

Universität für Musik und darstellende Kunst Wien,  
Institut für Elektroakustik  
Jürg Jecklin  
**Tontechnik special**

# 1

## **Grundlagen 1. Diplomprüfung**

## **Inhalt**

1. Pegel und Pegelrechnung
2. Rechnen mit komplexen Zahlen
3. Grössen und Einheiten
4. Elektrotechnik
5. Schall und Schallausbreitung
6. Analog-Messtechnik
7. Schallführungen für dynamische Lautsprecher
8. Eigenheiten von Musikaufnahmen
9. Aufnahmetechnik

# 1. Pegel und Pegelrechnung

## 1.1 Decibel (dB)

Das Decibel (dB) ist keine Einheit, sondern eine dimensionslose, logarithmische Zahl, die das Verhältnis zwischen zwei *Leistungswerten* angibt.

Es gilt:

$$\text{Leistungsverhältnis in dB} = 10 \cdot \log (\text{Leistung A} / \text{Leistung B})$$

Beispiel für Verhältnis 10 / 1 :

$$\log 10 = 1, \quad 10 \cdot 1 = 10 \text{ dB}$$

Beispiel für Verhältnis 2 / 1 :

$$\log 2 = 0.3, \quad 10 \cdot 0.3 = 3 \text{ dB}$$

Auch Spannungsverhältnisse lassen sich in dB angeben, wobei folgende Formel gilt:

$$\text{Leistung} = \text{Spannung im Quadrat} \cdot \text{Widerstand}$$

Das Quadrat eines Zahlenwerts entspricht einer Verdoppelung des Logarithmus.

$$\text{Spannungsverhältnis in dB} = 20 \cdot \log (\text{Spannung A} / \text{Spannung B})$$

Der Faktor 10 vor dem Leistungspegel ergibt sich aus der Einheit Dezi-Bel, da 1B = 10dB. Der Faktor 20 vor dem Spannungspegel ergibt sich aus der quadratischen Abhängigkeit der Leistung von der Spannung (und natürlich auch des Schalldrucks von der Intensität).

## 1.2 Referenzpegel

Referenzpegel, elektrisch

$$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mWatt an } 600 \text{ Ohm (Leistung), entspricht } 0.775 \text{ Volt}$$

$$0 \text{ dBu} = 0.775 \text{ Volt}$$

$$0 \text{ dBj} = 1 \text{ mVolt}$$

$$0 \text{ dBV} = 1 \text{ Volt}$$

Bezugswert für den Schalldruck

$$0 \text{ dB} = 20 \cdot \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N} / \text{m}^2$$

Bezugswert für die Schallintensität

$$0 \text{ dB} = 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2 = 10^{-16} \text{ W} / \text{cm}^2$$

## 1.3 Schallpegel L

Angegeben wird das Verhältnis von Schalldrücken oder -Intensitäten zu den jeweiligen Bezugswerten.

$$L = 10 \cdot \log (I / I_0) \text{ dB}$$

$$L = 20 \cdot \log (p / p_0) \text{ dB}$$

Bei  $p$ ,  $p_0$ ,  $I$  und  $i_0$  handelt es sich in der Regel um Effektivwerte.

### Tabelle - Pegelrechnung

Pegel (dB)	$U/U_0, p/p_0$	$P/P_0, I/I_0$
60	$10^3$	$10^6$
40	$10^2$	$10^4$
20	10	$10^2$
10	$\sqrt{10} = 3.16$	10
6	2	4
3	$\sqrt{2} = 1.41$	2
1	1.12	1.26
0	1	1
-1	$1 / 1.12 = 0.891$	$1/1.26 = 0.794$
-3	$1 / \sqrt{2} = 0.707$	$1 / 2 = 0.5$
-6	$1 / 2 = 0.5$	$1 / 4 = 0.25$
-10	$1 / \sqrt{10} = 0.316$	$1 / 10 = 0.1$
-20	$1 / 10 = 0.1$	$1 / 100 = 0.01$
- 60	$10^{-3}$	$10^{-6}$

Beispiel:

Wird bei einem Leistungsverstärker mit angeschlossenem Lautsprecher die Eingangsspannung verdoppelt, dann ändert sich folgendes:

- die Ausgangsspannung ist doppelt so gross
- der Spannungspegel hat um 6dB zugenommen
- die Ausgangsleistung ist viermal so gross
- der Leistungspegel hat um 6dB zugenommen
- der Schalldruck ist doppelt so gross
- der Schalldruckpegel hat um 6dB zugenommen
- die Schallintensität ist viermal so gross
- der Schallintensitätspegel hat um 6dB zugenommen

## 2. Rechnen mit komplexen Zahlen

### 2.1 komplexe Zahlen

Eine komplexe Zahl ist ein geordnetes Paar reeller Zahlen, die arithmetisch in der Form

$$a + bi$$

dargestellt werden kann.

In dieser Formel ist  $a$  der Realanteil, und  $bi$  der so genannte Imaginäranteil der komplexen Zahl.

$i$  ist folgendermassen definiert:

$$i \cdot i = i^2 = -1 \text{ und damit ist } i = \sqrt{-1}$$

Komplexe Zahlen werden in der komplexen Zahlenebene dargestellt.

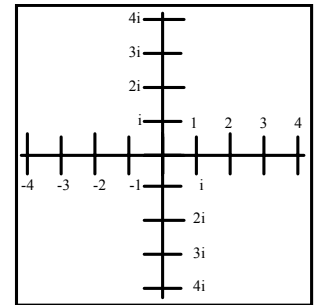


Bild 28 komplexe Zahlenebene

#### Rechnen mit komplexen Zahlen

Es gelten folgende Regeln:

$$(a_1 + b_1i) + (a_2 + b_2i) = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i$$

$$(a_1 + b_1i) \cdot (a_2 + b_2i) = (a_1a_2 - b_1b_2) + (a_1b_2 + b_1a_2)i$$

$$a_1 + b_1i = \frac{a_1a_2 - b_1b_2}{a_2^2 - b_2^2} + \frac{b_1a_2 + a_1b_2}{a_2^2 - b_2^2}i$$

$$a_2 + b_2i \quad a_2^2 - b_2^2 \quad a_2^2 - b_2^2$$

### 2.2 Darstellung einer Sinusschwingung

Im Zusammenhang mit der Akustik und der Tontechnik spielen periodische Vorgänge eine wichtige Rolle. Zum Beispiel die einfachste periodische Schwingung, die Sinusschwingung.

$$x(t) = x \cdot \sin \omega \cdot t$$

mit  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ,  $t$ : Zeit,  $f$ : Frequenz,  $x(t)$ : zeitabhängige Grösse

Folgende 3 graphische Darstellungen einer Sinusschwingung sind üblich:

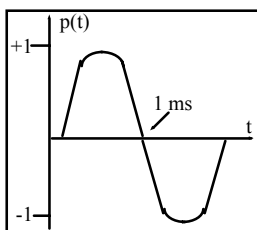


Bild 29 Zeitfunktion

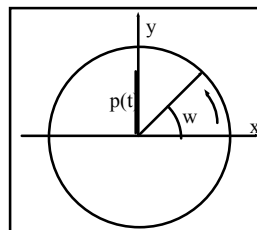


Bild 30 Zeigerdarstellung

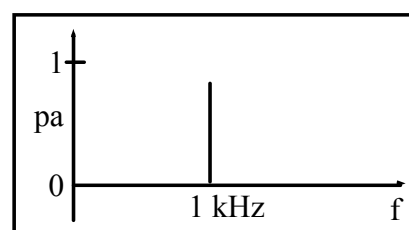


Bild 31 Spektrum

### **Zeigerdarstellung der Sinusschwingung**

Angenommen wird ein umlaufender Zeiger mit der Länge  $p$ , der sich mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  um den Koordinatennullpunkt dreht. Dem Winkel  $\varphi$  entspricht das Argument der Winkelfunktion ( $\varphi = \omega t$ ).

Die Projektion des Zeigers auf die x-Achse entspricht dem Momentanwert  $p(t)$ .

Das Zeigerdiagramm entspricht der Darstellung einer komplexen Zahlenebene. Die x-Achse entspricht der reellen Achse, die y-Achse der imaginären Achse.

Komplexe Zahlen bieten Vorteile bei der Berechnung und Darstellung von Schwingungen einer einzigen Frequenz. Dies insbesondere dank der Eulerschen Formel.

### **Eulersche Formel**

$$e^{j\omega} = \cos \omega + j \sin \omega$$

### **Reell**

$$p(t) = p \cdot \sin((\omega \cdot t) + \omega_0)$$

### **komplex**

$$\begin{aligned} p(t) &= p \cdot ((\cos((\omega \cdot t) + \omega_0)) + j \sin((\omega \cdot t) + \omega_0)) \\ &= p \cdot e^{j(\omega t + \omega_0)} = p \cdot e \end{aligned}$$

### 3. Grössen und Einheiten

#### Kraft $F$

Die Kraft  $F$  ist ein Vektor  
 komplexe Darstellung:  $\underline{F}(t)$   
 Einheit: 1 Newton = 1N = 1 m kg / s<sup>2</sup>

#### Schalldruck $p$

$p = F / S$   
 Der Schalldruck ist eine skalare Grösse  
 komplexe Darstellung:  $\underline{p}(t)$   
 Einheit: 1 Pascal = 1 Pa = 1 N / m<sup>2</sup>  
 (= 10 μbar = 10 dyn / cm<sup>2</sup>)  
 Bezugsschalldruck:  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$

Der Schalldruck ist ein zeitlich sich ändernder Anteil des atmosphärischen Luftdrucks, der im Mittel

$1.013 \cdot 10^5$  Pa beträgt.

