



# Akustik macht Musik

*Schwingende Luft, flirrende Saiten,  
vibrierende Platten  
Weshalb klingen Musikinstrumente?*

Eberhard Meinel



## 1. Einleitung

Musik ist für die meisten Menschen ein emotionales Erlebnis. Wie entsteht aber Musik? Wie kann ich (wohlklingenden) Schall erzeugen? Etwas salopp ausgedrückt handelt es sich ja offenbar um eine „kultivierte“ Form von Geräuschen und Lärm. Was unterscheidet aber Musik von Lärm? Und wie funktionieren Musikinstrumente eigentlich?

### Grundprinzip:

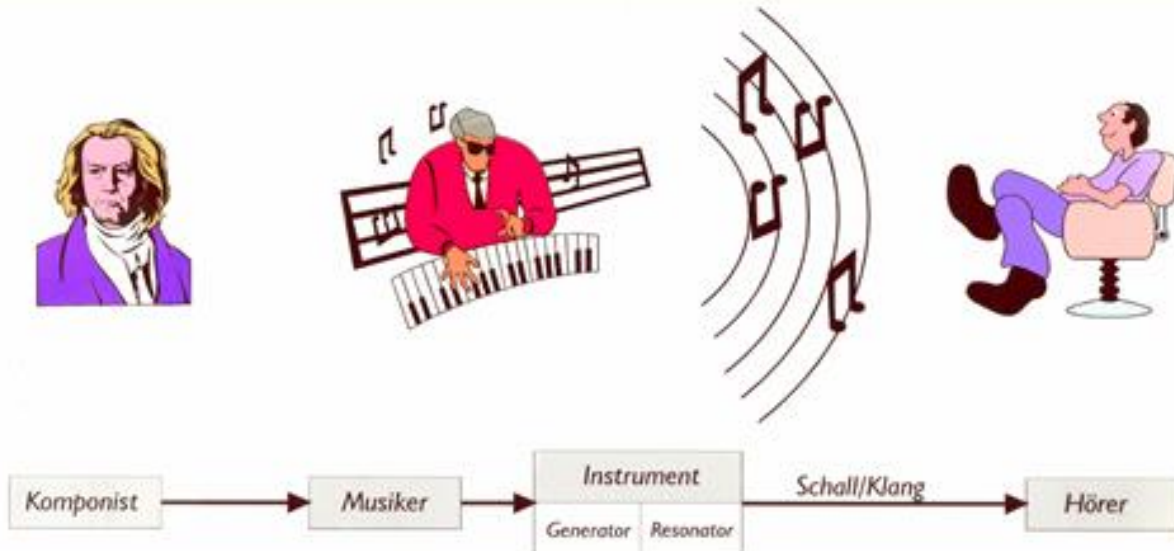
- Musikinstrumente sind besonders schwingfähige Systeme, die zu mehreren Eigenschwingungen angeregt werden können (→Resonanzen).  
→ Es handelt sich stets um komplexe Schwingungen.  
→ Wohlklang entsteht z. B. durch harmonische (ganzzahlige) Frequenzverhältnisse. Dann ist auch die Tonhöhe gut zu erkennen. Aber auch geräuschartige Klangeffekte lassen sich musikalisch einsetzen.
- Weitergabe der Eigenschwingungen in Form von Luftschall an die Umgebung.
- Hörer: Umsetzung des Schalls in nervale Reize (Hörorgane) → Interpretation im Gehirn (Das Gehirn arbeitet allerdings nicht wie ein physikalisches Messgerät!).

Die Musikalische Akustik befasst sich u. a. mit folgenden Fragestellungen:

- Wie funktioniert ein Musikinstrument? Wie erfolgt die Tonerzeugung?
- Nach welchen Kriterien wird ein Musikinstrument beurteilt?
- Sind diese Kriterien messbar und wie sind sie zu messen?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen objektiven physikalischen Messgrößen und den subjektiven Empfindungen von Spielern und Hörern?
- Wie beeinflussen Materialeigenschaften (z. B. Klangholz) und Bauweise der Instrumente den Klang und andere Eigenschaften?
- Wie lassen sich Qualitätsverbesserungen oder Klangänderungen erreichen?

Das Prinzip der Klangerzeugung lässt sich stark vereinfacht anhand der so genannten Tonerzeugungskette veranschaulichen.

## Tonerzeugungskette



Am Anfang steht also eine Idee des Komponisten, die der Musiker mit Hilfe eines Musikinstrumentes umsetzen kann. Das Musikinstrument kann dabei vereinfacht als Generator (Anregung) und Resonator (Verstärkung, Strahler) betrachtet werden.

Eine Einteilung der Musikinstrumente lässt nach verschiedenen Gesichtspunkten vornehmen, z. B. in:

- Blasinstrumente
- Schlaginstrumente
- Saiteninstrumente
- Elektrophone

Die folgenden Ausführungen beschränken sich weitgehend auf Saiteninstrumente. Blas- und Schlaginstrumente sollen nur kurz angesprochen werden.

## 2. Schwingende Luftsäulen

Schwingende Luftsäulen → Luftklinger (Aerophone) → Blasinstrumente

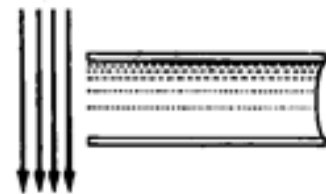
Anregungsprinzipien:



Doppelrohrblatt  
(Oboe)



Einfachrohrblatt  
(Klarinette)



