

# Lärmemission und Lärmschutz in verfahrenstechnischen Anlagen

- 1 Einleitung
- 2 Physikalische Grundlagen und Definitionen
  - 2.1 Schallwellen und Lärm
  - 2.2 effektiver Schalldruck
  - 2.3 Schalleistung
  - 2.4 Schallintensität und Schallenergiedichte
  - 2.5 Hörschwelle und Schmerzgrenze
  - 2.6 Schalldruckpegel und Schalleistungspegel [dB]
  - 2.7 Lautstärkepegel [phon]
  - 2.8 Frequenzbewertung [db(A)]
  - 2.9 Lautheit [sone]
  - 2.10 Schalldämm-Maß (Berger'sches Gesetz)
  - 2.11 Rechenoperationen mit Schalldruckpegeln bei mehreren Schallquellen
- 3 Gesetzliche Vorschriften und Immissionsrichtwerte
- 4 Lärmemissionen und Lärmschutzmaßnahmen
  - 4.1 Übersicht
  - 4.2 Chemieanlagen
    - 4.2.1 Einzelschallquellen
      - 4.2.1.1 Elektromotoren
      - 4.2.1.2 Dampfturbinen, Getriebe
      - 4.2.1.3 Ventilatoren, Verdichter
      - 4.2.1.4 Dampfstrahl-Vakuum-Anlagen, Pumpen
      - 4.2.1.5 Luftkühler, Kühltürme
      - 4.2.1.6 Prozeßöfen
      - 4.2.1.7 Fackeln
      - 4.2.1.8 Stellglieder, Rohrleitungen
      - 4.2.1.9 Sonstige Geräuschquellen
    - 4.2.2 Gesamtanlagen
- 5 Schallausbreitung
  - 5.1 Schallausbreitung im Freien
    - 5.1.1 Wettereinflüsse
    - 5.1.2 Schallausbreitungsgleichung

## 1 Einleitung

Lärm: Unerwünschter, störender oder gesundheitsschädlicher  
Schall ⇒ Lärm ist mit einem subjektiven Empfinden verknüpft

Schallquelle: Lärmemission

Einwirkung von Schall auf den Aufenthaltsort der Menschen:  
Lärmimmission

Die Intensität und Einwirkungsdauer von Lärm hat in den letzten Jahrzehnten erheblich zugenommen. Außerdem erstreckt sich das zunehmende Umweltbewußtsein der Bürger (allmählich) auch auf den Lärm. ⇒ Klagen über Lärmbelästigungen haben stark zugenommen:

Nach Meinungsumfragen fühlten sich in der BRD lärmgestört:

1962: 29 % aller Haushalte

1969: 43 % aller Haushalte

1972: 61 % aller Haushalte

Lärmschwerhörigkeit: (in BRD) am 28. 4. 1961 erstmals als Berufskrankheit anerkannt

1973: Lärmschwerhörigkeit ist dritthäufigste Berufskrankheit

seit 1977: die Zahl der erstmals entschädigten Lärmschwerhörigkeitsfälle ist größer als die Gesamtzahl aller Berufskrankheiten

1980: > 50 000 angezeigte Fälle p. a. (BRD)

1976 (BRD):  $2 \cdot 10^6$  Männer und Frauen  
und 20 000 Kinder } gehörgeschädigt

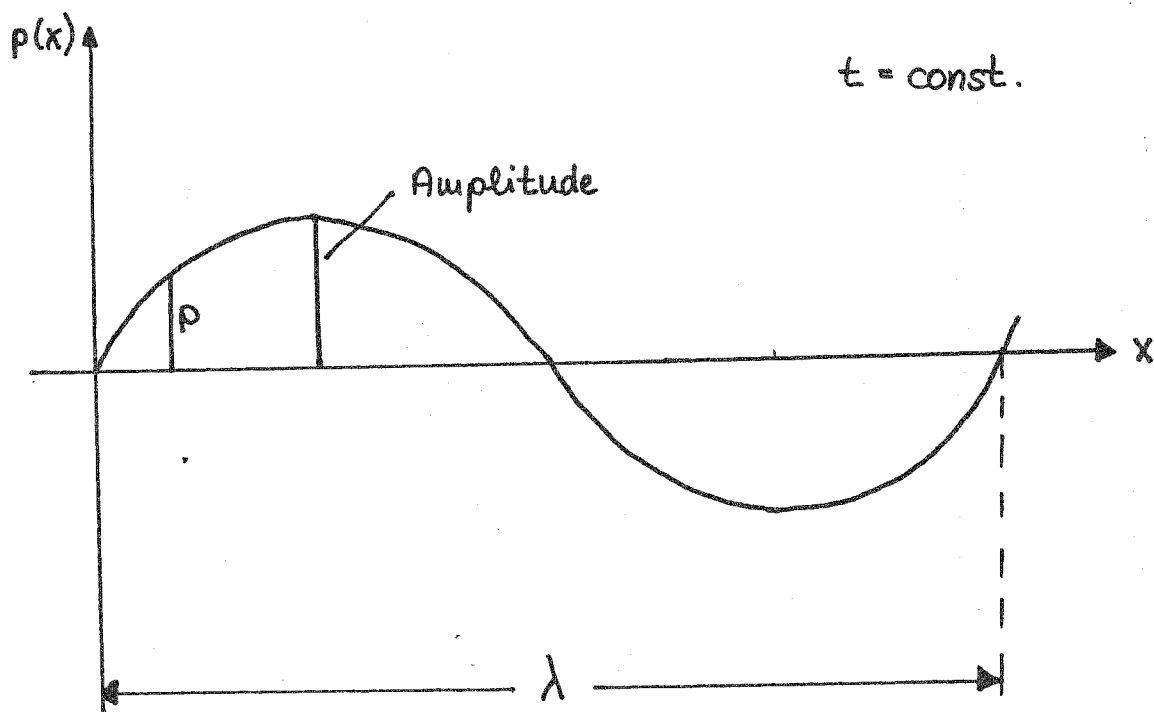
1987 (BRD):  $9 \cdot 10^6$  Männer und Frauen: gehörgeschädigt

Bisher: kein Heilverfahren bekannt, das einen Gehörschaden beheben kann; allerdings gibt es Hörgeräte ( $\approx 1.2 \cdot 10^6$ )

## 2 Physikalische Grundlagen und Definitionen

### 2.1 Schallwellen

Schwingende gasförmige, flüssige und feste Stoffe emittieren und übertragen Schallwellen. Sie bewirken Luftdruckschwankungen, die dem atmosphärischen Luftdruck überlagert sind. Eine Schallwelle ist charakterisiert durch:



$$c = v \cdot \lambda$$

Die Schallwelle breitet sich mit der Schallgeschwindigkeit  
 $C = f(p, T, \text{Stoff})$  aus:

$$C (1 \text{ bar}, 20^\circ\text{C}, \text{Luft}) = 343.6 \text{ m/s}$$

$$C (1 \text{ bar}, 25^\circ\text{C}, \text{H}_2\text{O}) = 1497 \text{ m/s}$$

$$C (1 \text{ bar}, 20^\circ\text{C}, \text{Al}_2\text{O}_3) = 9600 \text{ m/s}$$

Infraschall . . . . . 16 bis 16 000 Hz . . . . . Ultraschall

20 000 Hz

menschl. Hörbereich: 3 Zehnerpotenzen!

$$f_{\text{max}} = f(\text{Alter}); I_{\text{max}} = 3000 \text{ bis } 4000 \text{ Hz}$$

Form der Wellen:

ebene Wellen, Kugelwellen, Zylinderwellen u. a. sowie beliebige Formen durch Interferenzphänomene (z. B. zwischen ursprüngl. und reflektierenden od. gebeugten Schallwellen)

nur Longitudinal-Wellen: in Gasen und Flüssigkeiten

Longitudinal- u. Transversalwellen: nur in Feststoffen

Töne, Klänge:

period. Schallphänomene

Geräusche, Rauschen:

aperiodische, statistische Schallphänomene

Lärm:

aperiod. Schallereignis mit breitem Frequenzbereich und wechselnden Schallstärken  $I$

→ **Abschnitt 3**

Lärmpegel:

Summe aller Geräusche

## 2.2 effektiver Schalldruck $p_{\text{eff}}$ (mittl. Schalldruckquadrat):

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_s} \cdot \int_0^{t_s} p^2(t) dt} \quad \text{in} \quad \text{Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

(1)

$p(t)$  : zeitabhängiger Schalldruck

$t_s$  : Integrationszeit

### 2.3 Schalleistung N

$$N = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho \cdot c} A \quad \text{in [W]} \quad (2)$$

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : Dichte des Ausbreitungsmediums  
 $c$  (m/s) : Schallgeschwindigkeit  
 $A$  (m<sup>2</sup>) : vom Schall durchsetzte Fläche

### 2.4 Schallintensität I (Schallstärke) und Schallenergiedichte E<sub>v</sub>

$$I = \frac{N}{A} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho \cdot c} \quad \text{in (W/m}^2\text{)} \quad (3)$$

$$E_v = \frac{I}{c} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho \cdot c^2} \quad \text{in (J/m}^3\text{)} \quad (4)$$

### 2.5 Hörschwelle und Schmerzgrenze

Das menschliche Gehör empfindet eine akustische Welle als Tonhöhe, die ziemlich genau mit der Frequenz  $\nu$  der Schallwelle übereinstimmt, und als Lautstärke, die kompliziert von  $p_{\text{eff}}$  bzw.  $I$  und von  $\nu$  abhängt.

