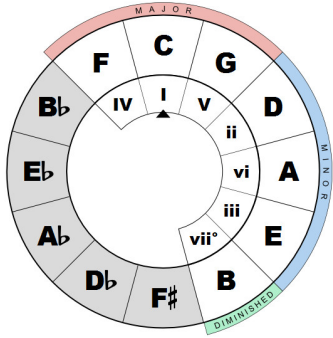


## 1. Musiktheorie



### 1.1. Stimmungen

Funk-A: 443 Hz  
 Mittelalter: reine Stimmung  
 Bach: Wohltemperierte Stimmung (=Werckmeister Stimmung)  
 Heute: gleichschwebende Stimmung:  $1\sqrt[12]{2}$

### 1.2. Gehör

Absolutes Gehör: 440 Hz  $\pm$  6% erkennen.  
 Relatives Gehör: Tonintervall (Tert, Quint) erkennen.

## 2. Akustik von Musikinstrumenten

### 2.1. Streicher (klassisches Orchester) ( $\lambda/2$ )

Violen: Senkrechter Winkel vom Hals weg, Quintenabstand  
 Gamben: Hängende Schultern bzw. schräger Winkel vom Hals weg, Quartabstand

Violine/Geige:  $g_3, d_4, a_4, e_5$   
 Viola/Bratsche:  $c_3, g_3, d_4, a_4$   
 Violoncello/Cello:  $g_2, d_3, a_3, e_4$   
 Kontrabass/Bass: ( $H_0$ ),  $E_1, A_1, D_2, G_2$

### 2.2. Klavier ( $\lambda/2$ )

Biegeschwinger: Obertöne sind nicht exakt sondern haben Inharmonizitäten bzw. Frequenzverschiebung der Obertöne, da sich die Saite streckt

### 2.3. Gitarren ( $\lambda/2$ )

Saiten:  $E_2, A_2, D_3, G_3, H_3, E_4$   
 Helmut Fleischer: Untersuchungen zu dead spots  
 Energie der Saite sollte komplett in den Tonabnehmer gehen, allerdings wird Schwingenergie auf den Hals übertragen (mm Bereich)  
 Dead-Spots treten da auf wo die Bäuche der Halsschwingung sind.  
 Mechanik auf einer Seite führt zusätzlich zu Querschwingungen. Bei symmetrischer Mechanik treten auch viele deadspots auf

#### 2.3.1 E-Gitarre

Phaser: FIR, Käme im Frequenzgang  
 Flanger: IIR, Spitzen im Frequenzgang

#### 2.3.2 E-Bass

Saiten:  $E_1, A_1, D_2, G_2$   
 Riverhead Bass: Mechanik unten

### 2.4. Holz-Blasinstrumente

Klarinette:  $\lambda/4$ -Schwinger oder  $\frac{3}{4}\lambda$  (Duodezime)  
 Überbläst nicht in die Oktave!  
 B-Klarinette (standard) und Es-Klarinette (scharf, Militärmusik)  
 A-Klarinette Halbton tiefer: 6% länger.

#### 2.4.1 Orgel

$\lambda/2$  oder gedackt (Deckel)  $\lambda/4$   
 Tiefster Ton: 17 Hz hat bei  $\lambda/2$  eine 10 m lange Pfeife  
 Für zuhause: virtuelle Tonhöhe z.B. 100 Hz aus 200 Hz und 300 Hz

\*: siehe Orgelliteratur

#### 2.4.2 Blockflöte

$\lambda/2$ , da Labium (Öffnung hinter Mundstück)

#### 2.4.3 Querflöte

$\lambda/2$

#### 2.4.4 Saxophon

Sopran, Alt, Tenor, Bariton mit  $\lambda/2$

### 2.5. Blechblasinstrumente

Trompete, Posaune, Tuba: Kesselförmiges Mundstück  
 Hörner: Trichterförmiges Mundstück

Trompete: 3 Ventile: 2,1,3 Halbtöne nach oben (0.86) : 2 : 3 : 4 : 5  
 Fehler:  $(1 + nx) < (1 + x)^n$   
 Dehlab: 3. Ventil größer, für 3 HT werden die ersten beiden Ventile verwendet.