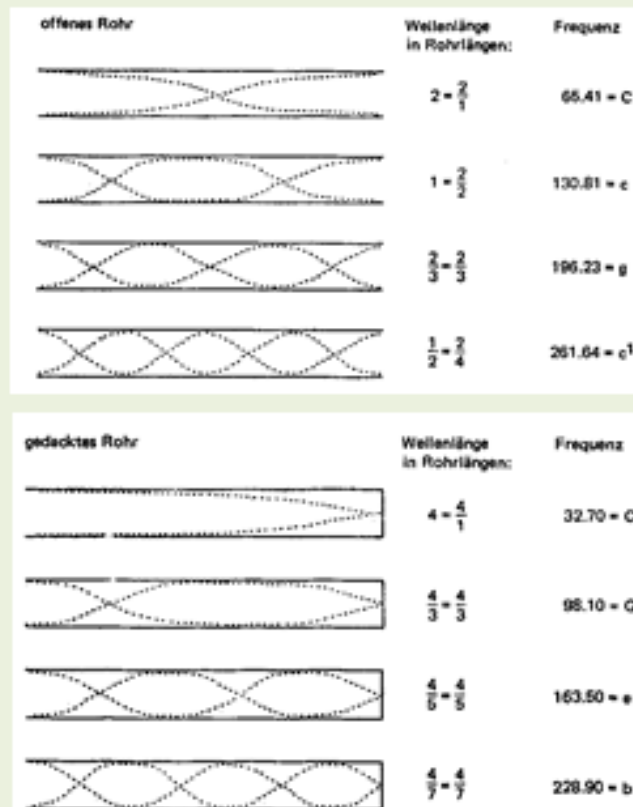
„Luftblatt“  
(Flöte)



„Lippenblatt“  
(Blechblasinstrumente)

Die Rohrblätter arbeiten gewissermaßen wie ein Ventil, wodurch der gesteuerte Luftstrom in der angeschlossenen Röhre eine stehende Welle erzeugt. Bei Flöten erzeugt der an einer Kante oder Schneide vorbeiströmende Luftstrom einen Luftwirbel, der die stehende Welle erzeugt. Rohrblätter werden gelegentlich auch als „Zungen“ bezeichnet. Ergänzend seien die „Durchschlagzungen“ (Mundharmonika, Akkordeon) erwähnt.

## Luftschwingungen in zylindrischen Röhren (stehende Wellen)



Die stehenden Wellen sind durch „Bäuche“ und „Knoten“ gekennzeichnet (Zonen starker und geringer Luftschwingungen bzw. hohen Druckes). Sie entstehen durch Reflexion an den Enden, indem sich die hinlaufende Welle mit der reflektierten rücklaufenden überlagert. Nur ein Teil der eingespeisten Schwingungsenergie wird also abgestrahlt.

In zylindrischen Röhren stehen die Frequenzen in einem ganzzahligen (harmonischen) Verhältnis. Die meisten Blasinstrumente haben allerdings keine streng zylindrischen Röhre, was u. a. Probleme bezüglich der Stimmung mit sich bringt, und ebenso sind die Enden nicht streng offen oder einseitig geschlossen (gedackt).


### 3. Schwingende Platten


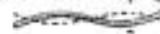









Eine Gruppe der Schlaginstrumente beruht auf dem Prinzip schwingender Stäbe, Platten oder Schalen.

**Schwingende Platten → Selbstklinger (Idiophone) → Stabspiele, Becken, Glocken**

**Anregung: Schlägel o. ä.**

transvers
torsional



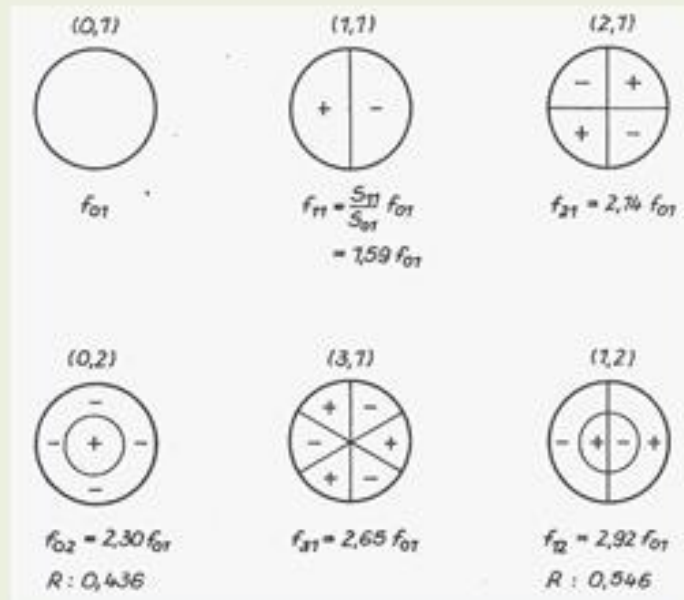
$f_1 = 1.00$		
$f_2 = 2.71$		
$f_{1t} = 3.25$		
$f_3 = 5.15$		
$f_4 = 7.07$		
$f_{2t} = 8.00$		
$f_4 = 8.43$		
$f_5 = 10.61$		
$f_7 = 11.26$		
$f_6 = 12.21$		
$f_8 = 13.95$		

Platten vermögen selbst Schall abzustrahlen, der sich allerdings noch durch einen angekoppelten Resonanzkörper wie beim Metallophon verstärken lässt. Die Grundton und Oberschwingungen sind wiederum durch eine bestimmte Anzahl von Knotenstellen gekennzeichnet. Die Eigenresonanzen liegen nicht harmonisch zueinander. Jedoch kann eine Klangverbesserung erreicht werden, indem durch gezielte Ausarbeitung wenigstens der 1. Oberton auf die vierfache Frequenz des Grundtones abgestimmt wird.

## 4. Schwingende Membrane

Schwingende Membranen → Fellklinger (Membranophone) → Trommeln

Anregung: Schlägel, Hände



Die Knoten zwischen den Schwingungszonen sind als Linien oder kreisförmig veranschaulicht. Wiederum ist die Obertonlage nichtharmonisch, was eine genaue Tonhöhenempfindung erschwert. Eine Ausnahme gibt es. Bei der Pauke lässt sich ebenfalls bei der Anregung eine gewisse Harmonisierung der Teiltöne erreichen.