$\nu$  groß: hohe Töne

$\nu$  klein: tiefe Töne

Hörschwelle:  $p_{\text{eff},u}(1000 \text{ Hz}) = p_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ bar}$  : Bezugsschalldruck  
*Vom menschlichen Ohr gerade noch wahrgenommen (u = unterste)*

bzw.

$$I_u = I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{: Bezugsschallintensität}$$

Amplitude des Trommelfells:  $\approx 1.7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}$  ( $\approx 1/10$  Moleküldurchmesser)

bei  $p'_0 = 2 \cdot 10^{-11} \text{ bar}$ : Brown'sche Molekularbewegung wäre hörbar!

Schmerzgrenze:

$$P_{\text{eff, ob}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ bar} + f(\nu)$$

bzw.

$$I_{\text{ob}} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (\text{ob.} \equiv \text{oberste})$$

⇒ das menschl. Ohr hat also sehr weite Empfindlichkeitsgrenzen:  
zwischen  $I_u = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  und  $I_{\text{ob}} = 1 \text{ W/m}^2$ , d. h. 12 Zehnerpotenzen

## 2.6 Schalldruckpegel $L_p$ und Schalleistungspegel $L_w$

$$L_p \equiv 10 \lg \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{P_{\text{eff}}}{P_0} \equiv 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{in(dB)} \quad (5a)$$

$$L_w = 10 \lg \frac{N}{N_0} \quad \text{in(dB)} \quad (5b)$$

Die "Einheit" der Pegel geht auf G. Bell zurück und wird als dezi-Bel (1/10 Bel) angegeben:

$$\underline{I/I_0 = 10} \Rightarrow \lg I/I_0 = \lg 10 = 1 \text{ Bel} = 10 \text{ dezi-Bel} = \underline{10 \text{ dB}}$$

In der chemischen Technik:

$$1 \leq I/I_0 \leq 10^{14}$$

$$1 \leq P_{\text{eff}}/P_0 \leq 10^7 \Rightarrow$$

$$0 \text{ dB} \leq L_p \leq 140 \text{ dB}$$

$$1 \leq N/N_0 \leq 10^{14}$$

menschliches Gehör:

$$\text{Hörschwelle } (p_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ bar})$$

$$\text{Schmerzgrenze } (p_{\text{ob}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ bar}) \Rightarrow$$

$$0 \text{ dB} \leq L_p \leq 120 \text{ dB}$$

### Bedeutung von $L_p$ :

- kann mit Schallpegelmessger gemessen werden

$$- L_p = f(v)$$

- Lautstärkeempfindung ist  $\sim \lg p_{\text{eff}}$  (Weber-Fechner Gesetz)

Schallintensitätsverhältnis	Schalldruckpegel
$I/I_0$	$L_p = 10 \lg I/I_0$
1,26 (bzw. $1,26^{-1} \approx 0,79$ )	( $\pm$ ) 1 dB
1,59 (bzw. $1,59^{-1} \approx 0,63$ )	( $\pm$ ) 2 dB
2 (bzw. $2^{-1}$ )	( $\pm$ ) 3 dB
3,2 (bzw. $3,2^{-1} \approx 0,31$ )	( $\pm$ ) 5 dB
5 (bzw. $5^{-1}$ )	( $\pm$ ) 7 dB
10 (bzw. $10^{-1}$ )	( $\pm$ ) 10 dB
50 (bzw. $50^{-1}$ )	( $\pm$ ) 17 dB
$10^2$ (bzw. $10^{-2}$ )	( $\pm$ ) 20 dB

Tab.1: Zusammenhang zwischen Schallintensität und Schalldruckpegel nach Gl. (5a)

### 2.7 Lautstärkepegel $L_N$

$L_N = f(v, p_{\text{eff}})$  eines beliebigen Geräusches wird durch Vergleich mit einem Standard-1000 Hz-Sinuston, dessen Schall<sup>druck</sup>pegel  $L_p$  (1000 Hz) variiert werden kann, bestimmt. Wird beidohrig gleichlaute Empfindung festgestellt, dann ist:

$$L_N(1000 \text{ Hz}) \equiv L_p(1000 \text{ Hz}) = 20 \lg \frac{p_{\text{eff}}(1000 \text{ Hz})}{p_0} \quad (6)$$

$\Rightarrow$  für  $v = 1000 \text{ Hz}$ : Phon  $\equiv$  dB; keine Korrektur (durch Filter)

$L_N(1000 \text{ Hz})$ : Lautstärkepegel des zu bestimmenden Geräusches in Phon.  
 $\hookrightarrow$  subjektive Schallwahrnehmung

$L_p(1000 \text{ Hz})$ : Schalldruckpegel des 1000 Hz Standard-Tones in dB.

$p_{\text{eff}}(1000 \text{ Hz})$ : Schalldruck des zu bestimmenden Geräusches, das als gleichlaut empfunden wird als der 1000 Hz-Standard-Ton.

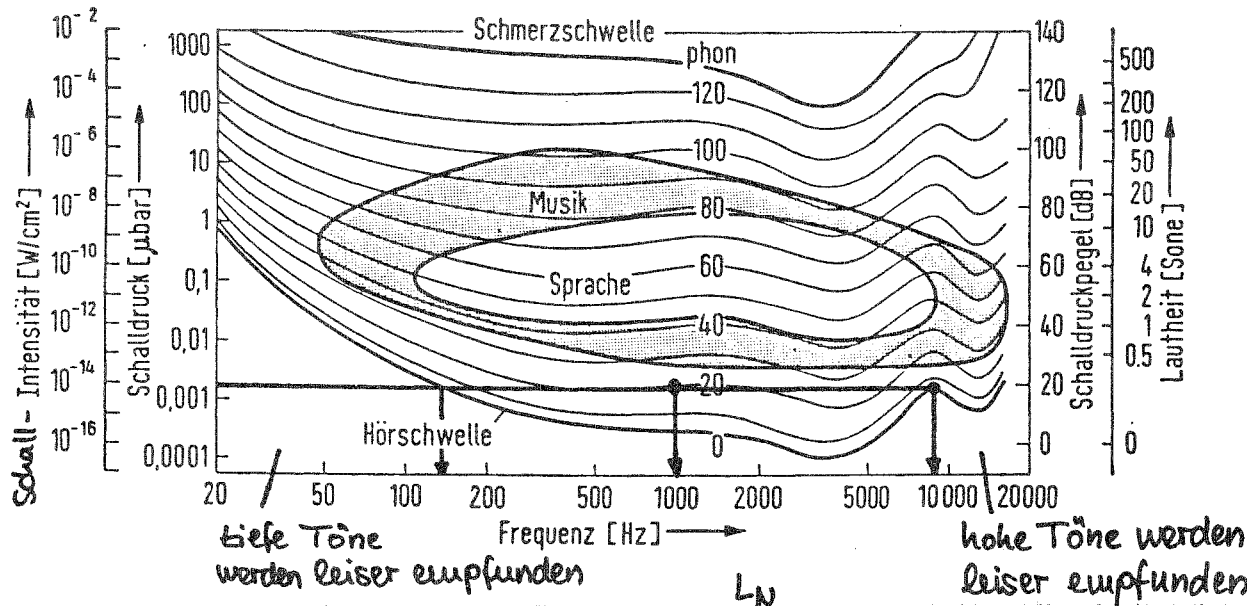


Abb.1: Kurven gleicher Lautstärkepegel (in Phon) in Abhängigkeit der Schallfrequenz.

Erfahrung zeigt:  $\Delta L_N = \pm 1$  Phon : gerade noch wahrnehmbar

für  $L_N > 40$  Phon:  $\Delta L_N = \pm 7$  bis 10 Phon : Verdopplung bzw. Halbierung der Lautstärke (Lautheit S)

(a)

2.8 Frequenzbewertung des Schalldruckpegels:

(v)

Mit der Frequenzbewertungskurve A in Abb.2 wird die frequenzabhängige Hörempfindung objektiviert:

für  $\nu \neq 1000$  Hz : Phon  $\approx$  dB(A) : Korrektur durch Filter erforderlich

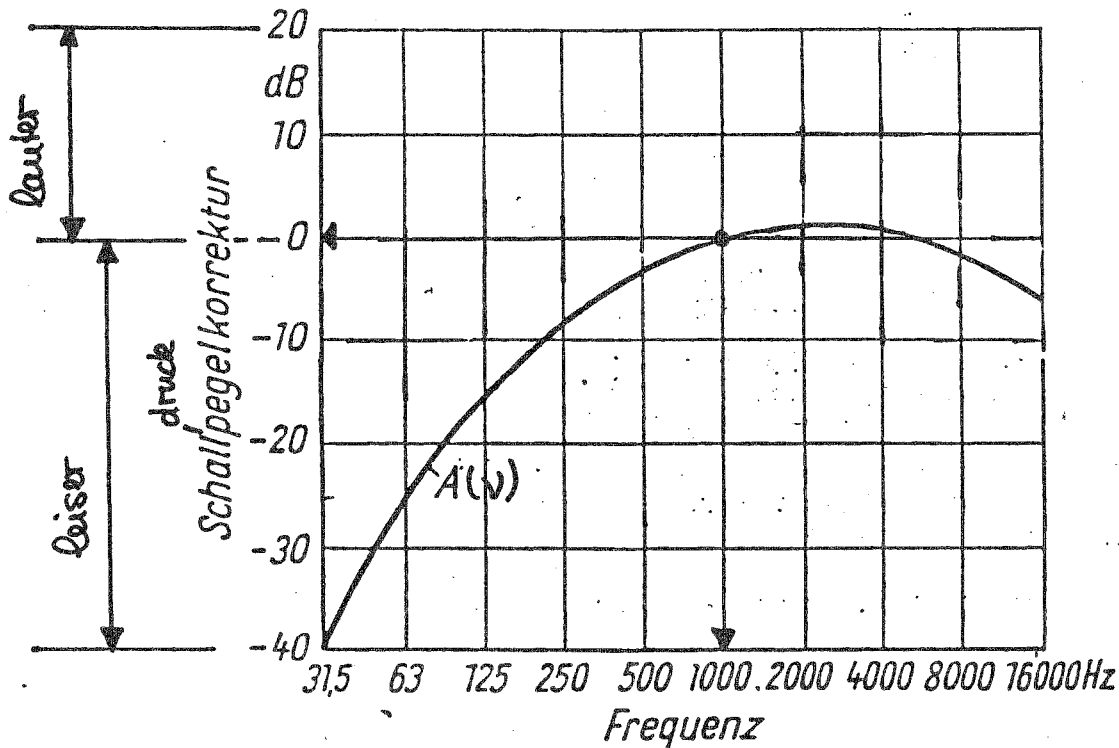


Abb.2: Frequenzbewertungskurve A (A-Filter)