### 2.6. Weitere Instrumente

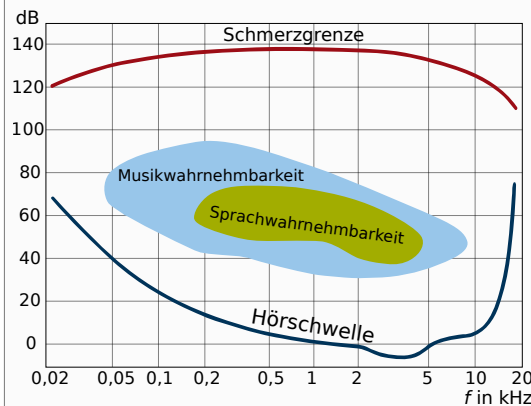
Pauke: Am Rand anschlagen, damit asymmetrische Moden entstehen  
 Hackbrett:  
 Hammond-Organ: mit Leslie Lautsprecher(drehend)  
 Thermin: Zwei Antennen

### 2.7. Frequenzskalen

Physikalische Frequenz: 0 bis 5 kHz Grundton, 5 bis 20 kHz Klangfarbe (Obertöne)  
 Bark Skala: 0 bis 18 Grundton, 18 bis 24 Klangfarbe.

## 3. Musikalische Klänge

### 3.1. Hörfläche



### 3.2. Wahrnehmung

Gehörganglänge: 2.5cm Trommelfell:  $1 \text{ cm}^2$   
 Schallintensität bei 90dB:  $I = 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

IRT < 85 dB  $\hat{L} < 130$  dB Kopfhörer: Kennschalpegel bei 1mW  
 Tiefe Frequenzen: Weniger Gefährdung, deswegen nur 1 Picoloftöte aber viele (8) Kontrabässe.  
 Schall-Leistung L: Faktor 2 entspricht 3dB  
 Schalldruck p: Faktor 2 entspricht 6 dB  
 Lautheit S: Faktor 2 entspricht 10 dB.

Helmholz: Langzeitspektren zur Synthese:

Klingt nicht authentisch, da einschwingvorgänge unberücksichtigt bleiben

### 3.3. Schallpegelmesser Apps

Noise Immission Analyzer (iPhone) Noise Meter (Android)  
 Auflistung von EMPA.

### 3.4. Kopfhörer

Kennschalpegel: Schalpegel bei 1 mW  
 Nennbelastbarkeit: Maximale Betriebsleistung  
 Klirrfaktor: Verzerrung einer Eingangs-Sinusschwingung in %

$$\Delta L = 20 \lg \frac{U}{U_{ref}} = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ in dB}$$

Maximaler Schalldruck: Kennschalldruck(dB) +  $\Delta L$  bei Nennbelastbarkeit.

Frequenzunterschied hörbar bei 440 Hz: etwa 4 Hz Kleine Unterschiede im Grundton sind schwer wahrnehmbar, mit harmonischen Obertönen

### 3.5. Vibrato

Wichtige Größen: Geschwindigkeit und Exkursion ( $\Delta f$ )  
 Wahrnehmbare Unterschiede (Exkursion):  
 A2: 55 Cent, A3: 27 Cent, A6: 13 Cent  
 Deshalb Faktor 2 oder 3 für musikalisch gewollten Vibrato  
 Bei tiefen Tönen langsam (3 Hz), bei hohen Tönen schnell (6 Hz)

### 3.6. Oktave

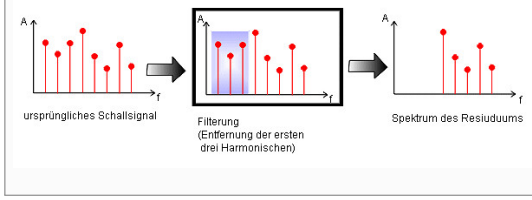
Bei einem Intervall nach oben fällt ein zu hoher Ton weniger auf als zu niedrig. Bei einem Intervall nach unten genau andersrum.  
 Ein Stück klingt sogar besser, wenn die obere Stimme eine etwas größere Oktave zum Bass hat.