## 5. Schwingende Saiten

Die Anregung kann erfolgen durch:

**Streichen** → Streichinstrumente (Violine)



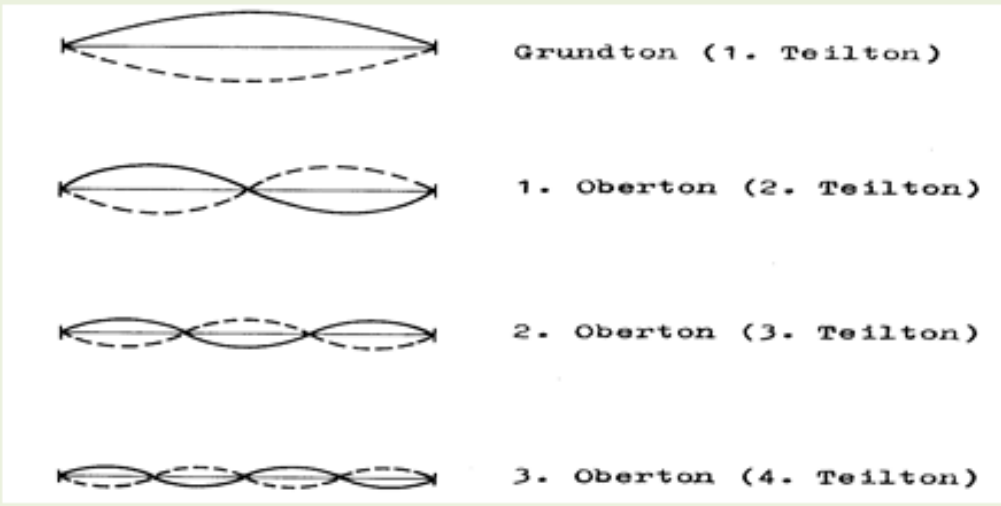
**Anschlagen** → besaitete Tasteninstrumente (Klavier, Flügel)



Zupfen → Zupfinstrumente (Gitarre)



### Eigenschwingungen der idealen Saite

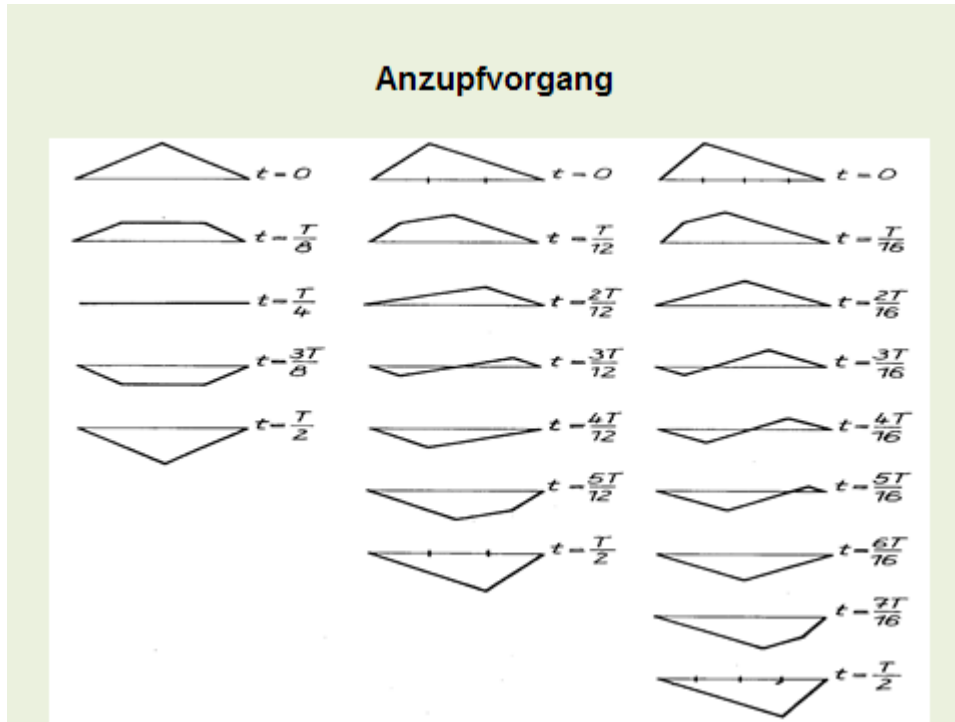


$$f_n = n \cdot f_1$$

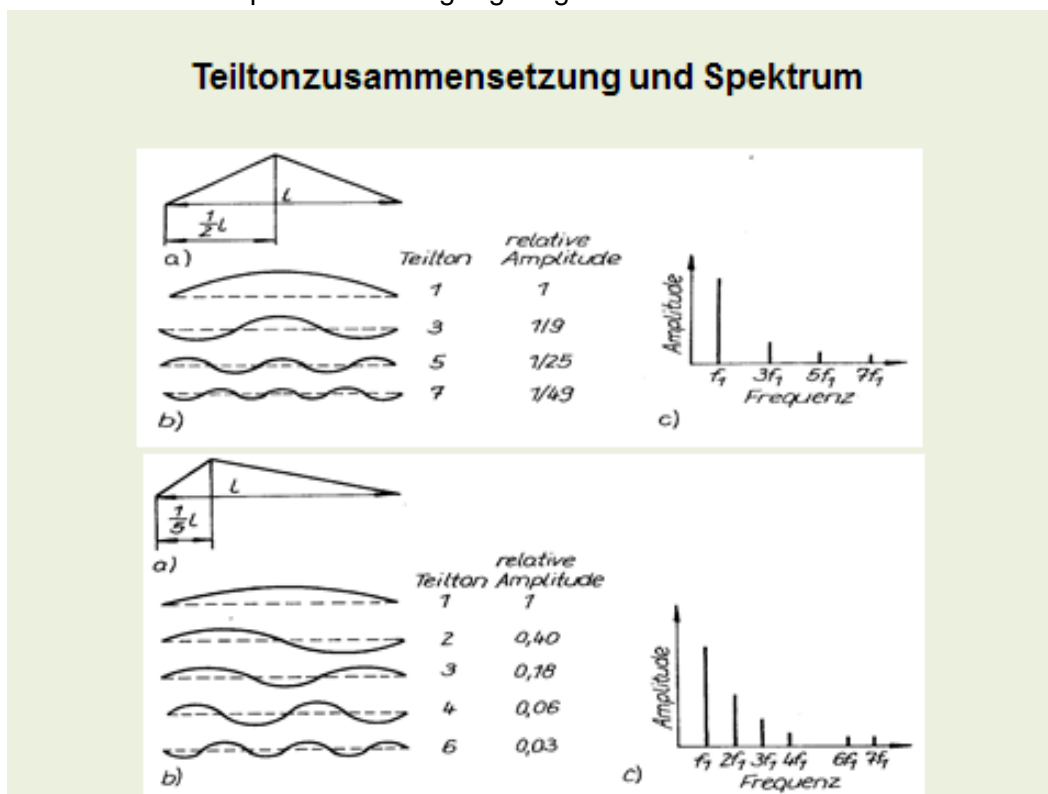
Die Obertöne liegen streng harmonisch zum Grundton. Bei realen Saiten sind allerdings Abweichungen in der Harmonizität nicht ganz zu vermeiden.