Es gibt auch B-, C- und D-Filter  $\rightarrow$  dB(B), dB(C) und dB(D)  
 Bei breitbandigen Geräuschen: Ausmessen bestimmter Frequenzintervalle  $\Rightarrow$  Terz- und/oder Oktavbandfilter

Zeitbewertung:  $t_s = 1000 \text{ ms}$  (Slow):  $L_{p,S}$  in dB(A<sub>S</sub>): langsame Schallvorgänge

$t_s = 125 \text{ ms}$  (Fast):  $L_{p,S}$  in dB(A<sub>F</sub>): Schallvorgänge  $> 200 \text{ ms}$

$t_s = 35 \text{ ms}$  (Impulse):  $L_{p,S}$  in dB(A<sub>I</sub>): (impulsartige) Schallvorgänge  $< 200 \text{ ms}$

A-bewerteter Schalldruckpegel  $L_{p,A}$

$$L_{p,A} = 20 \lg \frac{P_{\text{eff},A}}{P_0} \quad \text{in dB(A)} \quad (7)$$

$P_{\text{eff},A}$ : frequenzbewerteter Schalldruck

Erfahrung zeigt:

$\Delta L_{p,A} = \pm 10 \text{ dB(A)}$	: Verdopplung bzw. Halbierung der Lautheit
---	--

(b)

$\Delta L_{p,A} = \pm 3 \text{ dB(A)}$  : gerade noch wahrnehmbar

aus (a) und (b) folgt:

$\text{dB(A)} \approx \text{phon}$
------------------------------------

## 2.9 Lautheit $S'$ (in Sone).

$$S' \approx 2^{\frac{L_N - 40}{10}} \approx 2^{\frac{L_p - 40}{10}} \quad (8)$$

⇒

$L_N$ Phon	$\Delta L_N$ Phon	$S'$ Sone	$\Delta L_p$ dB	$I/I_0$
40	0	1	0	1
50	10	2	10	10
60	20	4	20	100

## 2.10 Schalldämm-Maß R:

$$R = 10 \lg \frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{trans}}} \quad [\text{dB}]$$

$N_{\text{in}}$  : auffallende Schalleistung

$N_{\text{trans}}$  : durchgelassene

z. B.:  $R = 20 \text{ dB}$ : schwache Schalldämmung

$R = 50 \text{ dB}$ : gute Schalldämmung

Massengesetz der Luftschalldämmung:

(Berger'sches Gesetz)

$$R = 10 \cdot \lg \left( \frac{\pi^2 \nu^2 m_A^2}{\rho_L^2 c^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

$$\sim \lg m_A^2$$

$\nu$  : Schallfrequenz

$m_A$  : flächenbezogene Masse ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$\rho_L$  : Dichte der Luft L

$c$  : Schallgeschw.

Zu 2.11

Bei  $n$  voneinander unabhängigen, zeitlich konstanten Schallquellen addieren sich deren Schallenergiedichten  $E_{v,i}$  zur Gesamtenergiedichte  $E_{v,\text{ges}}$ :

$$E_{v,\text{ges}} = \sum_{i=1}^n E_{v,i} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{c}$$

oder bezogen auf  $E_{v,0} \equiv \frac{I_0}{c}$  :

$$\frac{E_{v,\text{ges}}}{E_{v,0}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0} = \frac{I_{\text{ges}}}{I_0}$$

$$\rightarrow \boxed{I_{\text{ges}} \equiv \sum_{i=1}^n I_i}$$

Für den Schalldruckpegel  $L_{p,\text{ges}}$  von  $n$  Schallquellen gilt also:

$$L_{p,\text{ges}} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0} = 10 \lg \sum_{i=1}^n I_i / I_0 \quad (10a)$$

Nach Gl. (5a) gilt:

$$L_{p,i} = 10 \lg \frac{I_i}{I_0} \quad \text{oder} \quad \frac{I_i}{I_0} = 10^{(0,1 L_{p,i})} \quad (10b)$$

(10b) in (10a) ergibt:

$$L_{p,ges} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{(0,1 L_{p,i})} \quad \text{in (dB)} \quad (11a)$$

oder bei n Schallquellen mit gleichen Pegeln  $L_{p,i} \equiv L$ :

$$\boxed{L_{p,ges} = L + 10 \lg n} \quad (11b)$$

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \lg [10^{0,1L} + 10^{0,1L} + \dots + 10^{0,1L}] = 10 \cdot \lg (n \cdot 10^{0,1L}) \\ = 10 \cdot \lg n + \underbrace{10 \cdot \lg 10^{0,1L}}_L$$

Beispiele für Gl. (11b):

a)  $L_{p,1} = 80 \text{ dB}$

$L_{p,2} = 80 \text{ dB} \implies L_{p,ges} = 80 \text{ dB} + (10 \cdot \lg 2) \text{ dB} = 83 \text{ dB}$

Die Addition zweier Schallquellen mit je 80 dB ergibt also 83 dB!

b)  $n = 2; L_{p,1} = L_{p,2} = 0 \text{ dB} \implies L_{p,ges} = (0 + 10 \cdot \lg 2) \text{ dB} = 3 \text{ dB}$

Die Addition zweier Schallquellen mit je 0 dB ergäbe also 3 dB!

Zu 3:

1974: BImSchG

1968: TA Lärm: Novellierung gefordert

**Tab. 1A** Immissionsrichtwerte nach Nr. 2.321 TA Lärm

a) Gebiete, in denen nur gewerbliche oder industrielle Anlagen und Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (Industriegebiete nach § 9 BauNVO [65])	70 dB(A)
b) Gebiete, in denen vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (Gewerbegebiete nach § 8 BauNVO)	tagsüber 65 dB(A) nachts 50 dB(A)
c) Gebiete mit gewerblichen Anlagen und Wohnungen, in denen weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (Kerngebiete, Mischgebiete, Dorfgebiete nach §§ 7, 6, 5 BauNVO)	tagsüber 60 dB(A) nachts 45 dB(A)
d) Gebiete, in denen vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete, Dorfgebiete nach §§ 4, 2, 5 BauNVO)	tagsüber 55 dB(A) nachts 40 dB(A)
e) Gebiete, in denen ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (reine Wohngebiete nach § 3 BauNVO)	tagsüber 50 dB(A) nachts 35 dB(A)
f) Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten (Kurgebiete, Klinikgebiete nach § 11 BauNVO)	tagsüber 45 dB(A) nachts 35 dB(A)
g) Wohnungen, die mit der Anlage baulich verbunden sind	tagsüber 40 dB(A) nachts 30 dB(A)

1973

VDI-Richtlinie 2058, Bl. 1/3

1981

1974 UVV Lärm (Unfallverhütungvorschrift)

1975 ArbStättV (Arbeitsstättenverordnung)

1979 NEUES VLärmSchG (Verkehrslärmschutzgesetz) in Diskussion:

Dabei werden zunächst folgende Immissionsgrenzwerte in [dB (A)] genannt:

	Tag	Nacht
- reine, allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete	65	55
- Kerngebiete, Dorfgebiete, Mischgebiete und besondere Wohngebiete	70	60
- Gewerbegebiete und Industriegebiete	75	65

Lärmverminderung: noch große Zukunftsaufgaben

Tab. 2: Lautstärke von Lärmquellen

Geräuschart	Dezibel (dB)
Hörschwelle	0
Flüstersprache, Blätterrauschen	10– 20
Mittlere Wohngeräusche	40
Unterhaltungssprache	50
Kopfschmerzenbeginn	65
Verkehrsstraße	70– 80
Schädigungsgrenze (Hör- und Gleichgewichtsstörungen)	80– 90
Motorfahrzeuge	80– 90
Flughafenverkehr (Umkreis einige km)	70–100
Preßlufthammer in 2 m Entfernung	90–100
Beatmusik bis	115
Düsenmotor (im Prüfstand)	110–160
Schmerzgrenze	120
Schußknall	170

### Beispiele von Lautstärkepegeln (Phonskala nach DIN)

4 phon	(Untere Grenze der Hörbarkeit, Reiz- oder Hörschwelle)
10 phon	Taschenuhrticken, leises Flüstern
20 phon	Sprechen im Nachbarraum, leises Blätterrauschen, ruhiger Garten
30 phon	normales Flüstern, sehr ruhige Straße ohne Verkehr
40 phon	Leises Sprechen, Zerreißen von Papier, ruhiger Arbeitsraum
50 phon	Sprechen (Umgangssprache), ruhige Straße, laufender Wasserhahn
60 phon	Staubsauger, kräftige Sprache, Verkehrsstraße
70 phon	Personenkraftwagen, Radio in Zimmerlautstärke, Sprache am Telefon (Unterhaltung auf 3 m gut möglich)
80 phon	Schreien, Personenzug, Motorrad mit Schalldämpfer (Unterhaltung auf 2,5 m möglich), laute Radiomusik, U-Bahn
90 phon	Lastkraftwagen auf Steigung (Unterhaltung auf 1,5 m möglich), Textilmaschi- nensaal, Autohupe, Preßluftbohrer
100 phon	Verkehrsflugzeuge, Motoren ohne Schalldämpfer (Unterhaltung auf 0,5 m mit großer Anstrengung möglich), Lastkraftwagen
110 phon	Starktonhorn für Polizei usw. (in 7 m Abstand); Schmerzschwelle bei hohen Tönen
120 phon	Großflugzeuge (in 3 m Entfernung), Niethämmer (Unterhaltung unmöglich; Schmerzempfindung im Ohr für Normalton)
140 phon	Düsentriebwerk. Schmerzschwelle für tiefe Töne

Das Ohr kann gerade einen Unterschied von 1 Phon wahrnehmen. Eine Änderung um 8 bis 10 Phon entspricht etwa einer Verdoppelung der Lautheit.