### 3.7. Lautheit

Lautheit (DIN45631): Lautstärke wird durch die Fläche des Frequenzspektrums bestimmt. 4 sone werden doppelt so laut empfunden, wie 2 sone.  
 IRT: Wie laut ist der Schall und die Quelle? Man kann originalpegel an stimmen von bekannten personen erkennen.  $\pm 0.4$  dB

### 3.8. Virtuelle Tonhöhe

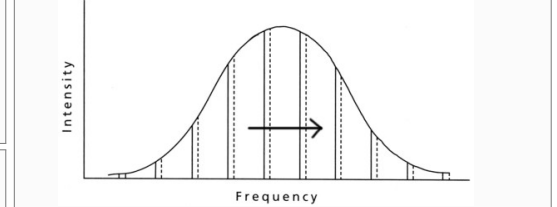
Die wahrgenommene Tonhöhe eines Klanges entspricht i.a. der Grundschwingung (1. Harmonische). Werden nur die höheren Obertöne übertragen und abgespielt, rechnet das Gehirn die niederen Obertöne bis zum Grundton zurück und fügt diese hinzu. Die wahrgenommene Tonhöhe bleibt damit gleich.



### 3.9. Psychoakustik

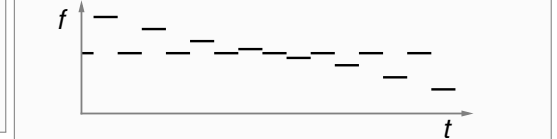
Die Psychoakustik befasst sich mit der subjektiven Wahrnehmung von Schall (Musik, Klang, Lärm etc.) und der Informations-Verarbeitung des Gehörs. Dabei werden eine Reihe akustischer Täuschungen beobachtet.

**Shepard Pitch:** Ton der scheinbar unendlich nach oben oder nach unten verschoben wird.



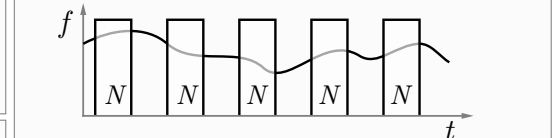
Hüllkurve bleibt erhalten, die frequenzen werden zyklisch von einer seite zur anderen geschoben

**Galloping Rhythm:** ein konstanter Ton mit abständen, dazwischen aufsteigender ton.



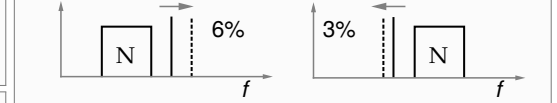
Wenn sie sich treffen klingen sie gallopiierend.

**Continuity Effekt:** abwechselnd Musik (250ms) und weißes Rauschen (200ms) klingt kontinuierlich. Gehirn schätzt Verlauf

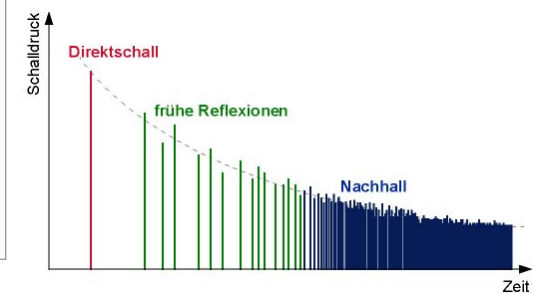


**Remastering:** Wird hochfrequentes Rauschen von Platten entfernt, wirkt sich das negativ auf die Brillanz auf. Gewolltes hochfrequentes Rauschen damit Instrumente brillanter empfunden werden.

**Tonhöhenverschiebung:** Bandbegrenztetes Rauschen neben einem Ton verschiebt diesen im Frequenzspektrum von sich weg. Verschiebung nach oben im Mittel um 6% nach unten um etwa 3%, allerdings ist dies personenabhängig.



## 4. Raum- und Bauakustik



#### 4.1. Nachhallzeit

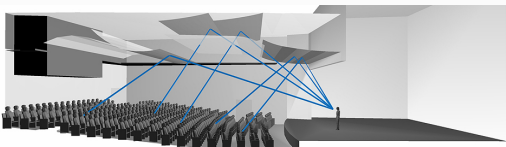
Zeitspanne, in welcher der Schalldruckpegel  $L$  eines Schallereignisses (1 kHz) in einem Raum um  $\Delta L_{dB} = 60$  dB (auf  $\frac{1}{1000}$ ) absinkt. Klagen über eine schlechte Akustik sind meistens mit nicht angemessenen Werten für die Nachhallzeit verknüpft.  
Grobe Richtwerte: Sprache  $\leq 1$  s, Orchester 2s, Kirchenmusik 3...4s

Messung: Breitbandiges Signal länger spielen und schlagartig aufhören. Sabine'sche Nachhallformel:  $T_N = 0.163 \frac{V}{\alpha S}$   
Absorptionsfläche  $S$ , Absorptionskoeffizient  $\alpha$   
Äquivalente Absorptionsfläche  $A = \alpha S$

#### 4.2. Hallradius

Abstand  $r_H$ , bei dem Direktschallpegel  $L_D$  und Raumschallpegel  $L_R$  (frühe Reflexionen und Nachhall) gleich groß sind.  
 $r_H = 0.14 \sqrt{\alpha S}$   
Gerichtetes Schallfeld: bis 8 meter, danach diffuses Schallfeld  
-  $\dot{z}$  Relativ nah in die Orgel

#### 4.3. Raumakustik



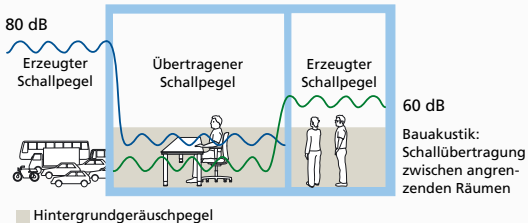
Ziel: Gut klingende Räume je nach Zweck.

**Studio:** Reflexionsarm, möglichst nur direkt Schall, keine Eigencharakteristik des Raumes, neutrale Wiedergabe.  
**Konzertsaal:** räumlicher und lebendiger Klang, viele frühe Reflexionen, Nachhallzeit 1 bis 3 Sekunden, Einhüllung  
**Konferenzraum:** Hohe Sprachverständlichkeit, Nachhallzeit  $< 1$  Sekunde, viel direkt Schall  
Viele Plätze ( $\dot{z}$ 2000) bedeutet viele Menschen, die Schall absorbieren.

#### 4.3.1 Eigencharakteristik

Vivace: Mikro + Lautsprecher für künstliche Nachhallzeit. Damit kann Konzertsaalakustik im freien simuliert werden.  
IRCAM: Raum mit vielen verstellbaren Dreiecken die unterschiedliche Absorptionskoeffizienten haben  
ATR: Drehbare Zylinder mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten.  
BR: Resonanzabsorber: Halboffene Kästen, die gedreht werden können.