#### Schallgeschwindigkeit $c$

Einheit m / s  
 Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist abhängig vom Luftdruck, der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur.  
 Bei einem Luftdruck von  $1.013 \cdot 10^5$  Pa und einer Temperatur von 20°C ist  
 $c = 343$  m / s

#### Schallschnelle $v$

Die Schallschnelle ist ein Vektor  
 komplexe Darstellung:  $\underline{v}(t)$   
 Einheit m / s  
 Die Schallschnelle beschreibt die Geschwindigkeit der Teilchenbewegung (Luftmoleküle).  
 $v$  ist wesentlich kleiner als  $c$

#### Schallfluss $q$

Skalare Grösse, Produkt aus Schallschnelle und durchströmter Fläche  
 $q = v \cdot S$   
 komplexe Darstellung:  $q(t)$   
 Einheit m<sup>3</sup> / s

#### Schall-Leistung $P$

Skalare Grösse  
 $P = p \cdot v \cdot S$   
 wird meist nicht als Momentanwert  $P(t)$ , sondern als Mittelwert angegeben.  
 Einheit: 1 W = 1 VA = 1 Nm / s

#### Schallintensität $I$

Allgemein gilt:  $I(t) = p(t) \cdot v(t)$   
 ebene Welle:  $I(t) = p(t) \cdot v(t)$   
 harmonische Schwingung:  $I = pv = P/S$   
 Bezugswert:  $I_0 = 10^{-12}$  W / m<sup>2</sup>  
 Einheit : 1 W / m<sup>2</sup> = 1 N/ ms  
 (Leistungsgrösse pro Flächeneinheit)

#### Schallfeldimpedanz $Z_s$

$Z_s = p / \underline{v} = F / v \cdot S$   
 Skalare Grösse  
 komplexe Darstellung  $\underline{Z}_s$

Einheit:  $\text{Ns} / \text{m}^3$

### **Schallkennimpedanz $Z_0$**

Schallfeldimpedanz für ebene Welle  
in Luft:  $Z_0 = 414 \text{ Ns} / \text{m}^3$

### **Mechanische Impedanz $Z_{\text{mech}}$**

$$Z = F / v$$

komplexe Darstellung:  $Z_{\text{mech}} = \underline{Z}$

Einheit:  $\text{Ns} / \text{m}$

### **Akustische Impedanz $Z_a$**

$$Z_a = p / q = F / vS^2$$

komplexe Darstellung:  $\underline{Z}_a$

Einheit:  $1 \text{ Ns} / \text{m}^5$  (= 1 akustisches Ohm)

### **Generell**

$\underline{X}$  : komplexe Grösse

$|\underline{X}|$  : Betrag der komplexen Grösse

$\text{Re} \underline{X}$  : Realteil der komplexen Grösse

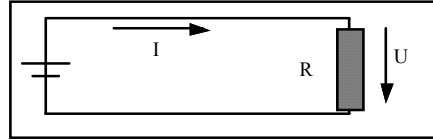
$\text{Im} \underline{X}$  : Imaginärteil der komplexen Grösse

## 4. Elektrotechnik

### 4.1 Grundgesetze

#### Ohmsches Gesetz

U	Spannung	(U) = V
I	Stromstärke	(I) = A
R	Widerstand	(R) = $\Omega$
$I = U/R$		$1 \text{ A} = 1 \text{ V}/\Omega$



#### Widerstand und Leitwert

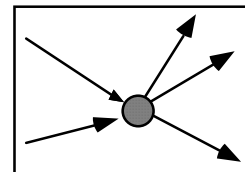
R	Widerstand (Widerstandswert)
G	Leitwert
$(G) = 1/\Omega = \text{S} \quad G = 1/R$	

#### Stromdichte

J	Stromdichte
I	Stromstärke
A	Leiterquerschnitt
$(J) = \text{A}/\text{mm}^2 \quad J = I/A$	

#### erste Kirchhoffsche Regel (Knotenregel)

$I_1, I_2$	zufließende Ströme
$I_3, I_4, I_5$	abfließende Ströme
$\sum I_{zu}$	Summe der zufließenden Ströme
$\sum I_{ab}$	Summe der abfließenden Ströme



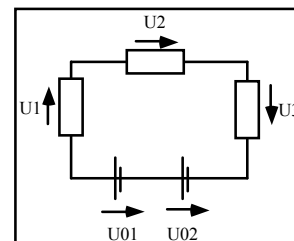
$$\sum I_{zu} = \sum I_{ab} \quad I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

#### zweite Kirchhoffsche Regel (Maschenregel)

$U_{01}, U_{02}$	Erzeugerspannungen ( $U_{erz}$ )
$U_1, U_2, U_3$	Verbraucherspannungen ( $U_{verbr}$ )
$\sum U_{erz} = \sum U_{verbr}$	

$$\sum U_{erz} = \sum U_{verbr}$$

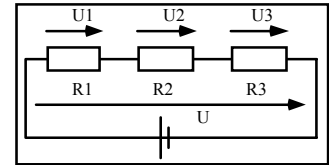
$$U_{01} + U_{02} = U_1 + U_2 + U_3$$



## 4.2 Schaltung von Widerständen

### Reihenschaltung von Widerständen

R Ersatzwiderstand (Gesamtwiderstand)  
 R1, R2, R3 Einzelwiderstände  
 U Gesamtspannung  
 U1, U2, U3 Teilspannungen, Verbraucherspannungen  
 I Stromstärke



wichtig: Durch in Reihe geschaltete Widerstände fließt der gleiche Strom

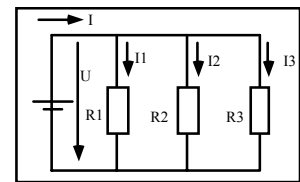
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$U_1/U_2 = R_1/R_2 \quad U_1/U = R_1/R$$

### Parallelschaltung von Widerständen

I Gesamtstrom  
 I1, I2 Teilströme  
 G Ersatzleitwert  
 G1, G2 Teil-Leitwerte



wichtig: An parallel geschalteten Verbrauchern liegt die gleiche Spannung an

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$$

$$I_1/I_2 = R_1/R_2 \quad I_1/I_3 = R_1/R_3$$

### Spannungsteiler

Unbelasteter Spannungsteiler

$$U_2 = (R_2/(R_1 + R_2)) \cdot U$$

$$R_1 = R_2((U/U_2) - 1)$$

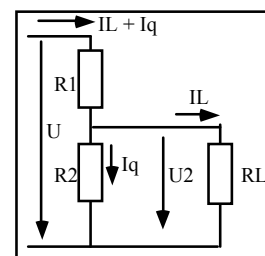
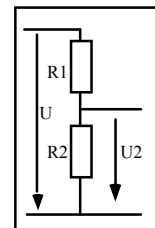
Belasteter Spannungsteiler

RL Lastwiderstand  
 U2 Teilspannung ohne Belastung  
 UL Teilspannung mit Belastung  
 IL Laststrom  
 Iq Querstrom  
 q Querstromverhältnis

$$U_2 = U / (((R_1(RL + R_2))/(RL \cdot R_2)) + 1)$$

$$R_2 = RL(U/U_2) \cdot ((UL - U_2)/(U - U_2))$$

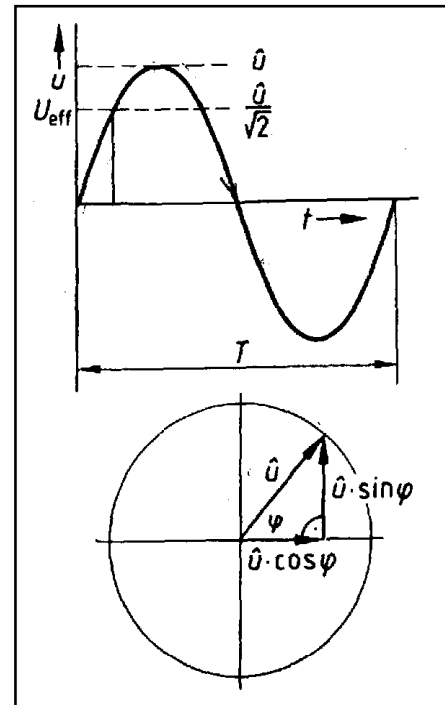
$$q = I_q/I_L$$



## 4.3 Wechselstrom und Drehstrom

### Grundgrößen des Wechselstroms

f	Frequenz
T	Periodendauer
w	Kreisfrequenz
$\varphi$	Winkel, Drehwinkel
t	Zeit
$\lambda$	Wellenlänge
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit
u	Augenblickswert der Spannung
$\hat{u}$	Amplitude (Scheitelwert)
U, U <sub>eff</sub>	Effektivwert
i	Augenblickswert des Stroms
$\hat{i}$	Amplitude (Scheitelwert)
I, I <sub>eff</sub>	Effektivwert
p	Polpaarzahl
n	Drehzahl
[f] = 1/s = Hz, [w] = 1/s	
f = 1/T $\lambda = c/f$	
$\omega = 2\pi f$ $\varphi = \omega t$	
u = $\hat{u} \cdot \sin$ i = $\hat{i} \cdot \sin$	
u = $\hat{u} \cdot \sin(\omega t)$ i = $\hat{i} \cdot \sin(\omega t)$	
$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{eff}$ $\hat{i} = \sqrt{2} \cdot I_{eff}$	
360° ~ T      360° ~ 2 $\pi$	
f = p • n	



## 5. Schallfeld und Schallfeldgrösse

### 5.1 Definitionen

#### Schallfeld (auch "akustisches Feld")

Luftgefülltes Raumgebiet, in dem sich die Schallwellen ausbreiten.