$\pm 10$  dB (A) bedeutet ( $\rightarrow$  Gl. (8))

Zunahme }  
Abnahme } der Schallintensität  $I$  um das Zehnfache ( $I/I_0 = \pm 10$ )

und

Verdopplung }  
Halbierung } der Lautheit  $S$  ( $S = 2$  bzw.  $1/2$ )

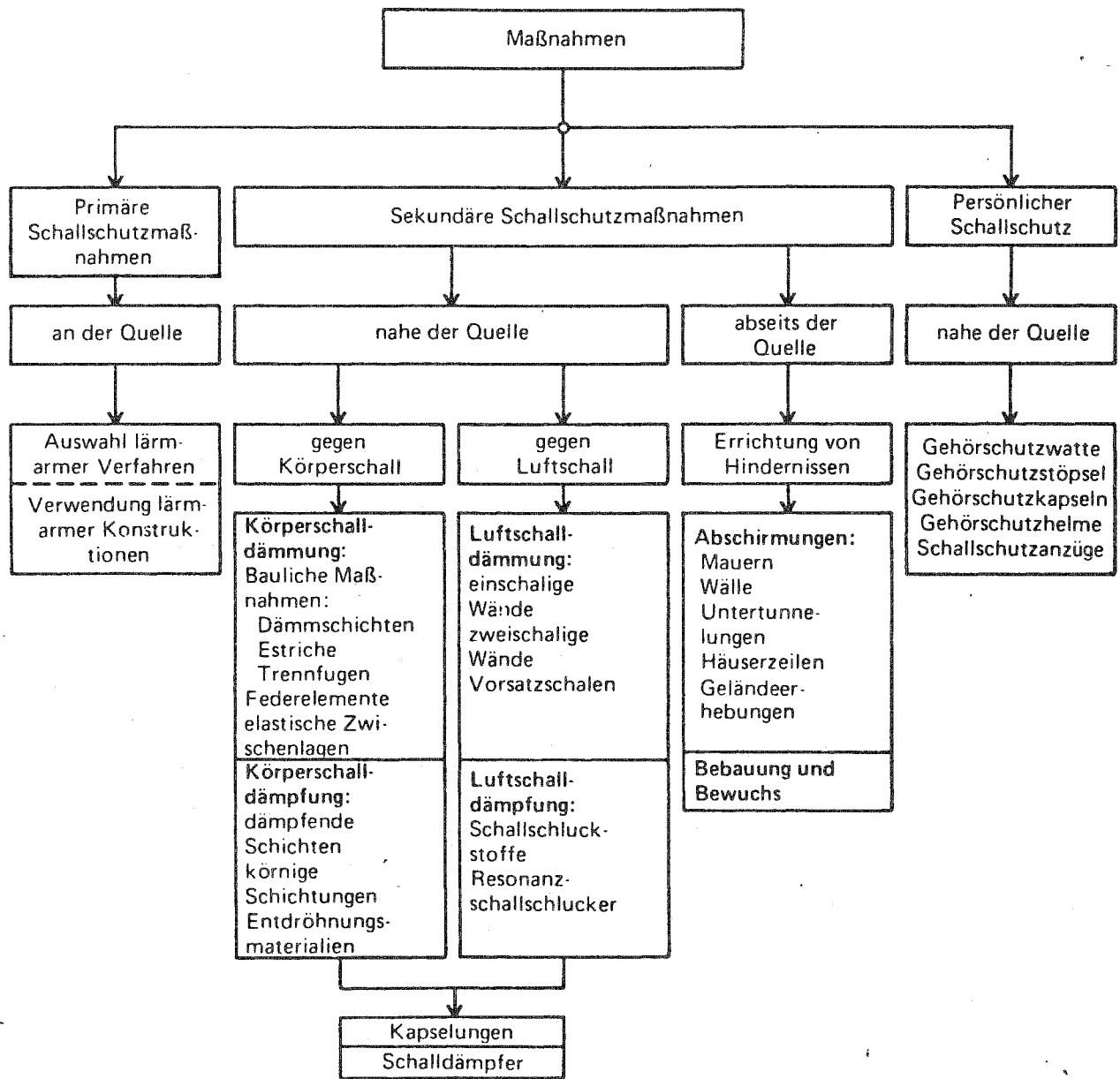


Abb. 3: Technische Maßnahmen zum Schutz gegen Lärm

#### 4.2.1 Einzelschallquellen

##### 4.2.1.1 Elektromotoren:

insbes. durch das Kühlluftsystem bestimmt: innen- und oberflächengekühlt

Der A-bewertete Schalleistungspegel  $L_{W,A}$  eines Elektromotors berechnet sich aus der Nenndrehzahl  $n$  und der Nennleistung  $N_e$  nach

$$L_{W,A} = 10 + 10 \lg \frac{N_e}{N_{e,o}} + 20 \log \frac{n}{n_o} \quad \text{in dB(A)}$$

mit  $N_{e,o} = 1 \text{ kW}$  und  $n_o = 1 \text{ min}^{-1}$ ;

$N_e \leq 400 \text{ kW}$ : mit Lüftern für  
2 Drehrichtungen

$N_e > 400 \text{ kW}$ : mit Lüftern für  
nur 1 Drehrichtung

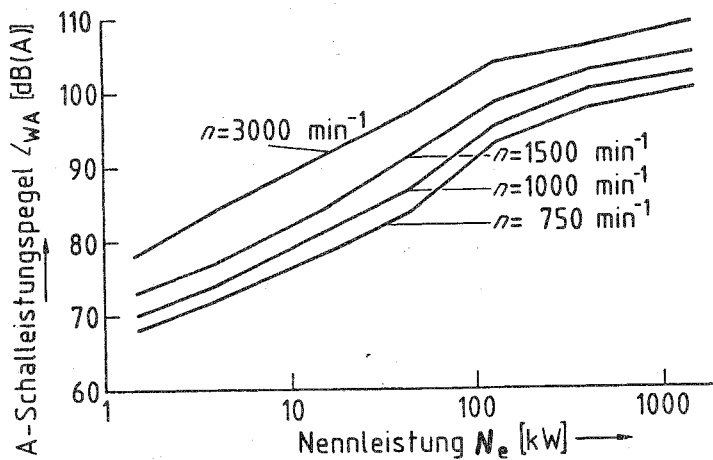


Abb. 4 A-Schalleistungspegel von Drehstrom-Motoren

##### Pegelminderung durch:

- drehrichtungsunabhängige Axiallüfter:  
-5 bis -10 dB(A)
- Fremdlüfter od. Wasserkühlung:  
-10 dB(A)
- Kapselung d. Motors (sekundäre Maßnahme)

#### 4.2.1.2 Dampfturbinen:

Zum Antrieb von Pumpen und Verdichter: infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungen, Kanälen und Ventilen entstehen breitbandige Geräusche:

$$85 < \bar{L}_{p,A} < 95 \text{ dB(A)}$$

$$\bar{L}_{p,A} \neq f(N_e, n)$$

Abstand von der Emissionsquelle

Geräuschminderungsmaßnahmen: dann  $\bar{L}_{p,A}(1 \text{ m}) \leq 85 \text{ dB(A)}$

- vorhandene Wärmeisolierung als Schallisolierung ausführen
- Verwendung von Ölpumpen
- Getriebe kapseln

#### Getriebe:

Zahnradgetriebe sind wegen der Tonhaltigkeit der abgestrahlten Geräusche oft sehr lästige Schallquellen

Zahnriemen- und Keil- sowie Flachriemengetriebe: wesentlich geräuschärmer, hier  $L_p = f(\text{Laufgeschw.})$

#### 4.2.1.3 Ventilatoren (Lüfter, Gebläse):

breitbandiges Wirbelgeräusch durch unregelmäßige Strömungsstörung, besonders bei hohen Umfangsgeschw. der Schaufeln: für lärmarm konstruierte Radialgebläse und zusätzl. sekundäre Dämpfungsmaßnahmen gilt:

$$20 < N_e \leq 200 \text{ kW} : 90 < L_{W,A} < 100 \text{ dB(A)}$$

#### Verdichter:

Zur Förderung und Verdichtung gasförmiger Fluide: durch Wirbel- und Pulsationsgeräusche sowie durch mechanische Geräusche sehr lärmintensiv → kostenaufwendige, schalldämmende Maschinenhäuser