#### 4.4. Bauakustik



Ziel: Keine Störgeräusche im Raum. Es gibt Luftschallschutz und Trittschallschutz (Körperschall)  
Dämpfung von Wänden  $\bar{R} = 13 \lg G + 15$   
Wandgewicht  $G$  in  $\frac{kg}{m^2}$

#### Exkursion:

#### 4.5. Räume

**Runde Bauforn:** (Kreis, Kuppel) schlecht, viele Fokussierungen  
**Fächerform:** Mittel  
**Schuhschachtelform:** Gut, Frühe Reflexionen, breite Streuung des Schalls, keine Ausbildung von Brennpunkten wie bei Runden Baufornen.  
**Schräge Wände:** Verhinderung von stehenden Wellen, da es keine parallele Flächen gibt und dadurch reflektierte Wellen nicht in die gleiche Richtung zurücklaufen bzw. zwischen zwei Flächen gefangen werden.  
**Schallabsorber:** Feine Löcher und Schlitze in den Wänden/Flächen absorbieren den Schall und vermindern generell die Reflexion.

#### 4.6. Mikrofone

**4.6.1 Intensitätsmikrophonie**  
Stereomikrophone an einem punktuellen Ort. Lautstärkeunterschiede bestimmen Position der Phantomschallquelle.  
**4.6.2 Laufzeitenmikrofonie**  
Mikrofonpärchen mit bestimmtem Abstand. Laufzeitdifferenz zwischen Schallsignal bestimmt Position.  
Abstand vom Mikrofonpärchen:  
zu groß: Laufzeit zu groß, zu große Unterschiede im Klang, keine Phantomschallquelle mehr  
zu klein: weniger Stereoeffekt, ungenauere Messung.

#### 4.6.3 Polymikrophonie

Für jedes Instrument einzelnes Mikrophon, möglicherweise auch hintereinander aufgenommen.  
Kondensator (Druckempfänger): Neumann, Schöps  
Dynamische (Schnellempfänger): Senheise, Shure  
werden für Nahbesprechung Bändchen (Schnellempfänger): Beyer

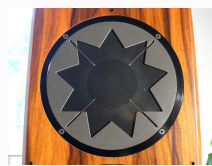
#### 4.6.4 Charakteristika

Kugel, Acht, Niere, (Superniere, Hyperniere)

#### 4.6.5 MS-Stereo

Mitte-Kanal  $M$  (Kugelcharakteristik)  
Seite-Kanal  $S$  (Achtcharakteristik)  
 $M = L + R$      $S = L - R$   
 $M + S = 2L$      $M - S = 2R$

#### 4.7. Manger Schallwandler



Das besondere am Manger Schallwandler ist, dass die Membran ausschließlich in sich selbst schwingt - so entstehen nämlich die mangertypischen "Biegewellen". Der akustische Clou bei dem Ganzen ist, dass komplexe Schallsignale so phasengenau in ihre Komponenten zerlegt werden können.

#### 4.8. Musikaufnahme und Wiedergabe

Räumlichkeit für Pop-Rock: Niels Adelman-Larsen  
Volumen und Nachhallzeit: 1,5 s gut, ab 3s schlecht.

### 5. Sonstiges

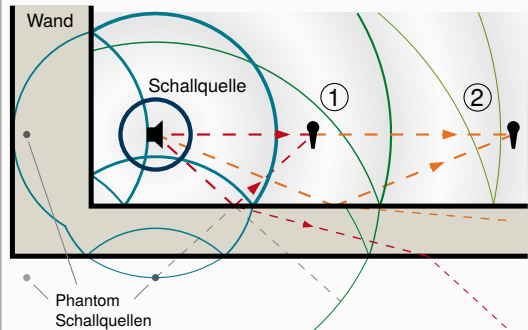
#### 5.1. Akustische Begriffe:

**Schalldruck:**  $p$  in Pa Druck der Schallwelle  
**Schallschnelle  $v$ :** Geschwindigkeit der sich bewegenden Teilchen  
**Schallgeschwindigkeit  $c$ :** Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle  
**Lautheit:** entspricht Menschlichem Lautstärkeempfinden. Einheit sone.  
**Kennschalldruck:**  
**Klirrfaktor:** Maß für unerwünschte Verzerrung eines Sinustons in %  
**Schallabsorptionsgrad:**  $\alpha \in [0, 1]$  Maß wie stark ein Material auftretenden Schall absorbiert und in andere Energieform, z.B. Wärme umwandelt. 0 (totale Reflexion) und 1 (totale Absorption)