#### freies Schallfeld

die Schallausbreitung geschieht kugelförmig

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1 / r \quad v \sim 1 / r \quad I \sim 1 / r^2 \quad (\text{mit } I = p v)$$

#### ebenes Schallfeld

die Ausbreitung der Schallwellen erfolgt in senkrecht zur Fortpflanzung stehenden Wellenfronten

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1 / \sqrt{r} \quad v \sim 1 / \sqrt{r} \quad I \sim 1 / r \quad (\text{mit } I = p v)$$

#### statistisches Schallfeld (diffuses Schallfeld)

Schallfeld, bei dem der Schalleinfall an jedem Punkt aus allen Raumrichtungen gleich stark ist.

### 5.2 Schallfeldgrössen

#### Schallschnelle

Wechselgeschwindigkeit, mit der die Teilchen des Uebertragungsmediums um ihre Ruhelage hin- und herschwingen

#### Schalldruck

Wechseldruck, der dem statischen Luftdruck überlagert ist.

#### Schallausschlag

maximale Amplitude (Auslenkung) der schwingenden Teilchen des Uebertragungsmediums

#### Schallgeschwindigkeit c

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenausbreitung

Die Schallgeschwindigkeit ist eine Materialkonstante

#### Tabelle

Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien

Material	c,	m/s
Luft	10°	325.6
	0°	331.8
	10°	337.8
	20°	343.8
	800°	658
Helium	0°	971
Wasser	10°	1481
Eisen		5850
Aluminium		6400

## 6. Analog-Messtechnik

### 6.1 Allgemeines

#### 6.1.1 Spitzenwert und Effektivwert

Der Effektivwert einer Schwingungsgröße ist deren quadratischer (energetischer) Mittelwert.

#### Beispiel für Spannung U

Bezeichnung:  $U_{\text{eff}}$

Bei einem sinusförmigen Signal ist

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{peak}} / \sqrt{2}$$

#### Crest-Faktor

Beim Crest-Faktor handelt es sich um den Umrechnungsfaktor, mit dem der Spitzenwert multipliziert werden muss, um den rms-Wert zu erhalten.

Bei einer Sinusschwingung ist der Crest-Faktor  $0.707 (1/\sqrt{2})$ , bei einer Rechteckschwingung 1.

#### 6.1.2 Spannungen

Die Einheit für die Spannung ist das Volt

In der Audiotechnik werden Spannungen oft als Spannungsverhältnisse, die sich auf einen Bezugswert beziehen, angegeben. Die Einheit ist das logarithmische Verhältnis dB

#### dB-Bezugswerte

dBm	0 dBm entspricht 1 mW an 600 $\Omega$ (ergibt eine Spannung von 0.775 V)
dBu	0 dBu entspricht 0.775 V
dBv	0 dBV entspricht 1 V

#### Uebliche Spannungspegel

-10 dBu	Pegel von analogen Consumergeräten
0 dBu	Bezugspegel
4 dBu	Pegel von prof. und semiprof. Geräten
6 dBu	Studiopegel (Europa)
21 dBu	Maximalpegel von Analoggeräten

#### 6.1.3 Strom

Angabe in A, mA und  $\mu\text{A}$

#### 6.1.4 Leistung

Angabe in W und mW

#### 6.1.5 Verzerrungen

Angabe in % oder (seltener) als Klirrabstand in dB  
Früher wurde der K-Wert „isoliert“ angegeben.

#### 6.1.6 thd+N

Neue Messgeräte (Beispiel: A1 von Neutrik) messen den thd+N-Wert.

thd : total harmonic distortion

N : Noise

### Warum thd+N?

Richtig und aussagekräftiger wäre die Angabe von K (oder thd).

Die Technik der neuen digitalen Messgeräte erlaubt aus technischen Gründen nur die Messung von thd+N.

### 6.1.7 Fremdspannungen und Geräuschspannungen

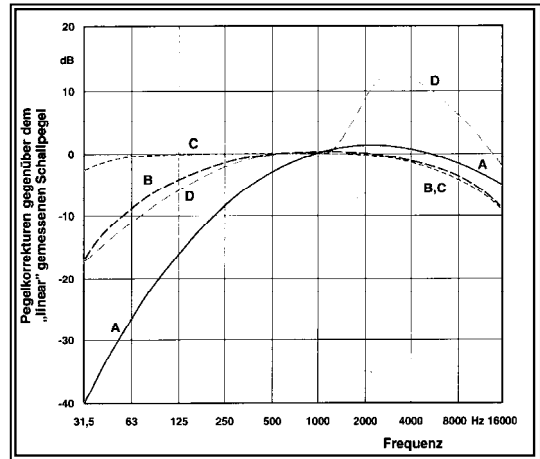
Gemessen wird (je nach den zur Verfügung stehenden Messgeräten) entweder der Spitzenwert, der true rms-Wert oder die Leistung. Mit dem Messgerät A1 von Neutrik wird der Spitzenwert gemessen.

#### Fremdspannung

Angabe in mV oder  $\mu\text{V}$   
oder

Als Fremdspannungsabstand in dB  
(bezogen auf Ausgangspegel)  
oder

als Fremdspannungspegel in dB  
(dBm, dBu, dBV oder dBq)



#### Geräuschspannung

Wenn die Fremdspannung mit einem entsprechenden Filter frequenzmässig bewertet wird, spricht man von Geräuschspannung, Geräuschspannungsabstand oder Geräuschspannungspegel.

Je nach verwendetem Bewertungsfilter sind folgende Einheiten üblich (siehe Bild): dBA, dBC, IEC, etc.

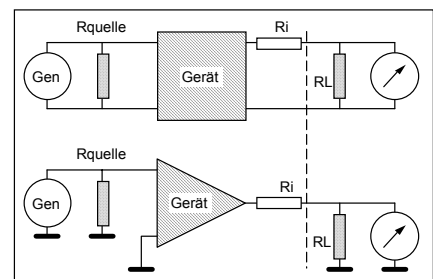
### 6.1.8 Phasenwinkel

Angabe in Winkelgrad  $^\circ$

## 6.2 NF – Messtechnik in der Praxis

#### wichtig:

- Die Messungen müssen unter Betriebsbedingungen, oder unter simulierten Betriebsbedingungen stattfinden.
- Ein- und Ausgänge des zu messenden Geräts müssen mit den entsprechenden Quellen- und Belastungsimpedanzen abgeschlossen sein.
- Die zu messenden Geräte dürfen nur im Rahmen ihrer technischen Möglichkeiten betrieben werden.



## 6.2.1 Sinussignale und nicht sinusförmige Signale

### Sinus-Signale

Spitzenwert und rms-Wert

Von den üblichen NF-Spannungsmessgeräten wird der Spitzenwert gemessen, die Skala zeigt aber den entsprechenden rms-Wert eines Sinus-Signals an.

Es gelten

$$U_{\text{rms}} = U_{\text{peak}} / \sqrt{2}$$

$$i_{\text{rms}} = i_{\text{peak}} / \sqrt{2}$$

$$L_{\text{rms}} = L_{\text{peak}} / 2$$

### nicht-sinusförmige Signale

Da der Spitzenwert gemessen wird, stimmt die rms-angeschriebene Skala nicht. Alles was man ablesen kann, ist der Spitzenwert. Er ergibt sich, wenn man den angezeigten Wert mit  $\sqrt{2}$  multipliziert.

#### 1. Möglichkeit: true rms-Messung

Es gibt Messgeräte, die direkt den rms-Wert messen, und zwar unabhängig von der Kurvenform.

#### 2. Möglichkeit: Messung des Spitzenwerts

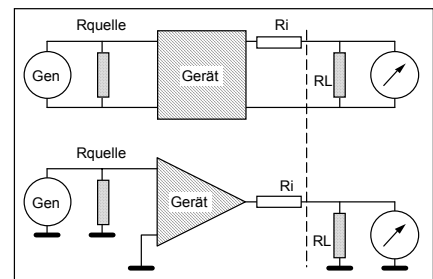
Messungen von Rauschsignalen (zum Beispiel bei Messungen des Geräuschabstands) müssen zwingend als rms-Werte gemessen werden. Wenn das nicht möglich ist, wird der Spitzenwert gemessen und mit der Einheit dBq angegeben.

## 6.2.2 Spannungen

Alle im Folgenden aufgeführten Messungen basieren in der Praxis meist auf Spannungsmessungen.

Wichtig:

- Der Eingangswiderstand des Spannungsmessgerätes muss gross sein im Verhältnis zum Ausgangswiderstand des zu messenden Gerätes.
- Ein- und Ausgang des zu messenden Gerätes müssen mit Widerständen abgeschlossen werden.



### Spannungsfrequenzgang

Messen der Spannung in Abhängigkeit von der Frequenz und entsprechende Darstellung der Ergebnisse in einem Diagramm als Frequenzgang.

Das Messgerät A1 von Neutrik führt diese Messung automatisch durch. Der Spannungsfrequenzgang wird auf dem Display angezeigt.

### Spannungs-Uebertragungsbereich

Angabe des Uebertragungsbereichs mit den zugelassenen Abweichungen.