Tab. 3 A-Schalleistungspegel von Verdichtern

Verdichterbauart	Antriebsleistung $N_e$ kW	A-Schalleistungspegel $L_{WA}$ dB(A)
serienmäßige Hubkolbenverdichter	1 ... 5	$96 + 5 \lg \frac{N_e}{N_{e0}} \pm 5$
	5 ... 500	$90 + 13 \lg \frac{N_e}{N_{e0}} \pm 5$
Prozeßhubkolbenverdichter ohne Antriebs- und Nebenaggregate	40 ... 2000	100 ... 110
Prozeßhubkolbenverdichter mit Nebenaggregaten, jedoch ohne Untersetzungs- element und ohne Antriebsmaschine	40 ... 2000	110 ... 120
Drehschieberverdichter	10 ... 600	$94 + 10 \lg \frac{N_e}{N_{e0}}$ $\pm 10$ für $N_e < 5 \text{ kW}$ $\pm 5$ für $N_e > 400 \text{ kW}$
symmetrische Rootsverdichter	1 ... 1000	
unsymmetrische Rootsverdichter	30 ... 200	
Schraubenverdichter	50 ... 4000	
eingehäusige Axial- und Radialturboverdichter ohne Antriebs- und Neben- aggregate	100 ... 25000	110 ... 120
große Axialturboverdichter ohne Antriebs- und Nebenaggregate	10000 ... 50000	120 ... 125

Schallspektrum:  $f(n)$ : wenn  $n$  zunimmt, dann Verschiebung des  
Geräuschmaximums zu höheren Frequenzen  $\checkmark$

#### 4.2.1.4 Dampfstrahl-Vakuum-Anlagen

Dampfstrahlpumpen zur Erzeugung und Aufrechterhaltung des Vakuums,  
insbes. in Destillationsanlagen

Geräuschemissionen durch:

- den mit Überschallgeschw. austretende Treibdampfstrahl
- den nachfolgenden Verdichtungsstoß im Hals des Diffusors
- zusätzl. Ausströmungsgeräusche, wenn Anlage direkt in die  
Atmosphäre fördert (und nicht in nachgeschaltete Kondensatoren  
od. Rohrleitungen)

➔ hochfrequente Abstrahlung mit  $2000 < \nu < 4000$  Hz (bei großer  
Oberfläche)

für 3stufige, geschlossene Vakuumanlagen mit Absaugmassen-  
strömen  $\dot{m} = 0.1$  bis  $5 \text{ t/h}$  und Treibdampfdrücken bis  $p_{\max} = 5 \text{ bar}$ :

$$p_{\max} = 5 \text{ bar} : \quad 95 \leq L_{W,A} \leq 125 \text{ dB(A)}$$

und bei  $p_{\max} = 12 \text{ bar} : \quad + 10 \text{ dB(A) höher}$

bei Abweichung der Betriebsbedingungen  
von den Auslegungsbedingungen: bis +10 dB(A) höhere Werte

$$L_{W,A} \sim \dot{m}^{2.6} \quad \rightarrow \quad \text{Verdreifachung von } \dot{m} \text{ ergibt } +17.4 \text{ dB(A)!}$$

durch zusätzl. sekundäre Maßnahmen:

für  $p_{\max} = 5 \text{ bar}$ : bis -15 dB(A)

#### Pumpen (Flüssigkeitspumpen)

große Anzahl pro Chemieanlage

Kreiselpumpen: Flüssig.schall durch period. Druckschwankungen  
infolge stark turbul. instationärer Strömung.  
Durch Flüssig.schall werden das Pumpengehäuse und die ange-  
schlossenen Rohrleitungen zu Körperschallschwingungen angeregt,  
so daß es zur Emission von Luftschall in die Umgebung kommt:  
Emissionskennwerte und ihre Einflußgrößen wurden erst in neuerer  
Zeit ermittelt (VDI 3743 Blatt 1, Entwurf März 1980).

#### 4.2.15 Luftkühler

Infolge zunehmender Wärmebelastung der natürl. Oberflächenge-  
wässer sowie infolge des ständig zunehmenden Bedarfs an  
Kühlenergie werden Wasserkühler oft durch Luftkühler ersetzt:  
Aus verfahrenstechn. Gründen sind die Luftkühler in rel. großen  
Höhen aufgestellt  $\rightarrow$  hohe Schalleistungen emittieren ungehindert  
in die Umgebung  $\rightarrow$  primäre Maßnahmen: Verminderung der Umfangs-  
geschwindigkeiten:

Tab. 4. Spezifischer A-Schalleistungspegel  $L_{WA\text{spez}}$  von Luftkühlern in Abhängigkeit von den Konstruktionsmerkmalen

Gruppe	Konstruktionsmerkmale des Ventilatorsystems	Umfangsgeschwindigkeit $\text{min}^{-1}$	$L_{WA\text{spez}}$ dB(A)
1	Klein-Ventilator in Normalausführung mit 4 und mehr Flügeln	60	97,5
2	Ventilator in Normalausführung mit 4 bis 6 Flügeln	55 ... 60	92,5
3	Ventilator in Normalausführung mit 6 Flügeln, reduzierte Förderleistung, vergrößerte Wärmeaustauschfläche, Einlaufkonus	40 ... 45	87,5
4	Geräuscharmer Ventilator mit 6 Flügeln, parabolische Einlaufdüse, strömungsgünstige Nabenverkleidung	35 ... 40	82,5
5	Geräuscharmer Ventilator mit 8 bis 10 Flügeln oder bei kleinerer Flügelzahl mit Vorleitrad, parabolische Einlaufdüse, strömungsgünstige Nabenverkleidung, optimaler Abstand der Lüfterkonstruktion und des Schutzgitters von den Schaufeln	25 ... 30	77,5

n meist gering  $\Rightarrow$  tieffrequente Geräusche mit  $500 \text{ Hz} < \nu < 1000 \text{ Hz}$

### Kühltürme

**Naturzugkühltürme:** meist in Kraftwerken

**Ventilatororkühltürme:** meist in Chemie-Anlagen

Geräuschemissionen bedingt durch:

- Wassergeschall, d. h. das Aufprallen der Wassertropfen auf der Wasseroberfl. der Kühlturmtasse; Emission über Lufteintrittsöffnungen
- Geräusche des Axialventilators: Emission durch die Luftaustrittsöffnung: bei saugenden Axialventilatoren  
Geräuschemission vergleichbar mit Wassergeschall-Emission
- große Abstrahlflächen

→ breitbandiges Wasserrauschen mit  $500 \text{ Hz} < \nu < 8000 \text{ Hz}$

$L_{p,A} \approx 85 + 3 \text{ dB(A)}$  → trotzdem hohe Schalleistungen wegen der großen Abstrahlflächen

primäre Maßnahmen:

Aufprallabschwächer:  $-10 \text{ dB(A)}$

sekundäre Maßnahmen:

- Abschirmwände oder -wälle
- Schalldämpfer vor den Ansaugöffnungen

#### 4.2.1.6 Prozeßöfen

z. B. Crack-, Spalt-, Reformer- u. Destillationsöfen:

in Raffinerien und petrochem. Anlagen: gehören zu den geräuschintensivsten Schallquellen

Geräusche bedingt durch:

- tieffrequente Brennergeräusche
- meist hochfrequente Entspannungsgeräusche beim Austritt insbes. gasförmiger Brennstoffe aus Brennerdüsen sowie durch Dampf od. Druckluft zur Zerstäubung flüssiger Brennstoffe

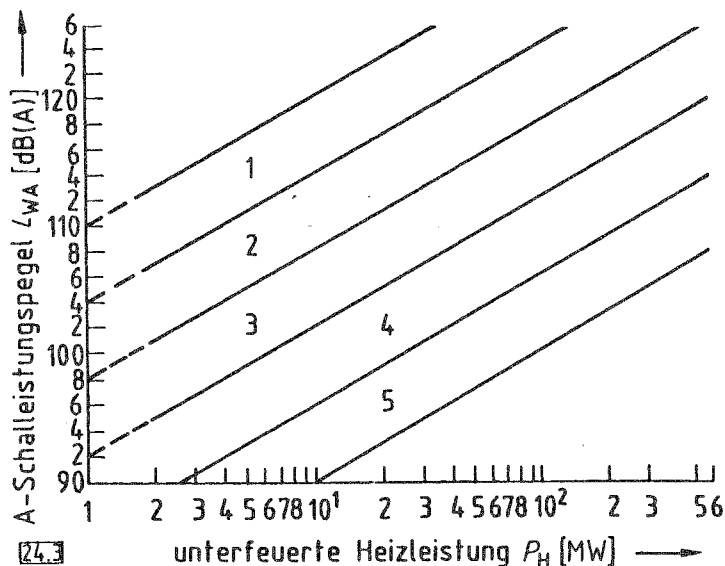


Abb. 5 A-Schalleistungspegel von Prozeßöfen in Abhängigkeit von der unterfeuerten Heizleistung  $P_V$  für verschiedene Ofenklassen nach Tab. 5

$$1 \quad L_{WA} = 107 + 10 \lg \frac{P_H}{P_0} \pm 3 \quad 4 \quad L_{WA} = 89 + 10 \lg \frac{P_H}{P_0} \pm 3$$

$$2 \quad L_{WA} = 101 + 10 \lg \frac{P_H}{P_0} \pm 3 \quad 5 \quad L_{WA} = 83 + 10 \lg \frac{P_H}{P_0} \pm 3$$

$$3 \quad L_{WA} = 95 + 10 \lg \frac{P_H}{P_0} \pm 3 \quad P_0 = 1 \text{ MW}$$

Tab. 5 Schalltechnische Ofenklassen

Klasse	Merkmale	
	bodenbefeuerte Öfen	seitenwandbefeuerte oder kombinierte seitenwand-/bodenbefeuerte Öfen
1	mit selbstansaugenden Brennern ohne Schallschutz erreichbar	mit selbstansaugenden Brennern ohne Schallschutz erreichbar
2	mit selbstansaugenden Brennern ohne Schallschutz erreichbar	mit selbstansaugenden Brennern ohne Schallschutz nicht sicher erreichbar
3	mit selbstansaugenden Brennern ohne Schallschutz nicht sicher erreichbar	mit selbstansaugenden Brennern und Schallschutz sowie mit zwangsluftbefeuerten Brennern erreichbar
4	mit selbstansaugenden Brennern und Schallschutz sowie mit zwangsluftbefeuerten Brennern erreichbar	mit selbstansaugenden Brennern und Schallschutz sowie mit zwangsluftbefeuerten Brennern nicht sicher erreichbar
5	mit selbstansaugenden Brennern und Schallschutz nicht und mit zwangsluftbefeuerten Brennern bisher nicht sicher erreichbar	mit selbstansaugenden Brennern und Schallschutz sowie mit zwangsluftbefeuerten Brennern bisher nicht erreichbar