Beim Anzupfen zeigt sich je nach Anzupfort ein scheinbar umlaufender Auslenkungsknick.



Der Auslenkungsknick kann als Resultat der Überlagerung verschiedener Eigenschwingungen der Saite zu einer komplexen Schwingung aufgefasst werden.



Welche Eigenschwingungen in welcher Intensität und Phasenlage auftreten, hängt im Wesentlichen von Anzupfort ab. Obertöne, die an der Anregungsstelle einen Knoten haben, werden unterdrückt und erscheinen nicht im Spektrum.

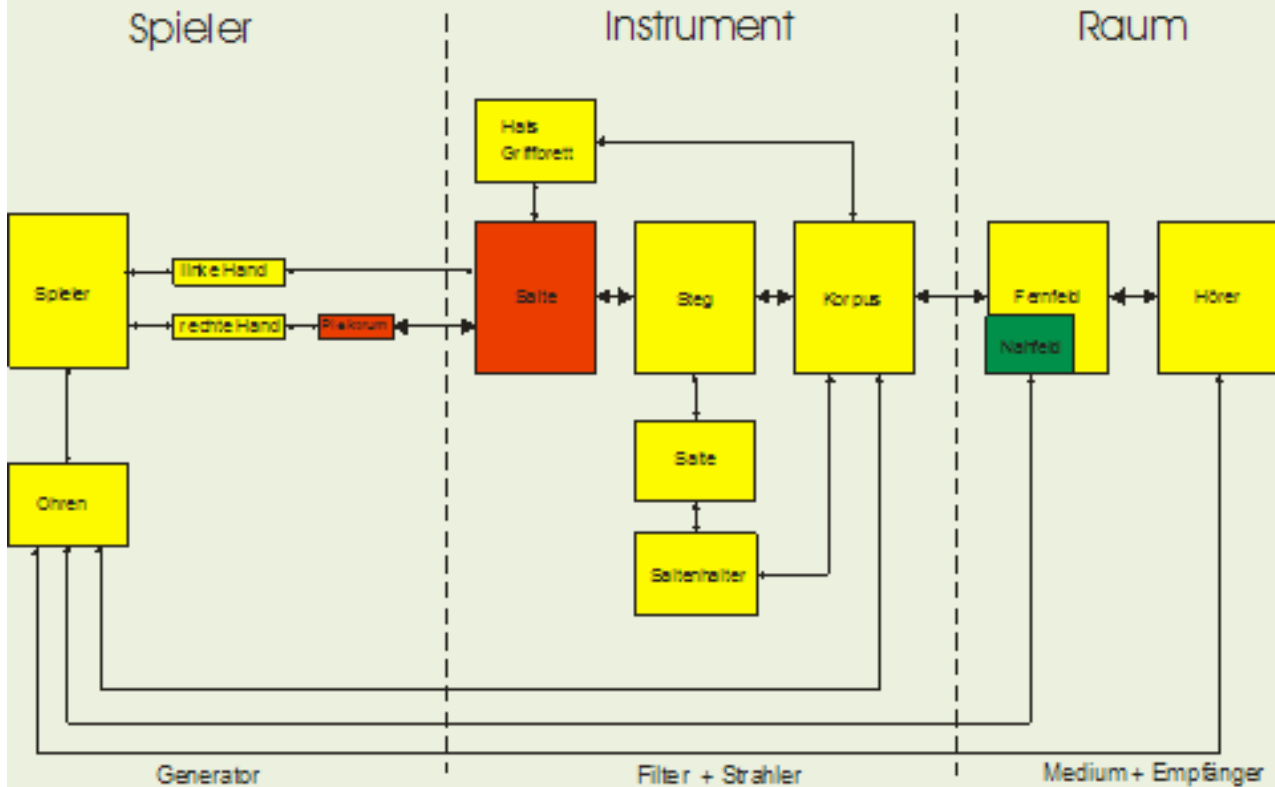
Dem Spieler steht somit eine Vielzahl von spieltechnischen Möglichkeiten zur Klanggestaltung zur Verfügung.

## Klanggestaltung durch unterschiedliche Anregung

- |                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| • Ort             | näher zum Steg<br>näher zum Schallloch                  | ⇒ heller, obertonreicher<br>⇒ dunkler, obertonärmer         |
| • Härte           | hartes Plektrum, Nagel<br>weiches Plektrum, Fingerkuppe | ⇒ hell, hart<br>⇒ dunkel, weich                             |
| • Form            | schmales Plektrum, spitzer Nagel<br>breites Plektrum    | ⇒ hell, „spitz“<br>⇒ dunkler, obertonärmer                  |
| • Geschwindigkeit | schneller Anschlag<br>Anzupfen                          | ⇒ hart, hell<br>⇒ weicher, dunkler                          |
| • Richtung        | vertikal zur Decke<br>horizontal zur Decke              | ⇒ tiefenbetont, voluminös, kurz<br>⇒ heller, leiser, länger |

Im Folgenden soll zunächst die Tonerzeugungskette in einer etwas erweiterten Form diskutiert werden.