Beispiel: 20Hz – 20 kHz +/- 3dB

## 6.2.3 Leistungen

Leistungen können direkt mit Leistungsmessgeräten gemessen werden. Bei diesen Messgeräten wird intern die Spannung mit dem durch die Last fließenden Strom multipliziert. Dabei wird eine eventuelle Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (zum Beispiel bei einem komplexen Lastwiderstand) berücksichtigt.

Die Leistung wird dann entweder aus der gemessenen Ausgangsspannung und dem gemessenen Strom durch den Lastwiderstand berechnet ( $L = U I$ ) oder aus der Ausgangsspannung und dem Lastwiderstand ( $L = U^2 / R$ ).

Phasenverschiebungen werden bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt. Das spielt aber nur eine Rolle, wenn es sich beim Lastwiderstand nicht um einen rein ohm'schen Widerstand handelt. In diesem Fall beinhaltet das Ergebnis sowohl die Wirk-, wie auch die Blindleistung. In diesem Fall wird die Leistung nicht in Watt (W), sondern als Volt-Ampere (VA) angegeben.

### Leistungsfrequenzgang

Messen der Leistung in Abhängigkeit von der Frequenz und entsprechende Darstellung der Ergebnisse in einem Diagramm als Frequenzgang.

Das Messgerät A1 von Neutrik führt diese Messung automatisch durch. Der Spannungsfrequenzgang wird auf dem Display angezeigt. Die Leistung wird dann entweder aus der gemessenen Ausgangsspannung und dem gemessenen Strom durch den Lastwiderstand berechnet ( $L = U I$ ), oder aus der Ausgangsspannung und dem Lastwiderstand ( $L = U^2 / R$ ).

### Leistungsbandbreite

Angabe der oberen und unteren Frequenz, bei der die maximal-mögliche Ausgangsleistung eines Verstärkers auf die Hälfte abgesunken ist (-3dB).

### Sinusleistung und Spitzenleistung

Die rms-Leistung wird in der Audiopraxis oft *Sinusleistung* genannt.

Mit Spitzenleistung bezeichnet man entsprechend die um den Faktor 2 grössere Spitzenleistung eines Verstärkers.

Beispiel: Sinusleistung 10 Watt, Musikleistung 20 Watt.

### Dauertonleistung und Musikleistung

In der Praxis ist das Netzteil eines Verstärkers so ausgelegt, dass die maximal-mögliche Leistung nur über einen kurzen Zeitraum abgegeben werden kann (zum Beispiel bei Impulsen). Diese Leistung wird *Musikleistung* genannt. Sie wird gemessen, indem man die interne Stromversorgung durch ein externes, „hartes“ Netzteil ersetzt.

Mit dem Begriff *Dauertonleistung* bezeichnet man die Leistung, die ein Verstärker mit dem eigenen, „weichen“ Netzteil auf Dauer mit einem Sinussignal wiedergeben kann.

Bei einem hochwertigen Transistorverstärker sind die Dauertonleistung und die Musikleistung gleich gross.

Bei Röhrenverstärkern (zum Beispiel Gitarrenverstärkern) ist die Musikleistung oft um den Faktor 4 grösser als die Dauertonleistung.

## 6.2.4 Verzerrungen

Bei den Verzerrungen unterscheidet man zwischen Klirrverzerrungen (Klirrfaktor K) und Intermodulationsverzerrungen (IM). Ursache für beide Verzerrungsarten sind nichtlineare Übertragungskennlinien.

### Klirrverzerrungen

Es handelt sich um Harmonische eines Sinussignals, deren Pegel gemessen und in Bezug zum Pegel des Sinussignals gesetzt werden. Labormässig werden die Pegel der einzelnen Klirrkomponenten ( $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ , etc.) gemessen und dann geometrisch zum Gesamt-Klirrfaktor (total harmonic distortion)  $K_{ges}$  addiert.

Praktisch wird heute direkt der  $K_{ges}$  ermittelt, indem das Grundsignal weggefiltert, und der Pegel des dann noch vorhandenen Signals gemessen wird. Eventuell (praktisch immer) vorhandenes Störgeräusch wird natürlich mitgemessen. Korrekterweise bezeichnet man das Ergebnis der Messen mit thd+N (total harmonic distortion + noise).

Ueblich ist die Angabe in %. Manchmal wird aber auch der Klirrabstand in dB angegeben:

$$\text{Klirrabstand (dB)} = 20 \log (\text{Pegel des Grundsignals} / \text{Pegel von thd+N})$$

### IM-Verzerrungen

Es handelt sich um Doppelton-Verzerrungen, die ebenfalls durch eine nichtlineare Kennlinie erzeugt werden.

Bei zwei Sinussignalen unterschiedlicher Frequenz entstehen zusätzlich zu den Klirrantteilen der beiden Frequenzen auch noch Differenz- und Summensignale.

IM-Verzerrungen werden heute nicht mehr routinemässig gemessen, da in der Regel keine entsprechenden Messgeräte zur Verfügung stehen.

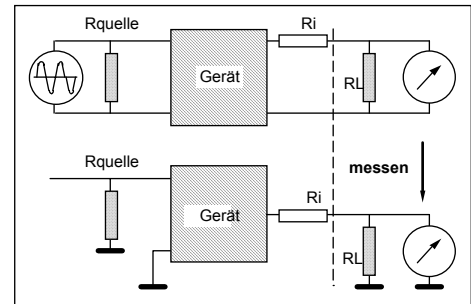
### 6.2.5 Uebersprechdämpfung

Gemessen wird das „Uebersprechen“, zwischen den zwei Kanälen eines Stereoverstärkers, oder das Uebersprechen zwischen zwei Kanalzügen eines Mischpultes (analog, denn bei digitalen Geräten gibt es derartiges nicht).

Vorgehen:

- Der Signalgenerator wird an einem der zwei Kanäle angeschlossen. Der Kanal wird entsprechend den Betriebsbedingungen ausgesteuert.
- Der zweite Kanal entsprechend dem ersten eingestellt (Trimmeinstellung, Faderposition, etc.), und der Eingang wird mit einem Quellwiderstand abgeschlossen. Dieser Kanal läuft leer (ohne Signal).

Gemessen werden die Pegel am Ausgang der zwei Kanäle. Der Pegelabstand in dB entspricht dann der Uebersprechdämpfung.



### 6.2.6 Störspannungen und Störgeräusche

Gemessen wird das im Gerät entstehende Störsignal.

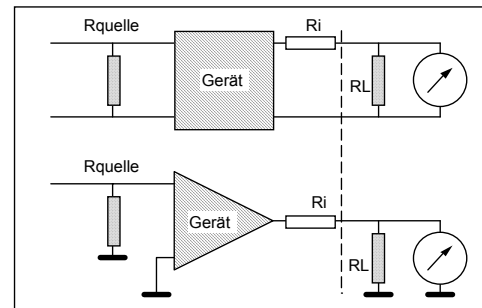
Vorgehen:

- Der Eingang wird mit dem entsprechenden Quellwiderstand abgeschlossen (in der Regel 200 Ohm)
- Der Kanal wird entsprechend den Betriebsbedingungen eingestellt (Lautstärkeregel bei einem Verstärker, Trim- und Fadereinstellung bei einem Kanalzug des Mischpultes)

Die Ausgangsspannung des (leer laufenden) Kanals

wird gemessen und ergibt dann die im Gerät entstehende Fremdspannung. Dieser wird zum Arbeitspegel des Geräts in Beziehung gesetzt. Die Pegeldifferenz in dB ergibt dann den Fremdspannungsabstand.

Für die Ermittlung der Geräuschspannung (resp. Des Geräuschspannungsabstandes) wird mit einem entsprechenden Bewertungsfilter gemessen. Ueblich ist die Angabe in dBA.

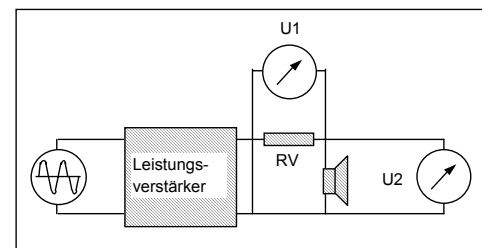


### 6.2.7 Impedanz eines Lautsprechers

Benötigt werden ein Leistungsverstärker, ein Signalgenerator und ein Vorwiderstand.

Entsprechend der nebenstehenden Schaltung wird der Spannungsabfall über dem Widerstand RV und über dem Lautsprecher gemessen.

- Der Vorwiderstand muss klein sein im Verhältnis zum Widerstand des Lautsprechers. Ueblich ist 1 Ohm.
- Gemäss ohm'schen Gesetz wird der durch den Widerstand fließende Strom ausgerechnet.



- Die Impedanz wird aus dem Strom und der Spannung über dem Lautsprecher berechnet.
- Der Impedanzverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz wird ermittelt und als Kurve aufgezeichnet.

## 7. Schallführungen für dynamische Lautsprecher

### 7.1 Notwendigkeit einer Schallführung

#### 7.1.1 Allgemeines

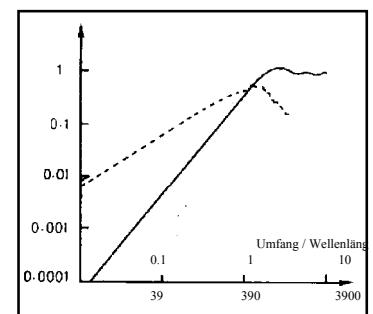
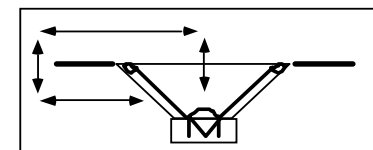
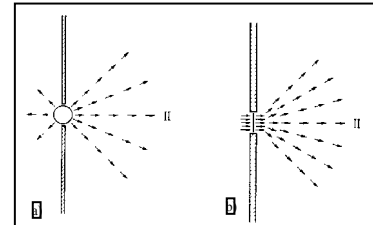
Dynamische Lautsprecher sind für eine wirkungsvolle Tieftonwiedergabe zu klein.