Schallschutzmaßnahmen:

- Kapselung der Einzelbrenner
- Luftansaugöffnungen mit Schalldämpfern versehen
- geräuscharme Wandkonstruktionen

4.2.1.7

Fackeln

werden eingesetzt:

- zur Verbrennung von Gasen, insbes. beim An- und Abfahren einer Anlage
- als Sicherheitseinrichtung bei Störfällen

Neben mögl. Leuchterscheinungen und mögl. Rußbildung beeinträchtigen sie die Nachbarschaft insbes. durch hohe Schalleistungen:

- niederfrequente Verbrennungsgeräusche durch turbulente Flammeninstabilitäten
- hochfrequente Gasentspannungsgeräusche (oft überkritische Entspannung): zur rauchlosen Verbrennung muß den meist KW-haltigen Gasen Wasserdampf und/oder Luft zugegeben werden.

Die A-Schalleistungspegel  $L_{W,A}$  für Fackeln mit

$$0.2 < \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_G} < 1, \quad \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G} = 15 \quad \text{und} \quad u_{G,0} = 1 \pm 1/4$$

lassen sich berechnen nach:

Hochfackeln:  $0.3 < \dot{m}_G < 100 \text{ t/h}$  bei überkritischer Entspannung:

$$L_{W,A} = 112 + 17 \cdot \lg \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_{G,0}} \pm 6 \text{ dB}$$

Bodenfackeln:  $0.3 < \dot{m}_G < 30 \text{ t/h}$  :

$$L_{W,A} = 102 + 10 \lg \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_{G,0}} \pm 3 \text{ dB}$$

$\dot{m}_G$  : Massenstrom Fackelgas G

$\dot{m}_D$  : " " Dampf D

$\dot{m}_L$  : " " Verbrennungsluft L

42/28 Stellglieder (Regelarmaturen):

Zur Durchfluß- und Druckregelung gasförmiger und flüssiger Fluide:  
sehr lärmintensive Geräuschquellen, auch wegen hoher Anzahl

Ursachen für Geräusche:

- mechan. Geräusche durch oszillierende Druckkräfte, die von der turbulenten und verwirbelten Strömung des Fluids erzeugt werden und die Innenteile des Stellglieds zu Schwingungen anregen  $\rightarrow$  es kann zu Resonanzschwingungen zwischen  $200 < \nu < 7000 \text{ Hz}$  kommen ( $\rightarrow$  mechan. Zerstörung des Innenteils)
- hydro- und/oder aerodynam. Geräusche: hohe Strömungsgeschw. des Fluids besonders am engsten Drosselquerschnitt  $\Rightarrow$  dahinter bildet sich turbulenter Freistrahler aus, der infolge turbulenter Phänomene großen Lärm erzeugt
- Kavitationsgeräusche: zusätzl. Stoßwellengeräusche, wenn im engsten Strömungsquerschnitt Überschallgeschw. des Fluids erreicht wird ( $\rightarrow$  Beschädigungen möglich)

### Schallschutzmaßnahmen:

- geräuscharme Stellgliedkonstruktionen mit dem Prinzip der Reihen- und/oder Parallelschaltung mehrerer Drosselstellen
- labyrinthartige Drosselkörper, jedoch:  
erhebliche Mehrkosten:

-10 dB(A)	: 130 % Mehrkosten
-20 dB(A)	: 200 % " "
-30 dB(A)	: 300 % " "

### Rohrleitungen und Apparate

Emission kann 25 bis 50 % der insgesamt abgestrahlten Schallleistung betragen, verursacht durch:

- Turbulenzen der Fluidströmung, abhängig von  $U_F$ , Geometrie, Rohrrauigkeit,  $\rho_F$ ,  $T_F$ ,  $\eta_F$

$U_F$  (Flüssigkeit)  $\approx$  1 bis 6 m/s

$U_F$  (Gase)  $\approx$  10 bis 40 m/s

$U_F$  (H<sub>2</sub>O-Dampf)  $\approx$  20 bis 50 m/s

} dadurch i. a. vernachlässigbare Geräusche

$U_F \gg$  als obige Werte in:

- Abblaseleitungen (ins Freie), z. B. Dampf od. Gase
- Saug-, Druck- u. Umgangsleitungen von Fördermaschinen sowie hinter Stellgliedern u. Turbinen

### 4.2.1.9 Sonstige Geräuschquellen

a) Überwiegend durch hohe Immissionswerte gekennzeichnet:

- Zerkleinerungsmaschinen
- Trenneinrichtungen (z. B. Siebe, Zentrifugen)
- Mischer und Fördereinrichtungen
- Spinn- und Spulmaschinen bei der Faserherstellung

b) Nebenanlagen:

- Wärmekraftanlagen zur Eigenversorgung mit Strom und/oder Dampf
- Druckluftversorgungsanlagen
- Transformatoren
- biolog. Kläranlagen (Kreisellüfter zum Sauerstoffeintrag)
- werksinterner Straßen-, Schienen-, Schiffsverkehr; Verlade- und Transporteinrichtungen

#### 4.2.2: Gesamtanlagen

Grundlage zur Ermittlung des Gesamtpegels aus Einzelpegeln ist Gl. (11b), wobei der Anteil  $\Delta L_p \approx 3$  bis 5 dB(A) infolge Reflexion u. Streuung innerhalb der Chemieanlage abgezogen werden kann.

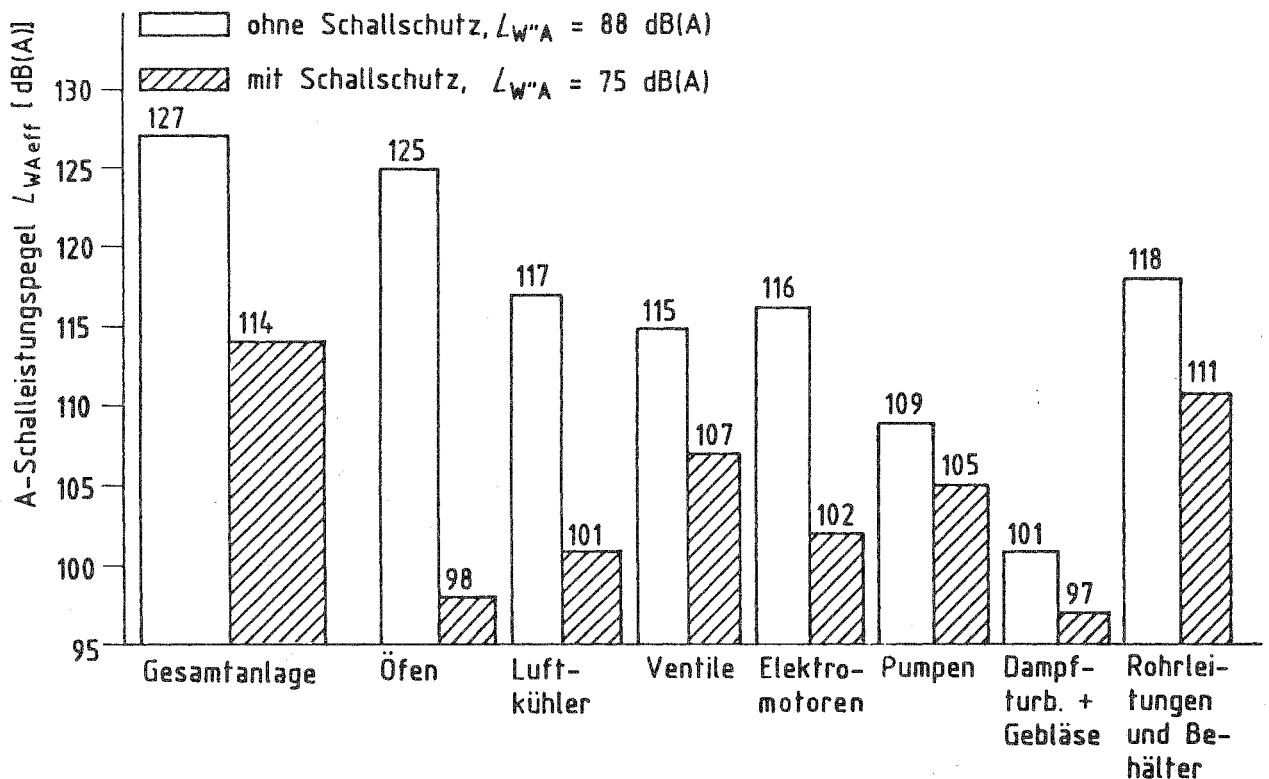


Abb. 6 Verteilung der immissionswirksamen Schalleistung  $L_{WA\text{eff}}$  einer Rohöldestillation auf die verschiedenen Geräuschquellenarten bei unterschiedlichen flächenbezogenen Schalleistungspegeln  $L_{W''A}$