#### 5.2. Initial Time Delay Gap (ITDG)

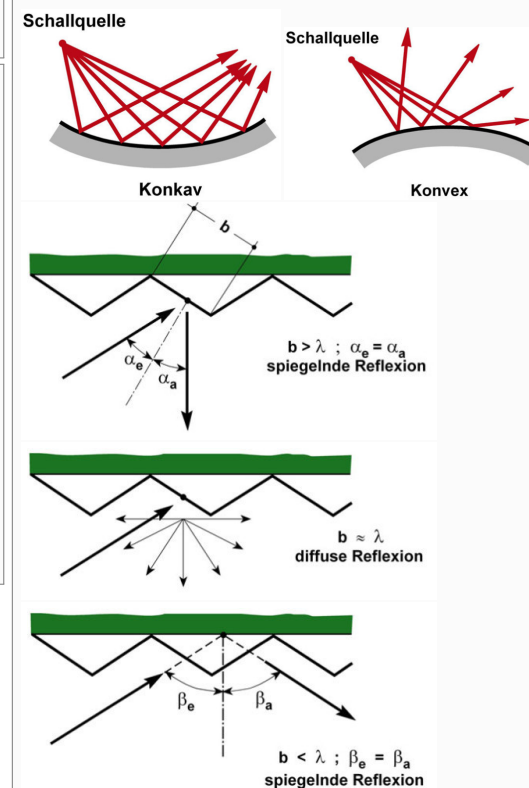
Zeit  $\Delta t$  zwischen dem zuerst eintreffenden Direktschall  $D$  und den frühen Reflexionen  $R$  des unkorrelierten Raumschalls.  $\Delta t = \frac{(d_{R1} + d_{R2}) - d_D}{c}$

#### 5.3. Wellenausbreitung



Reflektierte Wellen sehen so aus, als ob sie von einer Phantomschallquelle ausgehen, die den selben Abstand zur Fläche hat wie die Schallquelle selbst. (Vgl. Spiegelladungsmethode) Beim Mikrofon ① ist der Laufzeitunterschied zwischen Direktschall und erster Reflexion größer als bei ②. In fester Materie(Wand) breitet sich Schall schneller aus, die Wellenfront wird sozusagen weggebrochen (Vlg. Optik). Ab einem bestimmten Einfallswinkel tritt Totalreflexion auf (②).

#### 5.4. Reflexionen



#### 5.5. Schallpegel

Addition:  $L_1 + L_2 = 10 \log \left( 10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right)$

#### 5.6. Raumresonanzen

Raumresonanzen führen in Räumen zu einer Verschlechterung der Sprachverständlichkeit, da einzelne Frequenzen besonders hervorgehoben werden. Unter Raumresonanzen versteht man die Eigenfrequenzen der stehenden Wellen.

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

$n_x, n_y, n_z \in \mathbb{N}_0$

| Psychoakustik   |         | Physik                |                                |
|---|---------|-----------------------|--------------------------------|
| Bezeichnung   | Einheit | Bezeichnung           | Einheit                        |
| Tonheit $Z$   | Bark    | Frequenz $f$          | Hz                             |
| Verhältnistoh. $V$  | Mel     | Schalldruck $p$       | $\frac{N}{m^2} = Pa$           |
|   |         | Schallschnelle $v$    | $\frac{m}{s}$                  |
|   |         | Schallintensität $I$  | $\frac{W}{m^2} = \frac{N}{sm}$ |
| Lautstrk.pegel $L_n$  | Phon    | Schalldruckp. $L$     | dB                             |
| Lautheit $N$  | sonne   | Schallleist. $P_{ak}$ | $W = \frac{Nm}{s}$             |
| Bezugsschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} = 20 \mu Pa$ |         |                       |                                |
| Bezugsintensität $I_0 = 1.0 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$           |         |                       |                                |