Die Folgen:

- Der Lautsprecher arbeitet im Bereich des mit der Frequenz ansteigenden Strahlungswiderstandes. Der Strahlungswiderstand hat also nicht den maximal-möglichen Wert (Bild 39 a zeigt die Situation für einen 12"- Tieftonlautsprecher). Der Wirkungsgrad der Schallabstrahlung im Tieftonbereich ist also schlecht
- Es tritt ein sogenannter akustischer Kurzschluss auf mit der Folge eines 6dB/Oktav-Abfalls unterhalb der Frequenz, bei der Laufweg des Schalls um den Membranrand herum kleiner ist als die Wellenlänge. In diesem Fall wird also zunehmend (mit kleiner werdender Frequenz) nur ein Luftvolumen um den Rand des Lautsprechers herum verschoben.

Eine wirksame Tieftonwiedergabe mit einem zu kleinen Lautsprechern ist nur möglich, wenn der Lautsprecher mit einer Schallführung kombiniert wird. Diese Schallführung hat die Aufgabe,

- den akustischen Kurzschluss zu verhindern,
- die Bewegung der akustisch unbelasteten Abstrahlfläche zu kontrollieren.



#### 7.1.2 Möglichkeiten für Schallführungen:

Schallwände, offene Gehäuse, geschlossene Gehäuse, Bassreflex-Gehäuse, akustisches Labyrinth, transmission line-Gehäuse, Hörner

## 7.2 geschlossene Gehäuse

#### 7.2.1 Allgemeines

Wenn ein Lautsprecher in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut wird, sind die beiden Membranseiten akustisch vollständig getrennt. Es handelt sich um die einfachste Möglichkeit einer praktikablen Schallführung, bei der nur die Eigenheiten des Lautsprechers und das Luftvolumen des Gehäuses eine Rolle spielen.

Geschlossenen Boxen können folgendermassen realisiert werden:

- als unendliche Schallwand (infinite baffle),
- als System mit pneumatischer Aufhängung (air suspension)

Gehäuse, die wie eine unendlich grosse Schallwand funktionieren, sind so gross, dass die durch die Membranbewegung bewirkte Kompression der Luft im Gehäuse vernachlässigbar ist. Diese Schallführung ist nur noch von historischem Interesse.

Von acoustic suspension spricht man, wenn die Rückstellkraft des Luftpolsters im Gehäuse um mindestens den Faktor 3 grösser ist als die der elastischen Aufhängung der Lautsprechermembran. Die Kombination Lautsprecher - Gehäuse entspricht dann einem Hochpass zweiter Ordnung, dessen Eigenschaften (Resonanzfrequenz, Dämpfung und untere Grenzfrequenz) sich einfach berechnen und (was auf dem Audiobereich nicht immer der Fall ist) auch nahezu ideal realisieren lassen. Massgebend ist der Q-Wert der Box (Bild 40). Die in diesem Bild gezeigten Frequenzgänge lassen sich für einen bestimmten Lautsprecher ausschliesslich durch Variation der Gehäusegrösse realisieren.

## 7.2.2 Uebertragungseigenschaften

Bild 44 zeigt die realisierbaren Frequenzgänge von geschlossenen Boxen, und Bild 45 die zugehörigen Sprungantworten

Aus diesen zwei Bildern wird folgendes ersichtlich:

$Q_{TC} = 0.5$ , kritische Dämpfung

keine Ueberhöhung, aber der -3dB-Punkt liegt eine Oktave über der Resonanzfrequenz. Die Sprungantwort ist ideal.

$Q_{TC} = 1/\sqrt{3} = 0.577$ , Bessel (max flat delay) entspricht praktisch der kritischen Dämpfung

$Q_{TC} = 1/\sqrt{2} = 0.707$ , Butterworth-Funktion (B2)  
Optimaler Frequenzgang, gute Sprungantwort

$Q_{TC} > 1/\sqrt{2}$ , Chebychev-Funktion (C2) Ueberhöhung bei, und Welligkeit oberhalb der Resonanzfrequenz. Sprungantwort nicht ideal

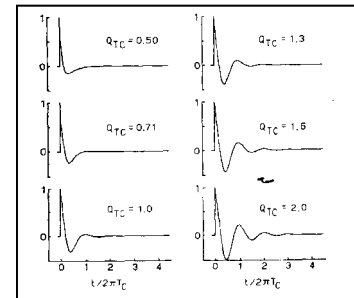
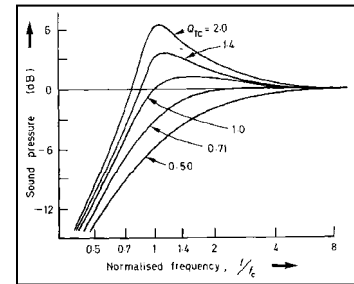


Bild 45 Sprungantwort bei verschiedenen Q-Werten

## 7.2.3 Klangeigenheiten der verschiedenen Q-Werte

Abstimmungen mit Q-Werten in der Gegend von  $Q_{TC} = 1$  haben subjektiv einen warmen und robusten Klang zur Folge.

- Bei Q-Werten um  $Q_{TC} = 0,8$  hat man den Eindruck eines klareren und aufgelösteren Klangbildes.
- Q-Werte von  $Q_{TC} = 0,5$  klingen (trotz der theoretischen Ueberlegenheit) flau, dünn und überdämpft.

In der Praxis werden die Q-Werte auf die jeweilige Gehäusegrösse und die jeweilige untere Grenzfrequenz abgestimmt. So hat zum Beispiel die kleine Monitorbox LS3/5A der britischen Firma Rogers mit einem Inhalt von 7.5 Litern einen relativ hohen Q-Wert von  $Q_{TC} = 1.2$ . Sie gilt allgemein als bestklingende Kleinbox.

Für die üblichen geschlossenen Boxen gilt allgemein akzeptiert im Bezug auf den Q-Wert folgendes:

- Bei einer unteren Grenzfrequenz von weniger als 50Hz und einem Gehäusevolumen von mehr als 30 Litern werden Q-Werte bis  $Q_{TC} = 1.1$  realisiert. Derartige Boxen werden bei der Wiedergabe von Orgel- und Orchestermusik als gut beurteilt.
- Boxen mit weniger als 30 Litern Inhalt und einer oberhalb von 50Hz liegenden Grenzfrequenz, sowie Q-Werten zwischen 1.2 und 2 eignen sich wegen des subjektiv stärkeren Tieftonbereichs für die Wiedergabe von Pop- und elektronischer Musik.

## 7.3 Zusammenhang der Gehäuse- Lautsprecher- und Box-Eigenheiten

Voraussetzung:

- der Innenwiderstand des Verstärkers ist 0 (praktisch: mindestens 10 x kleiner als der Lautsprecherwiderstand)
- die bewegte Masse dem eines auf einer Schallwand montierten Lautsprechers,
- der überwiegende Anteil der Dämpfung der Box wird vom elektromagnetischen System (Schwingspule - Magneteinheit) und den mechanischen Verlusten des Lautspre-

- chers bestimmt.
  - das Gehäuse ist ungedämpft, also nicht mit schallabsorbierendem Material gefüllt.
- In diesem Fall gelten folgende Beziehungen:

$$Q_{tco}/Q_{ts} = Q_{ec}/Q_{es} = f_c/f_s = \sqrt{a + 1} \quad (25)$$

daraus folgend

$$f_c/Q_{tco} = f_s/Q_{ts} \quad (26)$$

und

$$Q_{ts} = (Q_{es} \cdot Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms}) \quad (27)$$

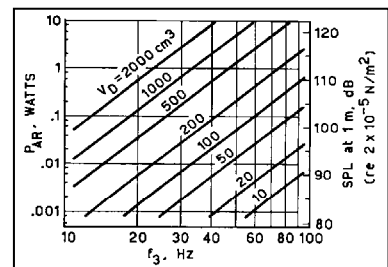
mit

$$a = V_{as}/V_b \quad (28)$$

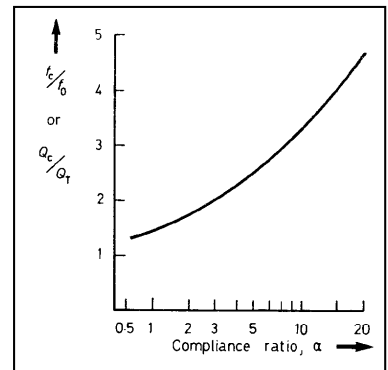
a: Elastizitätsverhältnis der Membraneinspannung zur Elastizität des Luftpolsters in der Box

Die gegenseitigen Abhängigkeiten der Lautsprecher- und Box-Eigenheiten sind in den folgenden Bildern dargestellt.