Tab. 6 Beispiele für immissionswirksame A-Schalleistungspegel  $L_{WA\text{eff}}$  von Prozeßanlagen

Anlagenart	$L_{WA\text{eff}}$ dB(A)	
	ohne Schallschutz	mit Schallschutz
Ethylen-Anlagen $3,5 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5 \text{ t a}^{-1}$	120 ... 125	110 ... 115
Rohöldestillation $5 \cdot 10^6 \text{ t a}^{-1}$	127	114
katalytische Crackanlage $6 \cdot 10^5 \text{ t a}^{-1}$	122	111
Gesamt-Raffinerie ohne Nebenanlagen $5 \cdot 10^6 \text{ t a}^{-1}$	130,5	118,5
Gesamt-Raffinerie mit Nebenanlagen $5 \cdot 10^6 \text{ t a}^{-1}$	~ 132	120

$L_{WA\text{eff}}$  ... immissionswirksamer A-Gesamtschalleistungspegel

Tab. 7 Anteil verschiedener Geräuschquellenarten an Lärmbeschwerden der Wohnnachbarschaft

Störgeräuschquellen	Anteil der Beschwerden %
Fackeln	30,2
Gebläse	20,7
Fahrzeuge im Werksgelände (z. B. Silofahrzeuge mit Pneumatik usw.)	17,0
Entspannungsvorgänge	15,1
Transportvorrichtungen	5,7
Abblasen von Sicherheitsventilen	5,7
Kompressoren	3,7
Luftkühler	1,9
	100

Tab. 8 Anhaltswerte für flächenbezogene immissionswirksame Schalleistungspegel  $L_{W^*A}$  in dB(A) von verfahrenstechnischen Freianlagen bzw. Werkskomplexen der chemischen, petrochemischen und Mineralölindustrie.

ältere Produktionsanlagen ohne besondere Schallschutzmaßnahmen:	80 ... 90
neue Produktionsanlagen mit Schallschutzmaßnahmen, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen:	70 ... 75
Werke mit älteren Anlagen ohne besondere Schallschutzmaßnahmen:	70 ... 75
Werke mit Neuanlagen und Schallschutzmaßnahmen, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen:	65 ... 70

$L_{W^*A}$  ... flächenbezogener, immissionswirksamer A-Schalleistungspegel

$$L_{W^*A} = L_{WA_{eff}} - 10 \lg \frac{A_a}{A_0}$$

$A_a$  ... Grundfläche der Anlage bzw. des Gebiets

$$A_0 = 1 \text{ m}^2$$

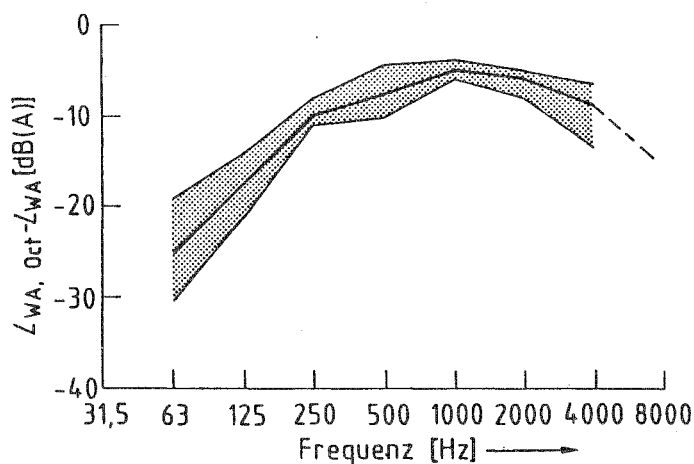


Abb. 7 Mittelwert und Streubereich des relativen A-Oktav-Schalleistungsspektrums von chemischen und petrochemischen Anlagen

## 5 Schallausbreitung

In Analogie zur Ausbreitung luftfremder Stoffe erzeugt auch eine Schallquelle mit dem Schalleistungspegel  $L_W$  in einem bestimmten Abstand  $r$  von ihrem Emissionsort eine bestimmte Schallimmission (Schalldruckpegel  $L_S$ ) wie in Abb. 7 schematisch dargestellt ist. Dabei wird der im Aufpunkt A zu erwartende Schalldruckpegel  $L_S$  von folgenden Einflußgrößen abhängen:

- den Emissionskennwerten, Schalleistungspegel  $L_W$ , Schallspektrum und Richtcharakteristik
- der Geometrie des Schallfeldes, d.h. der relativen Lage von Aufpunkt und Schallquelle, wobei auch die Lage zum Boden, zu Hindernissen oder zu Wänden zu berücksichtigen ist.
- bei Schallquellen im Freien: zusätzlich von den atmosphärischen Bedingungen (Ausbreitungsklassen, also z.B. Windgeschw.-u.-richtung, Lufttemp.), innere Dämpfung der Luft, Bodenbewuchs, massive

Hindernisse (z. B. Schutzwände) sowie von der Topographie des Ausbreitungsgeländes

- bei Schallquellen in Betriebsgeländen: zusätzlich von den akustischen Eigenschaften der Räume.

Das Ziel einer Beschäftigung mit der Schallausbreitung liegt in der Vorausberechnung von Schallimmissionen in der Nachbarschaft der Anlage und an den Arbeitsplätzen aber auch in der Ermittlung von Schallemissionen, wenn Immissionsmessungen in der Umgebung einer Schallquelle vorliegen.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand, z.B. in den VDI-Richtlinien enthalten läßt sich die Schallausbreitung im Freien, innerhalb geschlossener Betriebsgebäude sowie die Schallabstrahlung von Betriebsgebäuden zufriedenstellend berechnen.

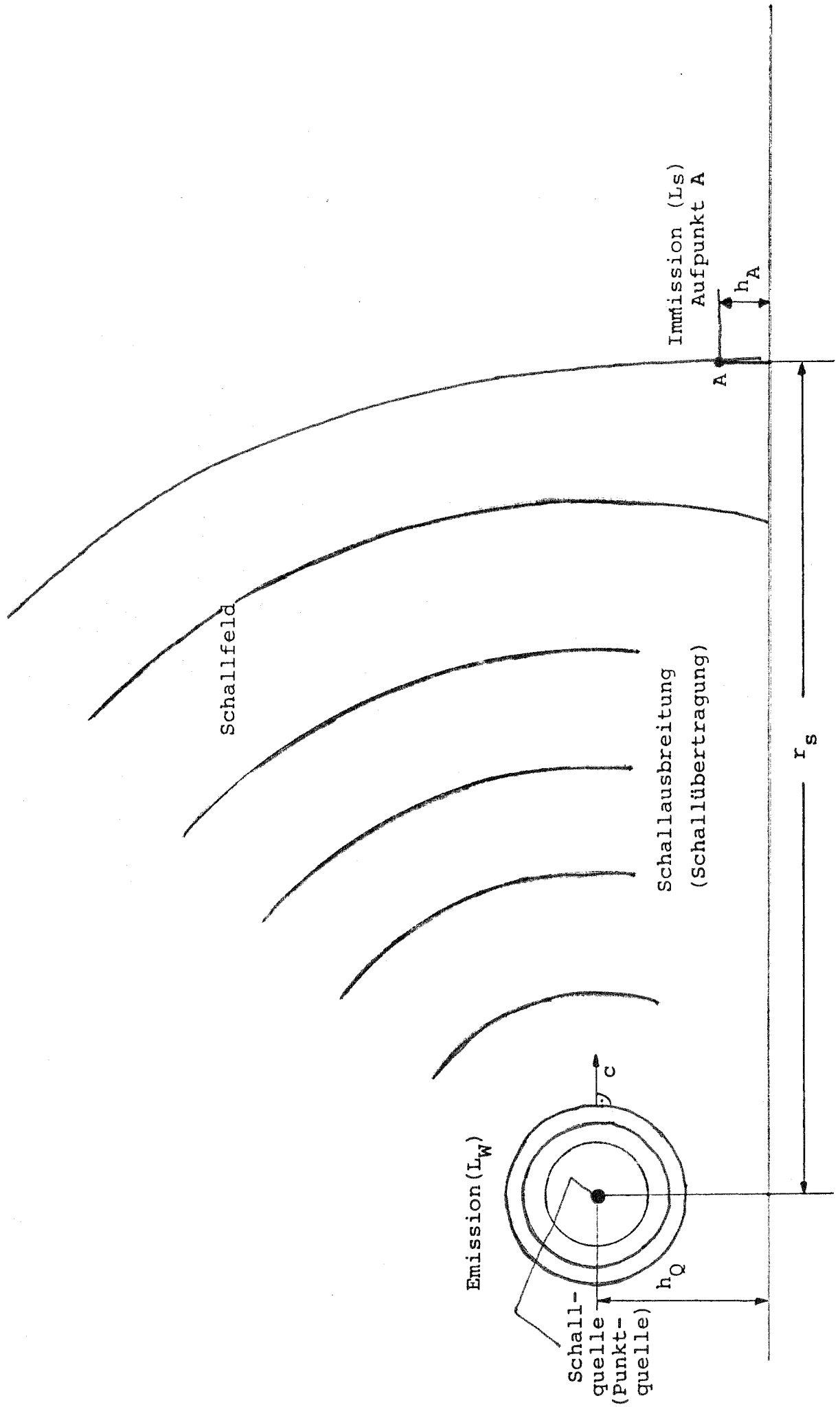


Abb. 8: Zur Schallausbreitung im Freien.



$$L_s(r_s) = L_w - 20 \lg \frac{r_s}{m \cdot t_0} - 10 \lg \Omega \quad [\text{dB}] \quad (12c)$$

m: Energiedämpfungs-konstante, charakterisiert die molekulare Absorption von Schallenergie durch die Luft

2. Werte für  $10 \lg \Omega$  :

für Vollraumemission:  $10 \cdot \lg 4\pi = 11$

für Halbraumemission:  $10 \cdot \lg 2\pi = 8$

für Viertelraumemission:  $10 \cdot \lg \pi = 5$

### 5.1.1 Wettereinflüsse

für  $r_s > 100\text{m}$

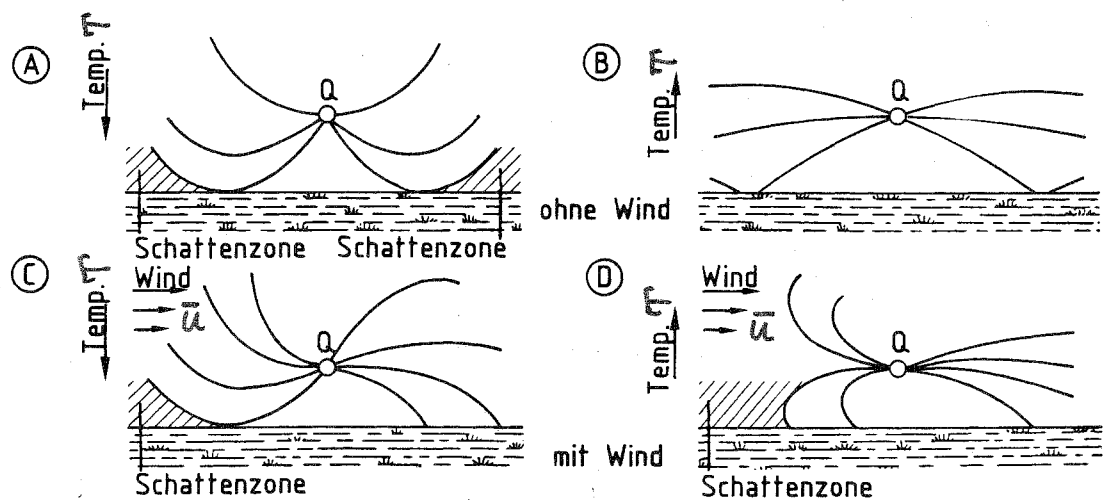


Abb. 9 Einfluß von Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten auf die Schallausbreitung

A „normale“ Wetterlage, Auftreten vorwiegend im Sommer; sonniges Wetter am Tag; B „Inversion“, Auftreten vorwiegend im Winter, klare, windarme Nacht; C Verhältnisse wie A mit Wind; D Verhältnisse wie B mit Wind

1.  $c \sim \sqrt{T}$

2. Windgeschw.  $\bar{u}$  addiert sich:  $c \pm \bar{u}$

### 5.1.2 Schallausbreitungsgleichung

$$L_S(r_S) = L_W - 20 \lg \frac{r_S}{r_0} + K_\Omega - \Delta L_L - \Delta L_B - \Delta L_D - \Delta L_G - \Delta L_Z - \Delta L_M + K_Q \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

$K_\Omega = 10 \lg \frac{4\pi}{\Omega}$	in (dB) : Richtwirkungsmaß
$\Delta L_L$	in (dB) : Luftabsorptionsmaß
$\Delta L_B$	in (dB) : Bodendämpfungsmaß
$\Delta L_D$	in (dB) : Bewuchsdämpfungsmaß
$\Delta L_G$	in (dB) : Bebauungsdämpfungsmaß
$\Delta L_Z$	in (dB) : Abschirmmaß
$\Delta L_M$	in (dB) : Witterungsdämpfungsmaß
$K_Q$	in (dB) : Schallquellenform-Korrekturmaß

Für chemische und petrochemische Werke gelten für den Langzeitmittlungspegel  $\bar{L}_A(r_S)$  folgende Näherungsformeln ( $\Omega = 2\pi r$ ,  $\Delta L_D = \Delta L_G = \Delta L_Z = 0$  dB):

$$\bar{L}_A(r_S) = L_{WA} - 10 \lg \left[ 7,91 \left( \frac{r_S}{r_0} \right)^2 \sqrt{1 + \left( \frac{r_S}{100 \cdot r_0} \right)^2} \right] \quad [\text{dB(A)}] \quad (14)$$

und

$$\bar{L}_A(r_S) = L_{WA} - 30 \lg \frac{r_S}{r_0} + 9 \quad [\text{dB(A)}] \quad (15)$$

Folgerung aus (14) und (15):

bei Abstandsverdopplung für  $r_S > 100$  m, ergibt sich eine Pegelverminderung um  $\bar{L}_{WA} \approx 9$  dB(A).

Anwendung von (14) auf eine Werksfläche von 1 km<sup>2</sup> mit  $L_{W''A} = 70 \text{ dB(A)}$  in  
Abbildung :

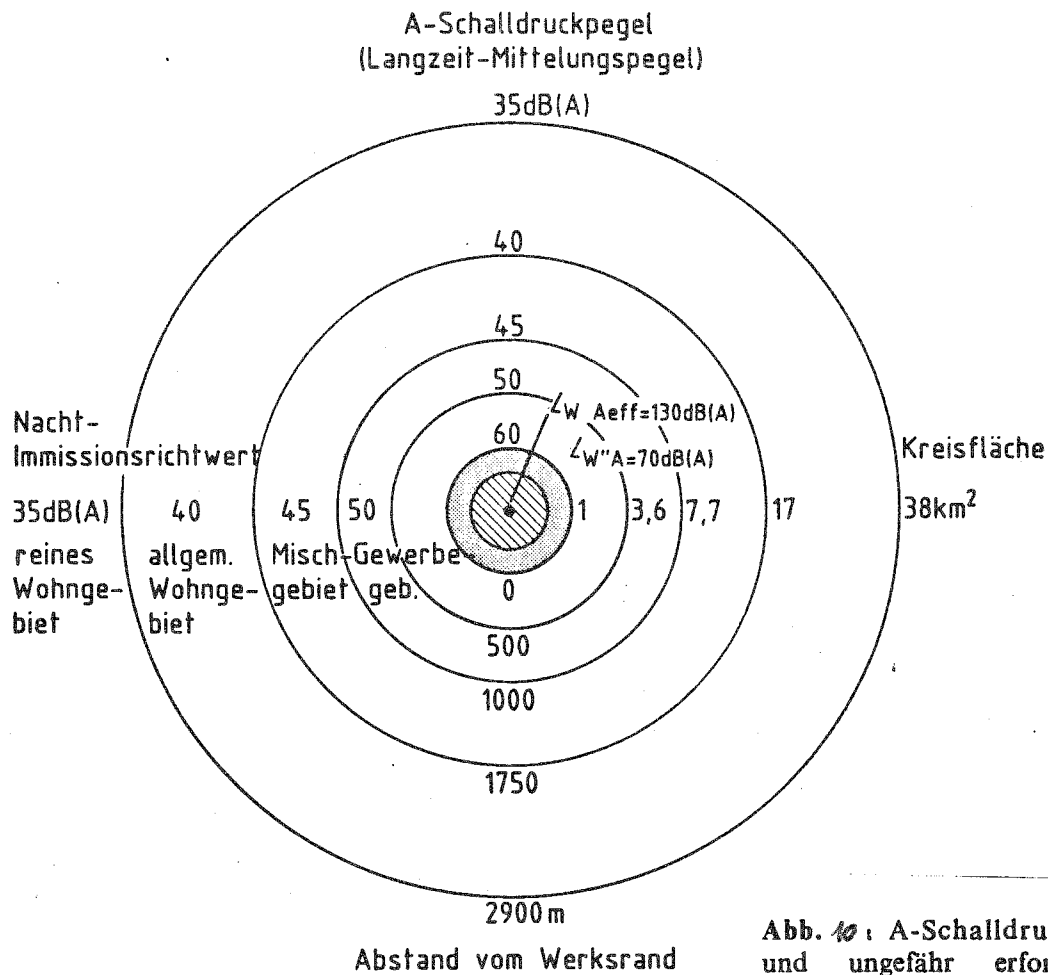


Abb. 10: A-Schalldruckpegel und ungefähr erforderliche Übergangszonen in der Nachbarschaft eines Werkes von 1 km<sup>2</sup> Grundfläche für  $L_{W''A} = 70 \text{ dB(A)}$

Tab. 9 Ungefähr notwendige Mindestabstände schutzbedürftiger Gebiete in Abhängigkeit von der Werksfläche bei verschiedenen Immissionsrichtwerten  $L_A$  und flächenbezogenen immissionswirksamen Schalleistungspegeln  $L_{W''A}$  von 65 und 75 dB(A)

Werksfläche km <sup>2</sup>	Mindestabstand von der Werksgrenze [m]							
	$L_{W''A} \text{ dB(A)}$							
	65 $L_A \text{ dB(A)}$				75 $L_A \text{ dB(A)}$			
	50	45	40	35	50	45	40	35
0,05	170	300	480	770	480	770	1200	1700
0,1	210	360	590	930	590	930	1450	2100
0,5	310	570	950	1550	950	1550	2400	3600
1	360	680	1150	1900	1150	1900	3000	4500
5	480	1000	1800	3000	1800	3000	4800	7000
10	550	1200	2200	3600	2200	3600	6000	8500

$L_A = 35, 40, 45, 50 \text{ dB(A)}$ : festgelegte Immissionsrichtwerte