## Tonerzeugungskette Gitarre



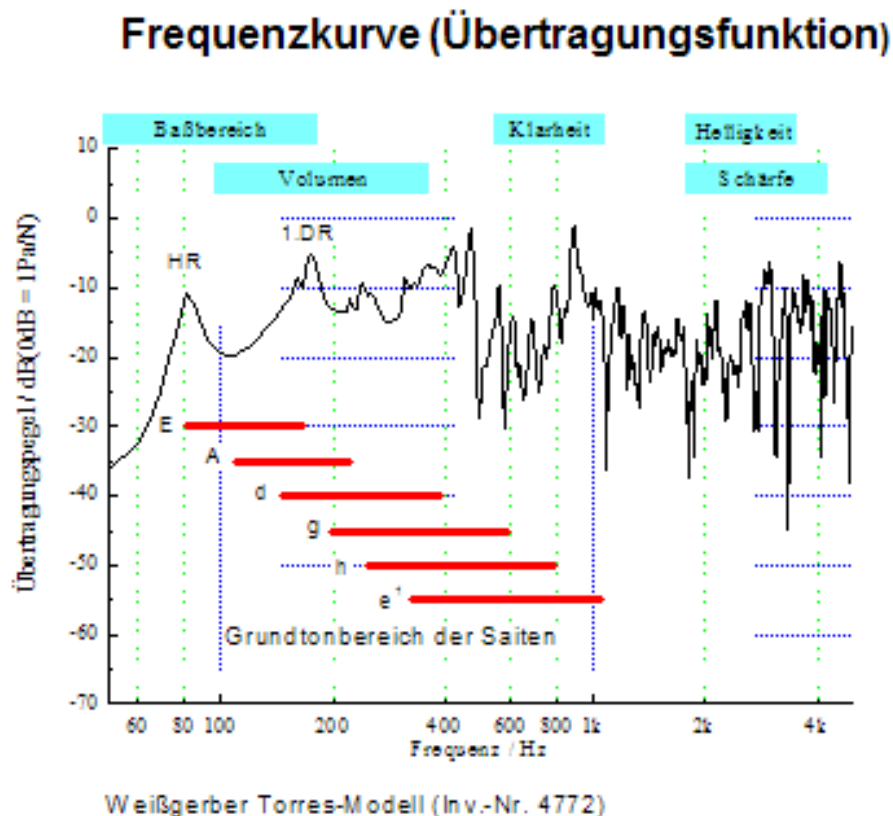
Die eigentliche Tonerzeugung erfolgt zwischen Plektrum (bzw. Finger) und der Saite. Die Saite ist ein ausgesprochen schlechter Schallstrahler, weshalb es eines zusätzlichen Resonanzkörpers bedarf. Dieser filtert die Saitenschwingungen und verstärkt sie. Die Pfeile sind in beide Richtungen ausgelegt, was die gegenseitigen Wechselbeziehungen der einzelnen „Blöcke“ unterstreicht und damit die Komplexität des Zusammenwirkens von Spieler, Saite, Instrument, Raum und Hörer verdeutlicht.

### Fragen:

- Wie schwingt das Instrument? → Resonanzen
- Wie werden die Schwingungen übertragen? → Impedanzen (Widerstand gegenüber der Weiterleitung einer Schwingung; im Allgemeinen ist eine ideale Anpassung gar nicht erwünscht, weil sich sonst keine stehenden Wellen bilden können)

## 6. Ausgewählte Messmethoden

Musikinstrumente haben in der Regel eine Vielzahl von Eigenresonanzen, die den Klang und sonstige Eigenschaften maßgeblich bestimmen. Als Darstellung der Resonanzstruktur eignet sich eine so genannte Frequenz- oder Resonanzkurve. Nachfolgend ist dies in Form einer Übertragungsfunktion dargestellt. Die Anregung erfolgt dabei durch leichtes Klopfen auf den Steg mit einem Impulshammer, das Klopfsignal wird mit einem Mikrofon erfasst und analysiert (FFT). Auf die mathematischen Zusammenhänge und messtechnischen Einzelheiten sei hier verzichtet. Die Resonanzen zeichnen sich durch Anhebungen ab.

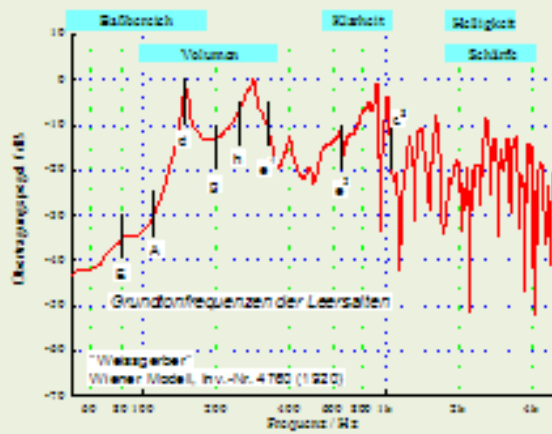


Frequenzlage, Intensität (in Dezibel), Frequenzabstände (Intervalle) zwischen den Resonanzen sowie die Balance zwischen den mittleren Pegeln ausgewählter Frequenzbänder liefern zahlreiche Informationen über die mechanischen Eigenschaften des Instrumentes – gewissermaßen einen Fingerabdruck. Die Saiten sind dabei allerdings abgedämpft, ein Einfluss des Spielers ist ausgeklammert.