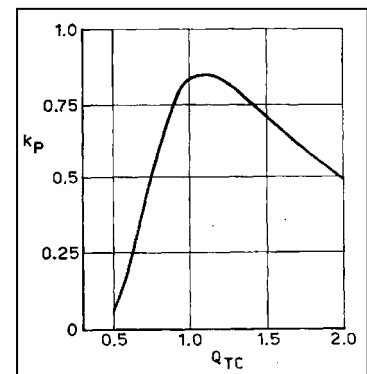
- Verhältnis der akustischen Leistung zur unteren Grenzfrequenz, zum Verschiebungsvolumen, und zum Schalldruck



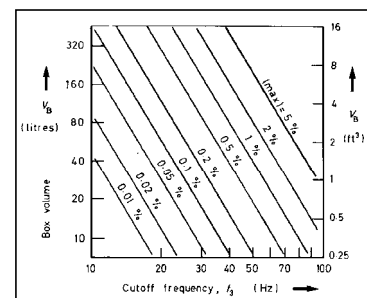
- Zusammenhang der Resonanzfrequenzen und der Q-Werte des Lautsprechers und der Box mit a als Verknüpfungsfunktion



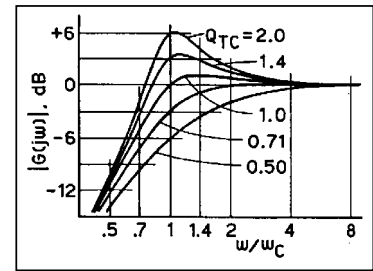
- Bild 48 Faktor kn in Abhängigkeit vom Q-Wert der Box (kn : Wirkungsgrad)



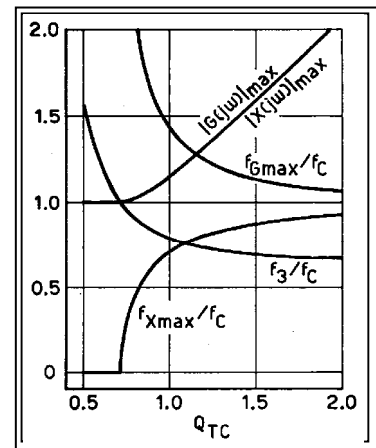
- Bild 49 Zusammenhang von Wirkungsgrad, unterer Grenzfrequenz und Gehäusevolumen



- Bild 50 Übertragungsfunktion des Amplitudenfrequenzgangs für verschiedene Q-Werte



- Bild 51 Grenzfrequenz, Frequenzgang und Frequenzabhängigkeit der Membranauslenkung in Abhängigkeit vom Q-Wert der Box



### Zusammenfassung

- Die Gesetzmässigkeiten der acoustic suspension gelten nur, wenn das Elastizitätsverhältnis  $a$  Werte zwischen 2 und 10 hat
- 2. Bei acoustic suspension-Boxen bestimmt der Q-Wert  $Q_{TC}$  der Box den Verlauf des Frequenzgangs im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter den Verlauf des Frequenzgangs.
- 3. Die Eigenschaften der Box in Kombination mit einem bestimmten Lautsprecher werden ausschliesslich vom Volumen  $V_c$  des Gehäuses bestimmt.
- 4. Der Q-Wert der Box und die untere Grenzfrequenz  $f_3$  hängen voneinander ab: Je grösser der Q-Wert, desto tiefer liegt  $f_3$ .
- 5. Die maximale akustische Leistung  $P_{ar}$  und die untere Grenzfrequenz  $f_3$  hängen voneinander ab: Je tiefer  $f_3$ , desto kleiner die maximal-mögliche akustische Leistung. Für die akustische Leistung ist letztlich die Grösse der Abstrahlfläche  $S_d$  bestimmend. Oder genauer, das sogenannte "Verschiebevolumen  $V_d$  (Membranfläche • Membranauslenkung).
- 6. Die Sprungantwort der Box wird ausschliesslich vom Q-Wert  $Q_{TC}$  bestimmt.
- 7. Für geschlossene Boxen mit einem Volumen von mehr als 40 Litern und einer unterhalb von 50 Hz liegenden Resonanzfrequenz werden Q-Werte von  $Q_{TC} < 1$  gehörmässig als vorteilhaft empfunden.
- 8. Bei kleineren Gehäusen mit Resonanzfrequenzen von mehr als 50 Hz sind Q-Werte von bis zu  $Q_{TC} = 2$  üblich. Der theoretisch optimale Q-Wert von  $Q_{TC} = 0.5$  (kritische Dämpfung) wird gehörmässig als überdämpft beurteilt.
- 9. Bei einer für einen bestimmten Lautsprecher konzipierten geschlossenen Box sind Gehäusevolumen, untere Grenzfrequenz, Q-Wert, Wirkungsgrad und maximale akustische Leistung im gewissen Umfang austauschbar. Das Konzipieren einer geschlossenen Box ist deshalb in erster Linie ein Optimierungsproblem, das sich logischerweise mit einem Computerprogramm am einfachsten lösen lässt.
- 9. Wenn die Box mit schallabsorbierendem Material gefüllt wird, führt dies, neben der Dämpfung der Gehäuseresonanzen, zu einer scheinbaren Vergrösserung des Gehäusevolumens und der bewegten Masse des eingebauten Lautsprechers (mehr dazu unter 5.25)



## 7.4 Konzipieren von Boxen für vorgegebene Lautsprecher

Lautsprecher, mit denen man eine geschlossene Box nach dem Prinzip der acoustic suspension mit a-Werten zwischen 3 und 10 realisieren will, müssen folgende Eigenschaften haben:

- Die Resonanzfrequenz des Lautsprechers muss um mindestens eine Oktav tiefer liegen als die der Box.
- $Q_{ts}$  darf höchstens halb so gross sein wie  $Q_{tc}$
- $V_{as}$  muss um ein Vielfaches grösser sein als die gewünschte Gehäusegrösse.

In diesem Fall gilt:

$$V_b = V_{as}/a \quad \text{und} \quad P_{er} = P_{ar}/n_0$$

### Berechnungsbeispiel

Lautsprecherparameter:

Resonanzfrequenz  $f_s = 19$  Hz, mech. Q-Wert  $Q_{ms} = 3.7$ , el. Q-Wert  $Q_{es} = 0.3$ ,

Ersatzvolumen  $V_{as} = 540$  dm<sup>3</sup>, el. Leistung  $P_e = 25$  W, max Membranauslenkung = 6mm,

Membrandurchmesser = 12 cm

daraus berechnet:  $Q_{total} \quad Q_{ts} = 0.32$

Wirkungsgrad  $n_0 = 1.02\%$

Membranfläche  $S_d = 4.5 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>

Verschiebevolumen  $V_d = 2.7 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>

Für  $a = 4$  ergibt sich eine Boxenabstimmung entsprechend einem B2-Filter mit einem Gehäusevolumen von  $V_b = 135$  dm<sup>3</sup>

Die maximal-mögliche Membranauslenkung von 6mm ergibt eine akustische Leistung von

$P_{ar} = 0.19$  akustischen Watt,

die mit einer elektrischen Leistung von

$P_{er} = 19$  Watt erzielt wird.

Für  $a = 9$  ergibt sich ein Boxenvolumen von 60dm<sup>3</sup> und für  $a = 12$  von 40 dm<sup>3</sup>. In diesem Fall liegt die Grenzfrequenz höher, und damit auch die akustische Leistung mit  $P_{ar} = 0.25$  Watt (notwendige elektrische Leistung  $P_{er} = 25$  Watt).

In einer Tabelle zusammengestellt sehen die Möglichkeiten dieses Lautsprechers für den Bau einer geschlossenen Box folgendermassen aus:

a	$f_c$ (Hz)	$Q_{tc}$	$f_3$ (Hz)	$V_{ab}$ (dm <sup>3</sup> )
4	42.5	0.72	42	135
6	50.3	0.85	44	90
9	60.0	1.01	47	60
12	68.6	1.15	50	45

## 7.5 Formeln für die Berechnung

- Basis: Q-Wert der Box ( $Q_{tc}$ )

$$a = (Q_{tc}/Q_{ts})^2 - 1 \quad (29)$$

$$f_c = (Q_{tc} \cdot f_s)/Q_{ts} \quad (30)$$

$$V_b = V_{as} / a \quad (31)$$

- Basis: Volumen der Box ( $V_b$ )

$$a = V_{as}/V_b \quad (32)$$

$$Q_{tc} = \sqrt{(a+1) \cdot Q_{ts}^2} \quad (33)$$

$$f_c = (Q_{tc} \cdot f_s)/Q_{ts} \quad (34)$$

- Basis: Resonanzfrequenz der Box ( $V_b$ )

$$Q_{tc} = (f_c \cdot Q_{ts}) / f_s \quad (35)$$

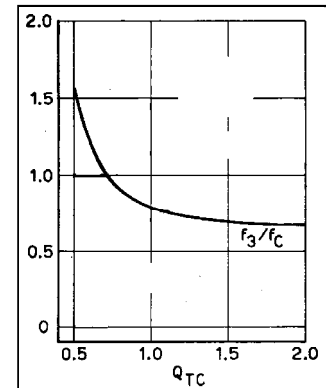
$$a = (Q_{tc} / Q_{ts})^2 - 1 \quad (36)$$

$$V_b = V_{as} / a \quad (37)$$

untere Grenzfrequenz  $f_3$

In der Praxis kann man  $f_3$  (entsprechend dem  $Q_{tc}$  der Box) mit genügender Genauigkeit der folgenden Tabelle oder dem Bild 53 entnehmen.

