanpassung für den Körperschallfluß und führt dadurch zu einer Verringerung der Schnelle auf der Übertragungsstruktur (z.B. Versteifung 1 und Zusatzmasse 2).		



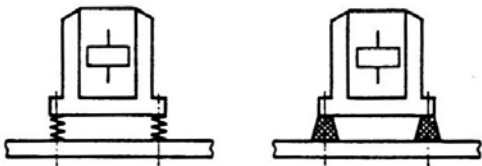
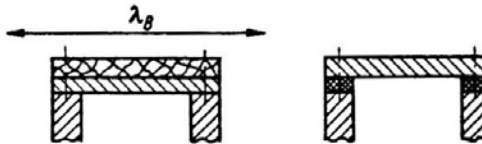
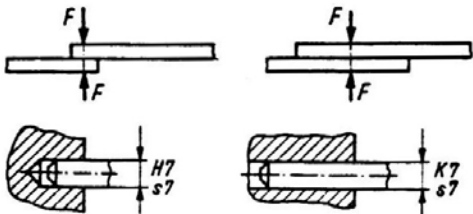
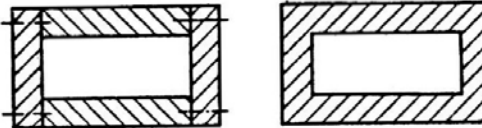
Tafel 7.11

Fortsetzung 1,
aus /38/

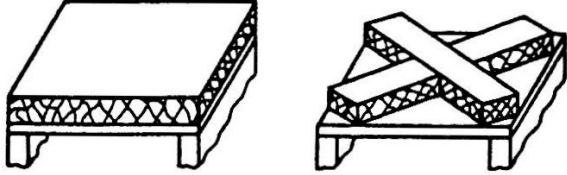
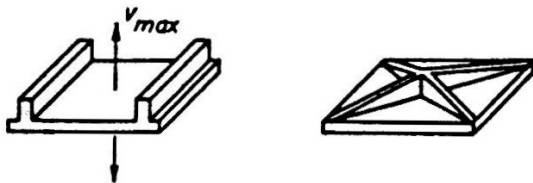
Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
④ <i>Starre und schwere Baugruppen, die selbst keine dominierende Körperschallquelle darstellen (z.B. Transformatoren, Akkus), sind nach Möglichkeit unmittelbar bei den wichtigsten Körperschallanregern anzuordnen!</i> Die Nutzung vorhandener Baugruppen als Zusatzmassen ist eine wirksame Methode zum Vermindern des Schnellepegels. Dagegen sind zusätzlich angebrachte Massen mit rein akustischer Funktion unökonomisch und gebrauchswertmindernd; im Bild zwei unterschiedliche Anordnungen eines Transformators.		
⑤ <i>Eine punktförmige Schwingungseinleitung sollte der linienförmigen Anregung vorgezogen werden!</i> Die Wirkung dieser Maßnahme beruht auf der Körperschalldämmung. Einschränkungen ergeben sich jedoch bei schwach gedämpften Materialien durch Verringern der Strukturdämpfung.		
⑥ <i>Zur Schwingungs- bzw. Körperschallisolation rein harmonischer Geräusche sind in erster Linie Stahlfedern einzusetzen!</i> Die Resonanzfrequenz des dabei entstehenden Feder-Masse-Systems darf höchstens 1/3 der tiefsten zu dämmenden Frequenz betragen. Praktische Körperschallpegelminderungen sind ab 6 dB akzeptabel. Bei entsprechender Dimensionierung können auch Werte von mehr als 20 dB erreicht werden. Eine Quelle harmonischer Geräusche ist z.B. durch einen Motor M gegeben.		