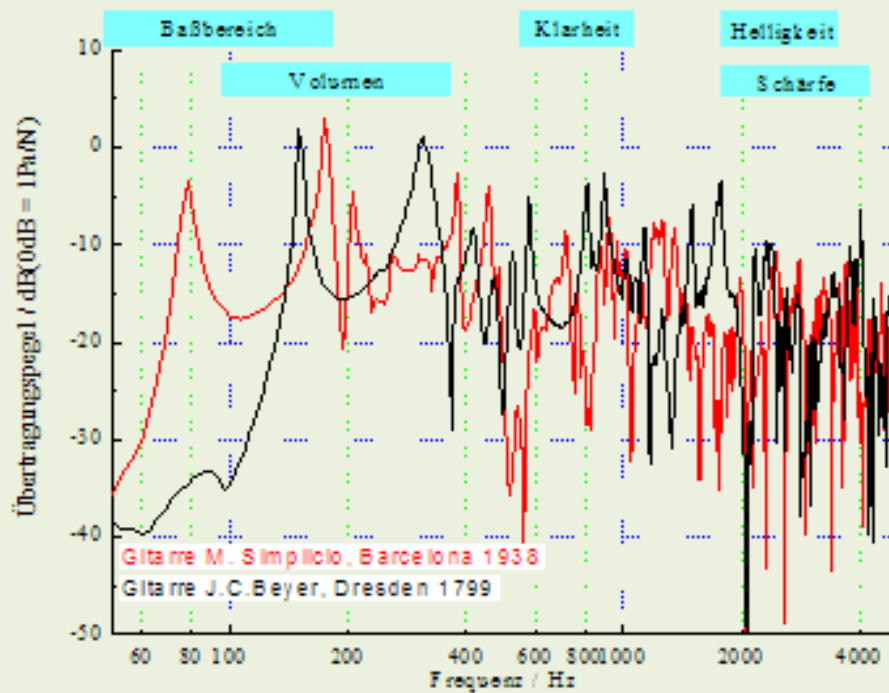
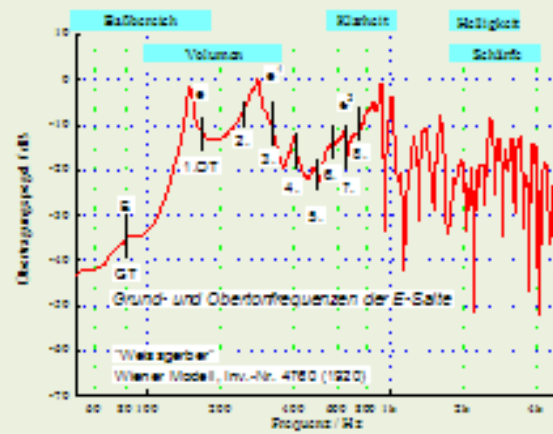
Für die Übertragung der Saitenschwingungen auf den Korpus und letztlich damit die Schallabstrahlung ist entscheidend, ob die Saitenschwingungen mit den Korpusresonanzen zusammenfallen oder nicht. Fällt der Grundton beispielsweise auf eine Resonanz, wird er gewissermaßen verstärkt abgestrahlt, ist also besonders laut, jedoch relativ kurz. Analog verhält es sich mit den Obertönen.

Anhand der Frequenzkurven lassen sich unterschiedliche Eigenschaften von Instrumenten relativ gut darstellen. Der grundsätzliche Verlauf mit typischen starken Resonanzen ist dabei durchaus ähnlich. Eine Gitarre klingt ja auch immer wie eine Gitarre! Unterschiede finden sich im Detail.