$Q_{tc}$	Dämpfung	$f_3 / f_s$	
0.500	kritisch		1.554
0.577	Bessel BL2	1.272	
0.707	Butterworth B2	1.000	
1.000	Chebyshev	0.786	



Wirkungsgrad  $\eta_0$

$$\eta_0 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot f_3^3 \cdot V_b \quad (38)$$

maximale akustische Leistung  $Par$

$$S_d = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (39)$$

$$V_d = S_d \cdot x_{max} \quad (40)$$

$$Par = 0.85 \cdot f_3^4 \cdot V_d^2 \quad (41)$$

elektrische Leistung  $Per$

$$Per = Par \cdot \eta_0 \quad (42)$$

oder maximaler Wert gemäss Herstellerangaben)

## 7.6 Dämpfung der Box mit schallabsorbierendem Material

Das Gehäuseinnere von geschlossenen Boxen wird immer mit schallabsorbierendem Material bedämpft. Manchmal wird dieses Material nur auf die Gehäuse-Innenwände aufgebracht, manchmal wird aber auch das ganze Gehäuse gefüllt. Nur so lässt es sich vermeiden, dass sich (besonders in kubischen Gehäusen) im mittleren Frequenzbereich stehende Wellen und Gehäuseresonanzen durch die Lautsprechermembran hindurch als Klangverfärbungen bemerkbar machen. Diese zusätzliche Dämpfung findet aber nicht ohne Nebeneffekte statt, die das ganze mechanische System einer acoustic suspension-Box beeinflussen. Dies betrifft die Steifigkeit des Luftpolsters im Gehäuse, die bewegte Masse des Gesamtsystems, sowie die Dämpfung der Membranbewegung.

Erhöhung der Nachgiebigkeit des Luftvolumens

Wenn das Gehäuse mit einem Material niedriger Dichte aber grosser spezifischer Wärme gefüllt wird, ändert sich die Kompressibilität der eingeschlossenen Luft nicht mehr adiabatisch, sondern isothermisch. Dies erhöht die Nachgiebigkeit des Luftpolsters, was einer Vergrösserung des Gehäusevolumens entspricht. Es ist so möglich, das Gehäusevolumen quasi um bis zu 40% zu vergrössern. In der Praxis kann man immerhin mit einer Quasi-Vergrösserung von bis zu 20% rechnen.

Erhöhung der bewegten Masse

Dämpfungsmaterial in der Box hat zur Folge, dass die effektiv bewegte Masse (Konus und Schwingspule) scheinbar grösser wird. Genaue Erklärungen für diese Erscheinung gibt es nicht. Möglicherweise betrifft es die in Konusnähe mitschwingende Luftmasse, deren Bewegung durch das Dämpfungsmaterial gebremst wird. Möglicherweise werden auch Teile des Absorptionsmaterials zum Mitbewegen angeregt. Bei massiv gefüllten Ge-

husen erhöhet sich die bewegte Masse um bis zu 20%.

#### Erhöhung der mechanischen Verluste

Im schallabsorbierenden Material wird Energie durch Reibung vernichtet (exakt: in Wärme umgewandelt). Die Folge sind mechanische Verluste des bewegten Systems (Konus und Schwingspule). Diese Verluste sind am grössten, wenn sich das Material in einem Bereich, in dem die Schallschnelle gross ist, also zum Beispiel unmittelbar hinter dem eingebauten Lautsprecher.

Der Einfluss dieser Dämpfung auf den mechanischen Q-Wert des Lautsprechers kann nicht vernachlässigt werden, denn ein (üblicher mechanischer Q-Wert von 5 - 10 wird auf Werte zwischen 2 und 5 reduziert. Damit wird natürlich auch der Q-Wert der Box entsprechend kleiner.

#### Konsequenz für die Praxis

Im Prinzip hat das Einbringen von Absorptionsmaterial in eine geschlossene Box Vorteile:

- Das Gehäusevolumen kann um bis zu 20% reduziert werden.
- Wahlweise kann man die Dämpfung der Box dazu benutzen, entweder den Wirkungsgrad zu erhöhen, die Resonanz- und Grenzfrequenz nach unten zu verschieben, zur Erhöhung des Wirkungsgrads oder zum Realisieren einer tieferen Resonanzfrequenz  $f_0$  und Grenzfrequenz  $f_3$ . Man bezahlt dafür den Preis von grösseren mechanischen Verlusten. Dies spielt aber in der Praxis keine Rolle, da die Vorteile der Verbesserung der erwähnten Box-Parameter deutlich überwiegen.
- Man kann eine vorhandene Box aber nicht einfach mit zusätzlichem Absorptionsmaterial zu füllen. Die Box muss zwingend für die veränderten Lautsprecher- und Gehäuse-Parameter neu berechnet werden.

#### Dämpfungsmaterial

Als Dämpfungsmaterial werden Glasfasermatten, Akustik-Schaumstoffe, Watte und kurzfasrige Schafwolle verwendet.

Der empirisch Einfluss der Gehusedampfung durch diese Materialien auf eine geschlossene Box kann man der folgenden Tabelle entnehmen (Quelle: *The Loudspeaker Design Cookbook* von Vance Dickason)

%Fullung	$f_3$	$Q_{tc}$
0	39.94	1.19
50	38.31	0.98
100	37.37	0.73

#### Berechnung von bedämpften Gehäusen

Mit Dämpfungsmaterial gefüllte Boxen werden prinzipiell genau gleich berechnet wie leere Gehäuse. Die durch die Gehausefullung veränderten Werte der Parameter müssen aber berücksichtigt werden.

Die folgenden Berechnungsgrundlagen basieren auf der Annahme, dass das Gehäusevolumen durch die Füllung virtuell um 20% vergrössert wird

Neuer Wert für  $Q_{tc}$  bei gleichem Box-Volumen

$$V_{ab} = 1.2 \cdot V_b \quad (43)$$

$$\alpha = V_{as}/V_b \quad (44)$$

$$L = \tilde{A} (a + 1) \quad (45)$$

$$Q_{tc}' = L \cdot Q_{ts} \quad (46)$$

$$Q_{tc} = ((1/Q_{tc}') + 0.2)^{-1} \quad (47)$$

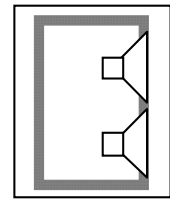
Neues Box-Volumen bei gleichem  $Q_{tc}$

$$V_b = V_{ab} / 1.2 \quad (48)$$

## 7.7 Geschlossene Boxen mit mehreren eingebauten Lautsprechern

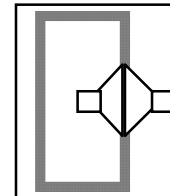
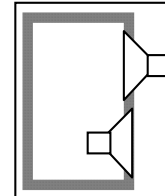
### 2 Lautsprecher, übliche Anordnung

- fs unverändert
- Qts unverändert
- Vas doppelt so gross
- Membranauslenkung halb so gross



### 2 Lautsprecher, Push Pull- Konfiguration

- fs unverändert
- Qts unverändert
- Vas doppelt so gross
- Membranauslenkung halb so gross
- Nichtlinearitäten des Lautsprechers gleichen sich aus

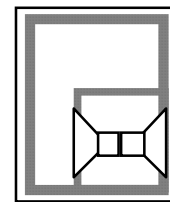
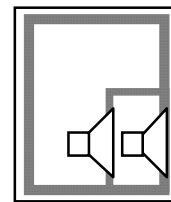


Wichtig:

- Werden die zwei Lautsprecher parallel geschaltet, wird die Impedanz der Box halbiert. Werden sie in Serie geschaltet, wird die Impedanz verdoppelt.
- Je nach Art des Einbaues muss einer der zwei Lautsprecher verpolt angeschlossen werden.

### 2 Lautsprecher, Compound-Konfiguration

- fs unverändert
- Qts unverändert
- Vas halb so gross
- Membranauslenkung unverändert
- je nach Einbau gleichen sich die Nichtlinearitäten des Lautsprechers aus



## 8. Eigenheiten von Musikaufnahmen

### Die Faktoren Sound, Image und Space

#### 8.1 Sound

Der Faktor *Sound* betrifft die klanglichen Eigenheiten einer Aufnahme. Beim Faktor *Sound* spielen die Art der Aufnahmetechnik und die Anzahl der Uebertragungskanäle nur eine untergeordnete Rolle. Bestimmend sind die klanglichen Eigenheiten der verwendeten Mikrofone und die Sound Design-Massnahmen des Tonmeisters.

#### 8.2 Image

Der Faktor *Image* beschreibt den wiedergabeseitigen *Direktschalleindruck*, also zum Beispiel die Abbildung eines Klangkörpers (Sinfonieorchester) im Wiedergaberaum. Beim Faktor *Image* kann man zwischen der links/mitte/rechts-Abbildung (*LCR, Left – Center – Right*), dem Eindruck der Tiefenstaffelung (*Depth*) eines Klangkörpers hinter der Lautsprecherebene, und einer Positionierung von Schallquellen im Wiedergaberaum (*In Room Image*) unterscheiden.

- **Left - Right Image**

Eine Links-Mitte/Rechts-Abbildung lässt sich mit den bekannten Möglichkeiten der Stereo-Aufnahmetechnik realisieren. Bei Aufnahmen in 5.1-Technik ist (mit Einschränkungen) auch eine Rund-um-Abbildung möglich.

- **Depth Image**

Eine Abbildung in der Tiefe hinter den Wiedergabelautsprechern lässt sich mit den bekannten Möglichkeiten der Stereo-Aufnahmetechnik realisieren. Die Position einzelner Instrumente oder Instrumentengruppen kann mit der Zuordnung zu verschiedenen *Layers* beschrieben werden.

##### Layer 0

Die Schallquellen werden raumlos in der Ebene der Wiedergabelautsprecher abgebildet. Der Raum, in dem die Aufnahme gemacht worden ist, wird nicht erkenntlich. Die Akustik des Wiedergaberaumes dominiert. Beispiele: Ansage beim Rundfunk, Sprecher, „Direktschnitt-Schallplatten“ aus der Anfangszeit der Audiotechnik (Caruso). Mikrofonierung: Polymikrofonie, nahe bei den Schallquellen platzierte Mikrofone.