Tafel 7.11

Fortsetzung 2,
aus /38/

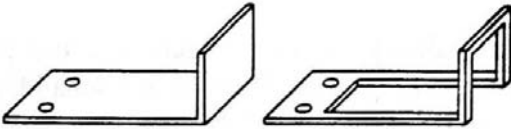
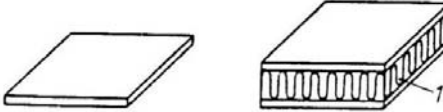
Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑦ Bei Impulsanregung sind für die Körperschallisolierung viskoelastische Elemente (Gummi o.ä.) zu verwenden! Zum Bedämpfen der bei Impulsvorgängen zwangsläufig angeregten Systemresonanz liegt der Verlustfaktor viskoelastischer Elemente in einem günstigen Bereich (im Bild: Montage eines Schützes auf der Schalttafel).		
⑧ Im Fall der Körperschallanregung ist eine zusätzliche Dämpfungserhöhung höchstens bei großen Blechteilen ($l \gg \lambda_B$) sinnvoll! Eine zusätzliche Bedämpfung erbringt keinen praktischen Nutzen, wenn der vorliegende Verlustfaktor bereits im Bereich des optimalen liegt oder wenn die Teile verhältnismäßig klein sind ($l < \lambda_B$). Die beiden letztgenannten Bedingungen liegen in der Feinwerktechnik meistens vor (im Bild: Lärminderungsmaßnahmen an einer abstrahlenden Gehäusefläche).		
⑨ Kraftschlüssige Verbindungen sind gegenüber stoffschlüssigen zu bevorzugen! Vernietete oder verschraubte Baugruppen weisen überwiegend ein optimales Dämpfungsvermögen auf. Sie sind daher günstiger als verschweißte oder gegossene Strukturen, bei denen eine zusätzlich notwendige Erhöhung des Verlustfaktors den Fertigungsaufwand vergrößern würde [16].		
⑩ Die Verbindung zweier Teile sollte großflächig und mit kleiner mittlerer Flächenpressung gestaltet werden! Preßpassungen mit unnötig großem Übermaß sind demzufolge zu vermeiden, weil dadurch auch der Verlustfaktor dieser Verbindungsstelle geringer wird.		

Tafel 7.11
Fortsetzung 3,
aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑪ <i>Dämpfungsmaßnahmen sind an Orten der größten Schwingamplituden am wirkungsvollsten!</i> Ein körperschallerregtes flächiges Bauteil sollte nur an einigen Stellen mit großer Schwingbewegung bedämpft werden. Ein ganzflächiges Entdröhnen bringt keine merkliche Verbesserung mehr und ist daher unökonomisch (im Bild: zwei Möglichkeiten zum Entdröhnen eines Abdeckbleches mit gleicher Wirkung).		
⑫ <i>Die körperschalldämpfende Wirkung von Doppelblechen kommt der von Kunststoffen nahe!</i> Der Verlustfaktor von Doppelblechen liegt infolge der Luftverdrängung zwischen den Blechen etwa in der Größenordnung des Verlustfaktors von Kunststoffen und damit im optimalen Bereich. Doppelbleche können dort eingesetzt werden, wo Kunststoffe versagen (z.B. hitzebeständige Bauteile).		
⑬ <i>Die Anwendung von Versteifungen, wie unsymmetrische Verrippung, Sicken oder gekrümmte Oberflächen, tragen zum Verringern der mittleren Schnelle bei!</i> Die Maßnahme kann trotz Vergrößern des Abstrahlgrades (siehe Regel ③ in Tabelle 5-4) bei krafterregten Strukturen akustische Vorteile bringen. Bei mehreren, parallel angeordneten Rippen sollte deren Abstand zueinander unterschiedlich groß gewählt werden. Zum Vermeiden von hohen Spitzen des Schnellepegels sind Versteifungen auch örtlich begrenzt einsetzbar [18].		