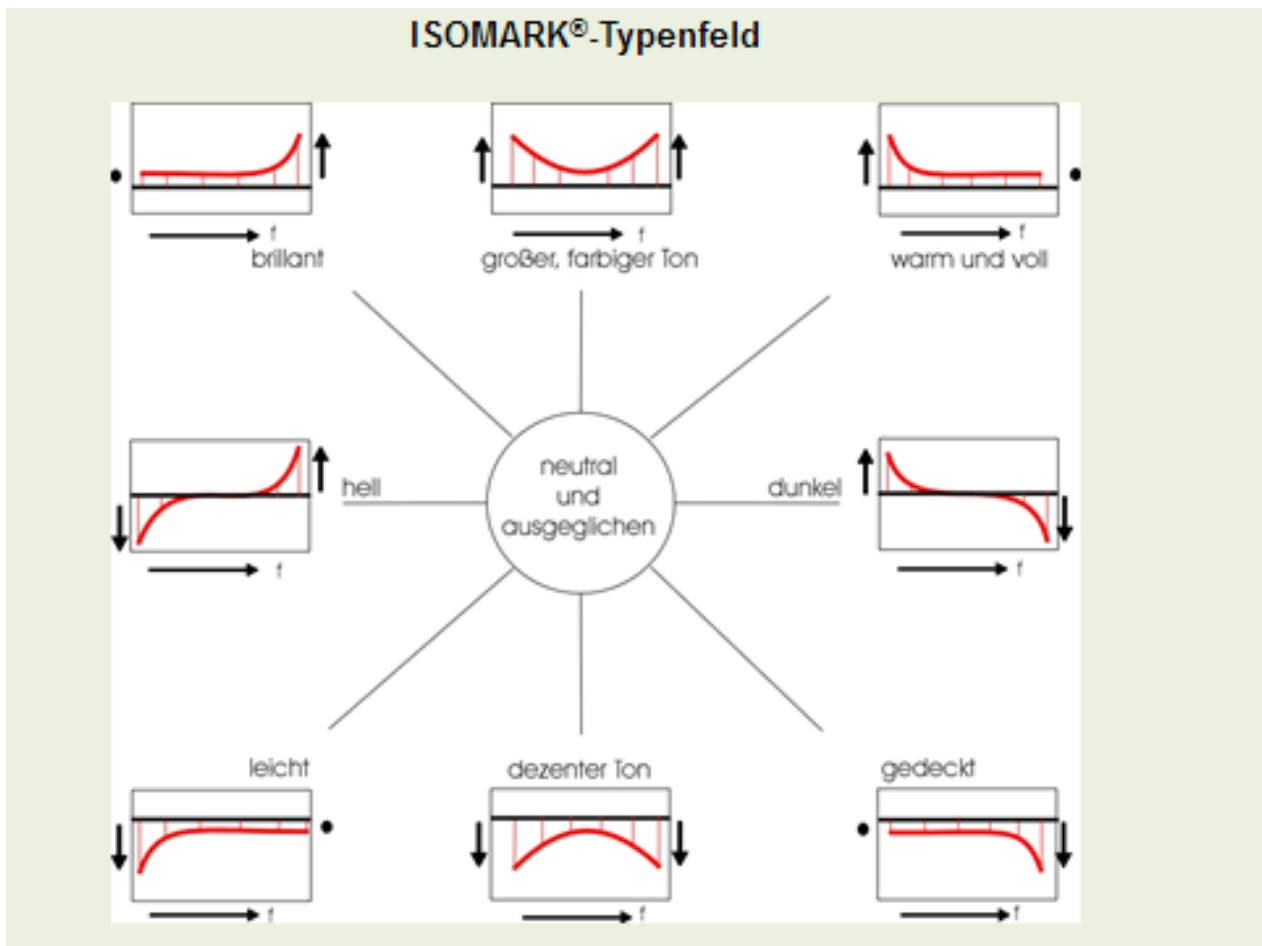
Lage der Grundfrequenzen



Teiltonfrequenzen der E-Saite



In den Frequenzkurven sind klangrelevante Bereiche markiert. Grundtendenzen lassen sich auch dem ISOMARK-Typenfeld entnehmen.



Für die Darstellung des Schwingungsverhaltens bei den einzelnen Resonanzen eignen sich verschiedene Methoden.

Eine sehr einfache Methode ist das nach E.F.F. Chladni (1756-1827) benannte Verfahren. Hierbei wird ein grobkörniges Pulver auf das Instrument gestreut, das sich bei Anregung mit einer Resonanzfrequenz mittels eines Lautsprechers an den Knotenstellen sammelt. Das vorliegende Bild zeigt die 1. Und 2. Deckenresonanz.



Moderne Verfahren, die auch eine Bewegungsanimation ermöglichen, sind u. a.:

- Modalanalyse
- Laser Scanning Vibrometer
- Holographische Interferometrie
- Akustische Kamera
- Finite Elemente Methode (FEM)

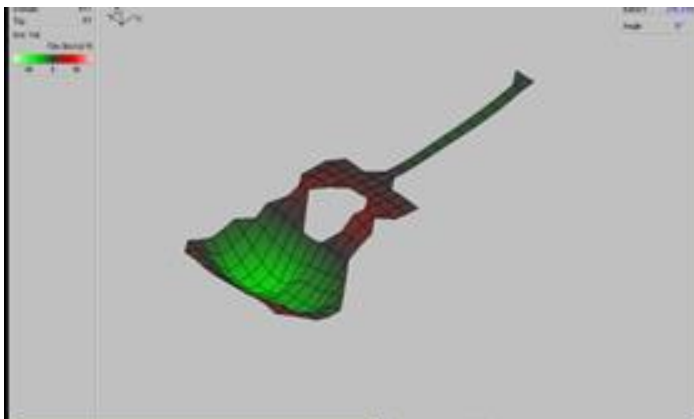
## Modalanalyse



265 Hz



438 Hz



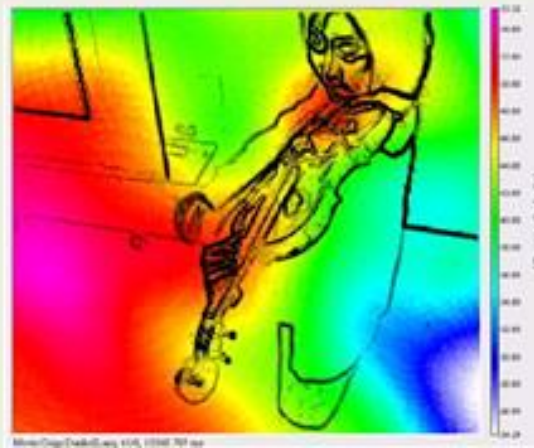
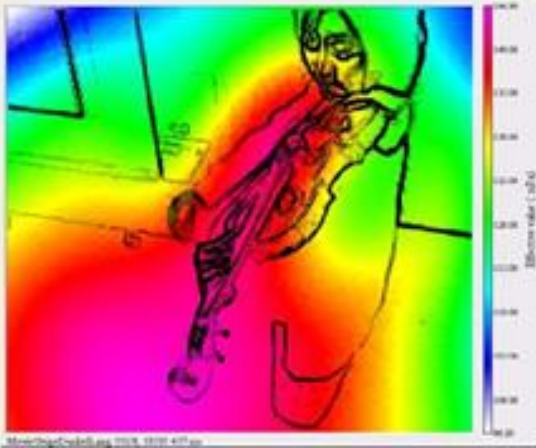
## Laser Scanning Vibrometer