##### Layer 1

Die Schallquellen sind in einem, beim direkten Hören als angenehm empfundenen Abstand hinter der Lautsprecherebene abgebildet. Bei der Wiedergabe wird die mitaufgenommene Akustik des Aufnahme Raumes deutlicher als die des Wiedergaberaumes. Beispiele: Kammermusikensemble, Einzelinstrumente und Sänger, Solisten. Mikrofonierung: Der Abstand der Mikrofone vom Klangkörper ist deutlich kleiner als der Hallradius des Aufnahme Raumes.

##### Layer 2

Schallquellengruppen werden in einem der Gruppengrösse angemessenen Abstand hinter der Lautsprecherebene abgebildet. Bei der Wiedergabe hat man den Eindruck eines üblich-angenehmen Zuhörabstandes. Beispiele: Grössere Instrumentalensembles (Kammerorchester) oder Streichergruppen von Sinfonieorchestern. Mikrofonierung: Zum Beispiel Kombination von Hauptmikrofonanordnung und Stützen. Der durch die Mischung sich ergebende Abstandseindruck ist kleiner als der Hallradius

des Aufnahmeraumes.

#### Layer 3

Abbild der zweiten Ebene eines tiefengestaffelten, grossen Klangkörpers. Die akustischen Eigenheiten des Aufnahmeraumes sind deutlich wahrnehmbar.

Beispiele: Blasinstrumente und eventuell Contrabässe, sowie die Schlagzeuginstrumente eines Sinfonieorchesters, Orgel in einer grossen Kirche.

Mikrofonierung: Kombination von Hauptmikrofon-Anordnung und Stützen. Der Abstandseindruck kann dem Hallradius des Aufnahmeraumes entsprechen.

#### Layer 4

Deutlich entfernte Schallquellen, die im Raum (oder, im Falle von Fernorchestern) ausserhalb des Raumes abgebildet erscheinen.

- **In Rom Image**

Abbildung von Schallquellen innerhalb des Wiedergaberaumes.

## 8.3 Space

Der Faktor *Space* betrifft die Wiedergabe der akustischen Umgebung, also die *Räumlichkeit* ohne spezifische Ortung von Einzelschallquellen

- **Full Space**

Der Zuhörer fühlt sich in eine virtuelle akustische Umgebung eingebettet.

Beispiele: Kunstkopfaufnahmen mit Kopfhörerwiedergabe, Ambiophonie- und optimale Surround-Aufnahmen.

- **Front Space**

Der Räumlichkeitseindruck wird nur von vorn übertragen (Logensituation). Er wird als eingeschränkt, aber natürlich empfunden.

Beispiel: Stereoaufnahmen

- **Side Space**

Ein räumlicher Eindruck stellt sich nur seitlich vom Zuhörer ein. Der Räumlichkeitseindruck ist unnatürlich.

Beispiel: unguete Surround-Aufnahmen.

- **Back Space**

Ein räumlicher Eindruck stellt sich nur hinter dem Zuhörer ein. Der Räumlichkeitseindruck ist unnatürlich.

Beispiel: unguete Surround-Aufnahme.

## 8.4 Bewertung der Faktoren Sound, Image und Space

### Sound

Der erste Eindruck, der sich beim Anhören einer Aufnahme einstellt, wird von Faktor *Sound* bestimmt. Bei einer gut klingenden Aufnahme treten eventuelle Mängel bei den Faktoren *Image* und *Space* in den Hintergrund. Von den „Musikfreunden“ unter den Konsumenten werden derartige Mängel oft überhaupt nicht wahrgenommen.

Der Faktor *Sound* wird von der Anzahl der Wiedergabekanäle und der Art der Aufnahmetechnik nicht direkt beeinflusst. Neben dem Klangcharakter der Mikrofone und den während der Aufnahme und Post Production vorgenommenen Klangbeeinflussungen wird dieser Faktor von den Eigenschaften der Wiedergabelautsprecher mitbestimmt.

### Image

Mängel beim Faktor *Image* werden meist nicht spontan wahrgenommen. Sie werden erst

beim analytischen Anhören einer Aufnahme deutlich.

**Space**

Beim Faktor *Space* steht die Natürlichkeit des Räumlichkeitseindrucks im Vordergrund. Der Zuhörer soll ja in eine virtuelle akustische Umgebung versetzt werden. Dies lässt sich optimal mit einer raumabbildenden Mikrofonanordnung oder einem entsprechenden künstlich erzeugten Signal realisieren.

## 9. Aufnahmetechnik

### 9.1 Grundkonzepte

#### 9.1.1 Aufnahmebezogene Aufnahmetechnik (Ambiophonie)

Aufgenommen wird mit einer speziellen Einpunkt-Mikrofonanordnung, zum Beispiel bestehend aus der Kombination eines Schalldruckempfänger für das sogenannte Tonsignal und drei Druckgradientenempfängern mit achterförmiger Richtcharakteristik für ein dreidimensionales Richtungssignal. Diese drei Mikrofone sind in den x-, y- und z-Raumrichtungen ausgerichtet. Die resultierende vierkanalige Aufnahme erfasst alle Einfallrichtungen des Schalls am Ort der Mikrofonanordnung.

Bei der Wiedergabe dieser Aufnahme wird das vierkanalige Signal mit einer Matrixschaltung auf eine beliebige Anzahl von Wiedergabekanälen aufgeteilt, und zwar nach Massage der Anzahl und der Position der Lautsprecher im Wiedergaberaum.

Grundidee:

Aufgenommen wird das Schallfeld im Aufnahmeraum.  
Die Wiedergabesituation bleibt offen.

#### 9.1.2 Wiedergabebezogene Aufnahmetechnik

Vorgegeben ist eine bestimmte Anzahl von Uebertragungskanälen und Lautsprechern im Wiedergaberaum. Ebenfalls festgelegt ist die Aufstellung der Lautsprecher (zum Beispiel die üblichen Set Up's für Stereowiedergabe oder für 5.1-Surroundaufnahmen).

Grundidee:

Die Aufnahme wird für eine vorgegebene Wiedergabesituation gemacht.

## 9.2 Mikrofonierungsmöglichkeiten für wiedergabebezogene Aufnahmen

### 9.2.1 Abbildende Mikrofonierung

Es werden Mikrofonanordnungen eingesetzt, die (im Bezug auf die wiedergabeseitige Lautsprecheraufstellung) bereits die richtigen Abbildungsinformationen (Laufzeit, Intensitäts- und Frequenzgangunterschiede zwischen den Wiedergabekanälen) liefern.

Also zum Beispiel Intensitäts-Mikrofonanordnungen (XY, MS), kopfbezogene Mikrofonanordnungen (ORTF, etc), sowie Anordnungen mit Trennkörpern (Jecklin-Scheibe etc.)

Bei der abbildenden Mikrofonierung werden *Image* und *Space* primär von der Mikrofonanordnung bestimmt. Die Gestaltungsmöglichkeiten am Mischpult und bei der Post Production sind eingeschränkt.

Die für die jeweilige Mikrofonanordnung vorgegebenen Richtcharakteristik der Mikrofone (Kugel, Niere, Acht, Superniere, etc.) ist auch für den Faktor *Sound* bestimmend.

Die Folge: Wenn ein „Schalldruckempfänger-Sound“ realisiert werden soll, muss eine Trennkörper-Anordnungen gewählt werden.

### 9.2.2 Trennende Mikrofonierung

Bei der Aufnahme werden nur die klanglichen Eigenheiten der Schallquellen aufgenommen, nicht aber ihre Platzierung.

Uebliche Mikrofonierung:

Polymikrofonie mit den Schallquellen zugeordneten Mikrofonen.

Bei der Aufnahme muss auf eine deutliche akustische Trennung zwischen den Mikrofonen geachtet werden.

Typische Eigenheiten:

Bei einer trennenden Mikrofonierung wird nur der Sound der Instrumente aufgenommen, nicht aber die Platzierung im Raum. Image und Space müssen am Mischpult oder bei der Postproduction realisiert werden. Da die Mikrofone aber weitgehend im Bezug auf ihre klanglichen Eigenheiten ausgewählt werden können, stehen bei der Gestaltung des Sounds alle sich mikrofonseitig bietenden Möglichkeiten offen.

### 9.2.3 Vermischende Mikrofonierung

Die Mikrofone werden so aufgestellt, dass einerseits einzelne Schallquellen, oder Raumbereiche mit mehreren Schallquellen bevorzugt aufgenommen werden, und andererseits eine "Vermischung" der Signale stattfindet, die einen einheitlichen Gesamteindruck zur Folge hat.

Uebliche Mikrofonierung:

A/B- und A/M/B-Technik, Polymikrofonie in halligen Räumen.

Typische Eigenheiten:

Eine vermischende Mikrofonierung ist prinzipiell geeignet für eine Realisierung des Faktors *Image*, die Abbildung entspricht aber in der Regel nicht der Wirklichkeit (Gefahr eines „Loches in der Mitte“ bei der AB-Technik). Nicht optimal realisieren lässt sich aber der Faktor *Space*. Der resultierende Raumeindruck kann unnatürlich (A/B-Technik) oder zerrissen (Polymikrofonie) sein.

Da die Mikrofontypen relativ frei gewählt werden können, ist der Faktor Sound meist problemlos in den Griff zu bekommen.