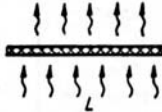
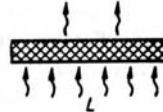
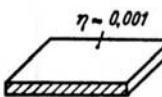
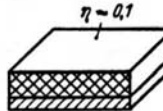
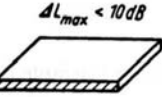
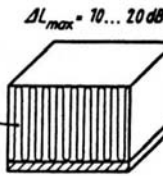
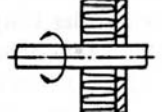
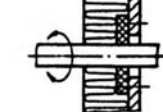
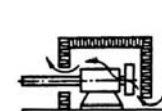
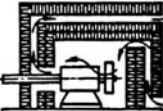
Tafel 7.12

Regeln zur Verminderung der Schallabstrahlung, aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① Die Oberfläche von Bauteilen sollte so klein wie möglich gehalten werden. Dadurch verringert sich der Abstrahlgrad σ besonders bei tiefen Frequenzen! Die lärm mindernde Wirkung beruht auf der Ausnutzung des akustischen Kurzschlusses (Druckausgleich an Vorder- und Rückseite).		
② Große körperschallerregte Flächen sind zur wirkungsvollen Verringerung der Schallabstrahlung mit Durchbrüchen zu versehen! Die Verringerung der Schallabstrahlung ist analog Regel ① auf den Einfluß des akustischen Kurzschlusses zurückzuführen. Anzustreben ist ein Öffnungsflächenanteil von etwa 20 % (z.B. bei Grundplatte 1). Einschränkungen erfährt diese Maßnahme bei Ausnutzen solcher flächenhaften Bauteile zur Luftschalldämmung (s. Tabelle 5-5).		
③ Zum Verringern des Abstrahlgrades σ durch Erhöhen der BiegeWellengrenzfrequenz sollen die Bauteile biegeweich und schwer sein! Dies gilt besonders für schnelleerregte Strukturen (z.B. Gehäuseteile) und kann durch Anbringen von biegeweichen und schweren Belägen oder durch Nuten in Platten erreicht werden.		
④ Durch Aufbringen von schallabsorbierendem Material 1 in Verbindung mit einer Schalldämmschicht (z.B. schwere Folie) läßt sich der abgestrahlte Luftschall direkt an der Entstehungsstelle verringern! Es handelt sich hierbei um eine Vorstufe zum Kapseln, so daß prinzipiell die Gesetzmäßigkeiten der Luftschalldämmung und -absorption gelten.		

Tafel 7.13

Regeln zur Verminderung der Luftschallausbreitung, aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① Die Schalldämmung wächst mit zunehmender Dichte und Dicke des Dämmmaterials sowie mit der Frequenz! Bei Verdoppeln der Wanddicke oder der Frequenz erhöht sich die Schalldämmung um rd. 6 dB.		
② Die Schalldämmung von Materialien mit geringem Verlustfaktor kann durch Entdröhnen (z.B. Beschichtung mit Phon-Ex) verbessert werden! Diese Maßnahme ist anwendbar, solange der optimale Verlustfaktor nicht erreicht ist.		
③ Zum Ausnutzen der möglichen Schalldämmung muß die Luftschallenergie im Inneren der Kapsel in andere Energieformen umgewandelt werden! Die Wirkung poröser Absorberschichten beruht vorrangig auf der Reibung zwischen Luftteilchen und Gewebefasern. Je tiefer die zu absorbierende Frequenz ist, um so größer muß die Dicke der Auskleidung sein (z.B. bei 200 Hz und $\alpha \approx 0,5$ etwa 100 mm!)		
④ Öffnungen verringern die Dämmwirkung einer Kapsel erheblich und müssen vermieden werden! Nicht notwendige Öffnungen wie Fugen, Gehäusedurchführungen u.ä. sollten abgedichtet sein. Ab 10 % Öffnungsflächenanteil ist die Anwendung von Kapseln nicht mehr sinnvoll [9].		
⑤ Bei größeren Geräten können Öffnungen zum Be- und Entlüften mit schallabsorbierenden Kanälen versehen werden! Der dafür notwendige Platzbedarf richtet sich nach dem zu dämpfenden Frequenzbereich sowie nach der erforderlichen Kühlluftmenge [9, 13].		
⑥ Zum Vermeiden einer Körperschallanregung der Kapselwände sind diese von schwingenden Teilen elastisch zu isolieren! Diese Forderung gilt nicht nur für das Ankoppeln an das Chassis, sondern auch für Bauteile, die durch die Kapselwände nach außen geführt werden müssen.	