1. Deckenresonanz  
216,3 Hz

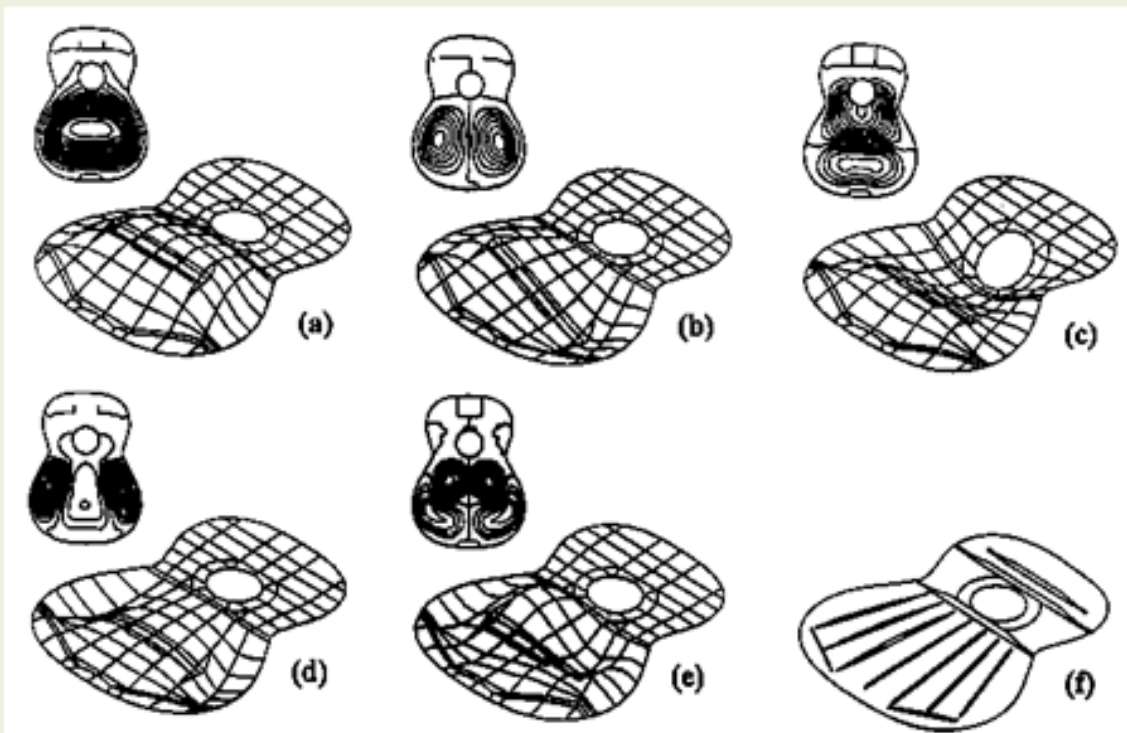




## Akustische Kamera



## Finite Elemente Methode (FEM)



## 7. Akustische Messungen vs. Hörempfindungen

- Die Messung der mechanischen Eigenschaften des Instrumentes schließt den Einfluss von Saiten, Raum und des Spielers aus. Diese bedingen gesonderte Messverfahren.
- Psychoakustische Faktoren bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

### **Einflussfaktoren auf die Klangbeurteilung von Musikinstrumenten**

#### **Nicht-akustische Begleitereignisse**

(vermittelt über die anderen sensorischen Kanäle)

- Aussehen
- Tastgefühl
- Geruch
- (Geschmack)
- Assoziation sensorischer Primäreindrücke und emotional gefärbter Erinnerungsmuster

#### **weitere Einflüsse**

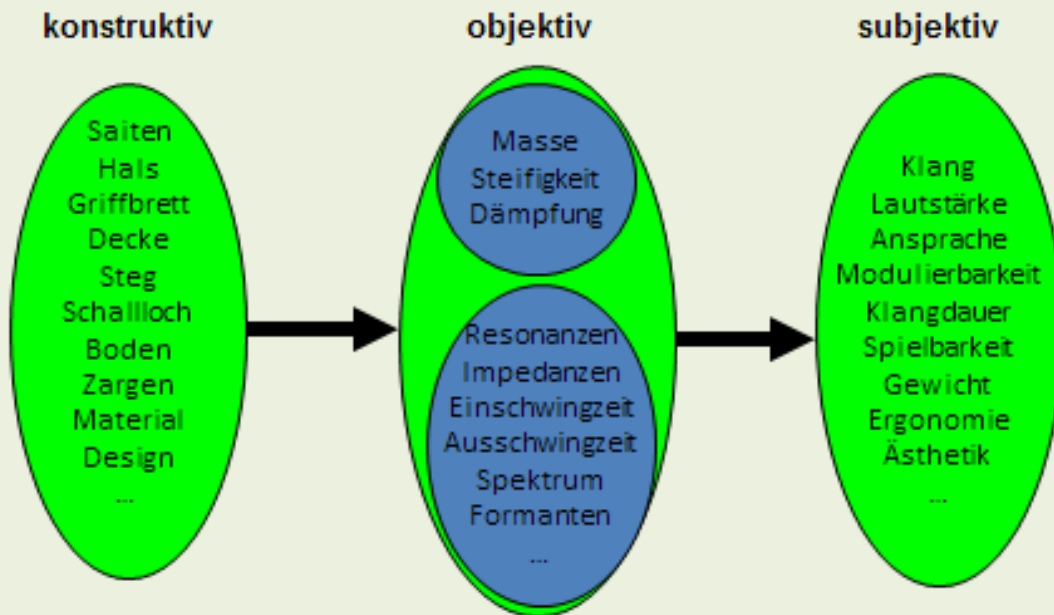
(Präferenzen, Wichtungen)

- Subjektive Einstellung, Erwartungshaltung, Wertgefühl, **Markenname**, Image, Nimbus
- Hörertypologie, individuelle Typenstruktur
- Informationsgehalt, Motivation, selektive Aufmerksamkeit
- Hörgewohnheiten, Hörkultur, Ästhetik, Mode

Das subjektiv empfundene Hörerlebnis von Spieler und Hörer ist nicht zuletzt im Ergebnis der Verarbeitung durch unser Gehirn sehr komplex und schließt viele Faktoren ein, die einer objektiven Messung nicht oder nur schwer zugänglich sind.

Zwischen den konstruktiven Elementen eines Instrumentes, deren physikalischen und daraus resultierenden akustischen Eigenschaften sowie der subjektiv gefärbten Wahrnehmung besteht deshalb ein mehr oder weniger starkes Beziehungsgeflecht.

## Beziehungsebenen



Abschließend einige Beispiele von konstruktiven Maßnahmen zur Optimierung der Klang- und weiteren Eigenschaften bei der Gitarre.

Mehr schwingende Deckenfläche lässt sich durch eine Verlegung des Schalloches erreichen. Ein schließbares Schalloch ermöglicht eine gezielte Änderung der wichtigen Hohlraumresonanz.

### Schallochvarianten



Vielgestaltige Möglichkeiten bieten moderne „High-Tech“-Materialien wie Carbon- oder Sandwichelemente.

### Neue Materialien (Carbon)



Eine große Bedeutung in Bezug auf die Problematik Musikerkrankheiten hat die Verbesserung der Ergonomie am Instrument.

### Verbesserung der Ergonomie



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit