

Aspekte des Gitarrenklangs

Skript eines Vortrags anlässlich der Gitarrenwoche Zeven am 14.05.2005
Referentin: Angela Waltner, Diplom-Designerin und Gitarrenbaumeisterin, Berlin



**Die Klingerzeugungskette vom Spieler zum Hörer
Aufbau und Funktion der Gitarre
Klang und Qualitätsparameter der Gitarre**

Für Demonstrationen und die musikalische Umrahmung stellte sich dankenswerterweise das Heinrich-Albert-Duo mit Joachim Schrader und Jan Erler aus Hannover zur Verfügung

0. Einführung

Die Gitarre in ihrer heutigen Form ist ein relativ junges Instrument und in ihrer Entwicklung noch nicht am Ende angekommen. Aus verschiedenen Gründen ist in naher Vergangenheit für unser Instrumente ein Klangideal geprägt worden, das eher abseitig der sonstigen klassischen musikalischen Klangvorstellung liegt. Die Gitarre hat sich also klanglich isoliert. Doch ist mit einer jungen, engagierten Musikergeneration ein Wandel in den klanglichen Bedürfnissen zu erkennen.

Mein Instrument war ursprünglich nicht die Gitarre, sondern die Zither. Ich war also hinsichtlich des Gitarren-„Sounds“ nicht vorgeprägt, sondern gefordert, mir im Laufe der Jahre eine eigene Klangvorstellung zu erarbeiten. Hilfe bei dieser Suche waren mir moderne und historische hochkarätige Gitarren, Gespräche, eigene Wünsche als Rezipientin von Musik und aus Lebenserfahrung gewonnene Bilder und Empfindungen.

Nur mit einer klaren Vorstellung, einem Ideal von den Möglichkeiten des Gitarrenklangs kann ich Material, Ausarbeitung und Konstruktion gerichtet aufeinander abstimmen.

Die Gitarre als Konzertinstrument

Das Ziel meiner Arbeit ist die Schaffung von konzerttauglichen Instrumenten.

Was bedeutet das?

Die Gitarre ist zuallererst ein Klangwerkzeug. Sie muss gut in der Handhabung sein, d.h. eine gute Spielbarkeit aufweisen. Sie sollte dem Musiker ermöglichen, seine musikalischen Empfindungen ohne Einschränkungen zum Ausdruck zu bringen. Und sie sollte dies in den Raum zum Hörer transportieren können.

Im besten Fall kann das Instrument den Musiker inspirieren, zum Beispiel zu besserem Verständnis für das Werk, indem es auf musikalische Strukturen aufmerksam macht (Transparenz, Sustain) und zu lebendiger Interpretation.

Klangerzeugungskette

Doch welche Rolle spielt, welchen Stellenwert hat überhaupt das Instrument innerhalb des musikalischen Vortrags?

Zur Klärung dieser Frage wird im ersten Teil eine Klangerzeugungskette dargestellt und gezeigt, wie der „musikalische Gedanke“ vom Spieler zur musikalischen Empfindung des Hörers wird.

Um es gleich vorwegzunehmen: Es zeigt sich bei vergleichenden Gitarrenanspielen, dass es nicht vorrangig die Instrumente sind, die einen Klangunterschied bewirken. Vielmehr sind es die jeweiligen Spieler durch ihre individuelle Tongestaltung.

Aufbau und Funktion

Trotzdem ist es für den Musiker natürlich nützlich, sich neben Spieltechnik und Interpretation auch mit dem Instrument auseinanderzusetzen. Ist er sich im Klaren darüber, warum die Gitarre so oder so reagiert, wird dies zur Beherrschung seines Klangwerkzeugs beitragen (bzw. er kann die Gründe für eine Nichtbeherrschung an der richtigen Stelle suchen.)

Deshalb wird im zweiten Teil der Aufbau der Gitarre beschrieben und die Funktionsweise anhand der physikalischen Hintergründe aufgezeigt.

Qualitätsparameter

Nun hängt es von den individuellen klanglichen Vorstellungen und Ansprüchen, vom Musikstil und von den körperlichen Voraussetzungen ab, welche Gitarre für sie oder ihn am besten geeignet ist.

Ich werde deshalb im dritten Teil verschiedene Qualitätsparameter aufführen, die es dem Gitarristen erleichtern können, eine Auswahl zu treffen und das richtige Instrument zu finden.

Dabei kommen auch Zusammenhänge mit der Bauweise der Gitarren zur Sprache.

Das in diesen Punkten umrissene Feld ist sehr groß. Mir geht es darum, mit meinen Ausführungen einen Überblick zu verschaffen.

1. Die Klingerzeugungskette vom Spieler zum Hörer

Welche Faktoren sind beteiligt, bis die vom Spieler mit gewissen musikalischen Vorstellungen und technischem Können erzeugten Klänge beim Hörer als Musik ankommen?

Hierzu betrachten wir Abb. 1:

1.1. Der Spieler

Der Gitarrist, ist der, der agiert. Von ihm kommt ein Impuls, der die Klingerzeugungskette auslöst. Er schlägt oder reißt die Saite an. Was passiert?

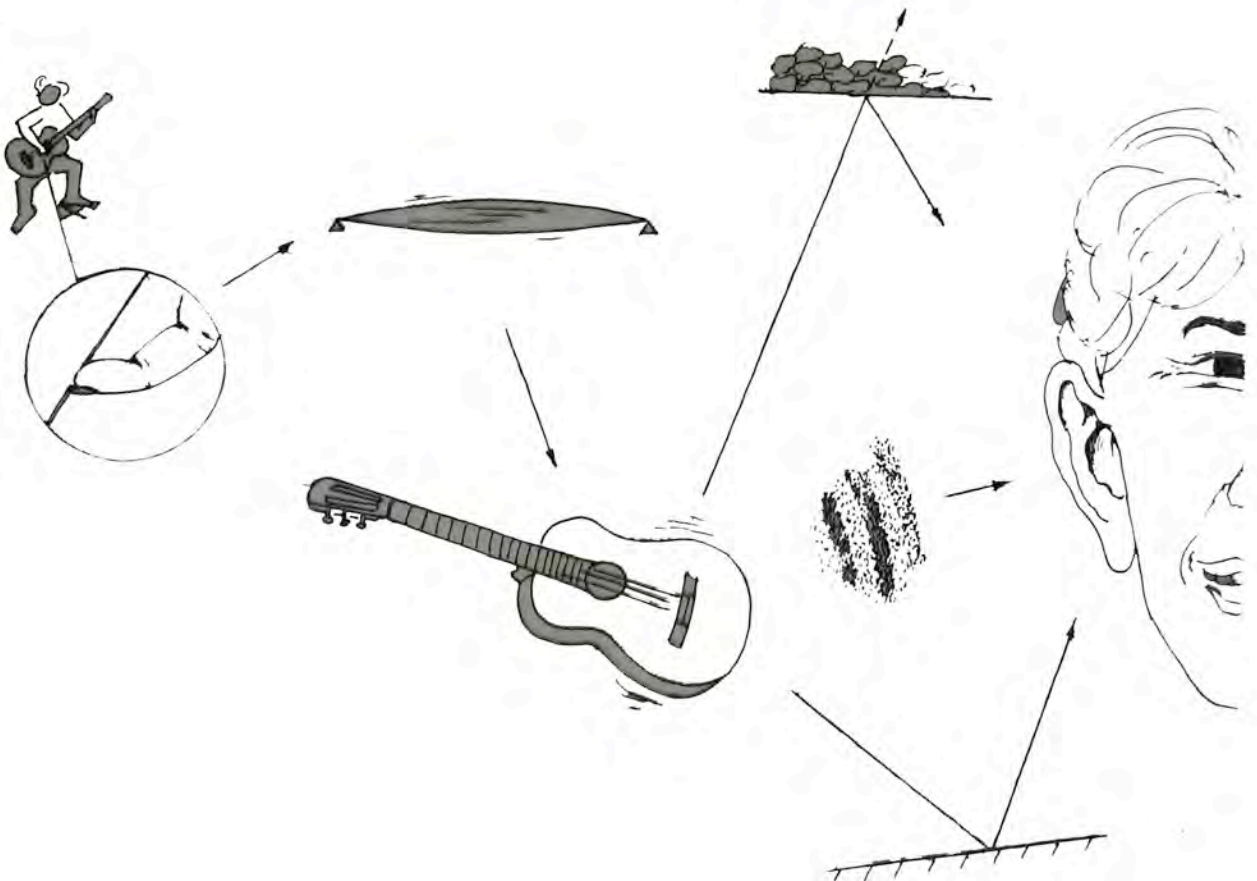


Abb.1 Die Klingerzeugungskette vom Spieler zum Hörer

1.2. Die Saite

wird ausgelenkt und zu Schwingungen angeregt. Diese sind vom Ort und von der Art des Anschlags abhängig.

Nun klingt eine Saite, wie jeder weiß, für sich genommen nur sehr dünn und leise. Sie erzeugt nur wenig Schall.

Schall:

Schallwellen sind periodische Schwankungen des Luftdrucks. Durch einen schwingenden Körper wird die Luft komprimiert, d.h. verdichtet und expandiert, d.h. verdünnt.

Die Ohrempfindlichkeit liegt dabei beim Menschen zwischen 1/ Millionstel (Hörschwelle) bis 1/1000 (Schmerzgrenze) des Normaldrucks.

Anschaulich wird das ganze, wenn man die Luft als nebeneinander liegende Teilchen sieht. Wird ein Teilchen angestoßen, gibt dieses wiederum dem benachbarten Teilchen einen Stoß usw. Der umgekehrte Fall ist, dass ein Teilchen von seinem Platz weggezogen wird, und das nächste mit sich zieht.

Bei der Saite findet eine Verdrängung der Luft und damit Luftdruckschwankungen kaum statt. Sie hat eine sehr kleine Oberfläche und die Luft umfließt die Saite mühelos.

Der Klang muss deshalb verstärkt werden.

Als mechanischer Verstärker wirkt ein Resonanzkörper, in unserem Fall der Gitarrenkorpus.

1.3. Der Korpus

Über den Steg, in geringem Grad auch über den Hals wird die Schwingungsenergie der Saite an den Korpus abgegeben. Dieser wird zu einer Vielzahl von Schwingungen unterschiedlicher Frequenz angeregt. Jetzt sind ausreichend große Flächen vorhanden, um die Luft zu verdrängen. Die Bewegung der Platten und der Gitarre insgesamt erzeugen durch Verdichtung und Verdünnung der Luft Schallwellen.

Der Korpus wirkt als Filter. Er verstärkt und unterdrückt bestimmte Schwingungen der Saite. Im zweiten Abschnitt wird dieser Sachverhalt noch genauer beleuchtet.

1.4. Der Raum

Wir nehmen nun einen geschlossenen Raum an. Die Schallwellen pflanzen sich fort.

Ein bestimmter Anteil trifft auf direktem Weg an das Ohr. Dies ist der Direktschall. (In Abb.1 ist dieser als oben beschriebenes Teilchenmodell dargestellt.)

Durch den Direktschall erkennen wir, aus welcher Richtung der Schall kommt.

Andere Schallwellen treffen auf Boden, Decke und Wände sowie auf im Raum befindliche Gegenstände. Hier werden sie entweder reflektiert oder absorbiert (=geschluckt). Durch den Anteil des absorbierten Schalls geht vom Raum eine bestimmte **Klangfärbung** aus.

Die Charakteristik hängt vom Material und der Art der Oberfläche ab.

Die reflektierten Schallwellen erreichen früher oder später auf Umwegen den Hörer. Dabei tritt eine zeitliche Verzögerung ein und es entsteht ein charakteristischer **Hall**. Dieser hängt von der Raumgröße ab.

Ab einer Entfernung von ca. 34m hören wir ein Echo.

Der Höreindruck ändert sich je nach Entfernung von der Schallquelle.

Der Spieler, der sich unmittelbar am Instrument (im **Nahfeld**) befindet, gewinnt einen anderen Eindruck als ein entfernter Hörer (im **Fernfeld**). Wegen der Reflexionen verwischt der Klang zunehmend.

Es gibt Räume, die durch ihre Halligkeit die Eigenschaften des Instruments dominieren. Für einen Gitarristen wird dies anfänglich angenehm sein. Bei zu halligen Räumen leidet aber die Trennschärfe.

Um Gitarren zu beurteilen und zu vergleichen, eignet sich ein eher trockener Raum, der möglichst gleichmäßig über allen Frequenzen Schall absorbiert.

1.5. Der Hörer

Endlich gelangt an unser Ohr eine Kombination aus Direktschall und Reflexionen unterschiedlichen Grades.

Das Trommelfell, bewegt sich entsprechend den Luftdruckschwankungen hin und her.

In einem ausgefeilten Mechanismus geschieht im Mittel- und Innenohr die Verarbeitung der Schallwellen zu Nervenreizen (elektrische Nervenimpulse).

Die Reize gelangen über die Gehörnerven ins Gehirn und rufen dort **Empfindungen** hervor.

Die Wirkung von Klängen auf die Menschen wird im Feld der Psychoakustik behandelt. Ausgangspunkt für diesen Wissenschaftszweig bildete die Erforschung der Musikinstrumente. Unter dem Stichwort Sounddesign spielt die Psychoakustik seit geraumer Zeit in der Produktforschung eine wichtige Rolle.

2. Aufbau und Funktion der Gitarre

Während der vorhergehende Abschnitt zur eigenen Einordnung beiträgt, gelange ich jetzt zu meinem eigentlichen Fachgebiet. Nach und nach wird, ausgehend von der Saite, der Aufbau und die Funktionsweise der Gitarre beschrieben.

2.1. Die Saite

Schlägt man eine gespannte Saite an, so gerät sie in Schwingung. Diese eine sichtbare Bewegung resultiert aber in Wirklichkeit aus einer Summierung, einer Überlagerung einer Vielzahl von gleichzeitig angeregten, unabhängigen Teiltönen.

Die sich Teiltöne sind harmonisch. Harmonisch heißt, dass die Frequenzen der einzelnen Teiltöne jeweils ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz des Grundtons beträgt.

Die Frequenz des Grundtons ergibt die Stimmhöhe. Die Stimmhöhe hängt ab von der Saitenlänge, der Masse und der Spannung.

In Abb.2 sind die Schwingungen von Grundton und den ersten Obertönen (=Moden) zu sehen.

1. Grundton	Stimmung:	A	$f = 110 \text{ Hz}$
2. Oktave	Teilungsverhältnis:	1:2	$f = 220 \text{ Hz}$
3. Quinte über der Oktave		2:3	$f = 330 \text{ Hz}$
4. Quarte über der Quinte		3:4	$f = 440 \text{ Hz}$

Und so weiter.

Es bilden sich Knotenpunkte aus, die sich bei der jeweiligen Schwingung nicht bewegen und Schwingungsbäuche.

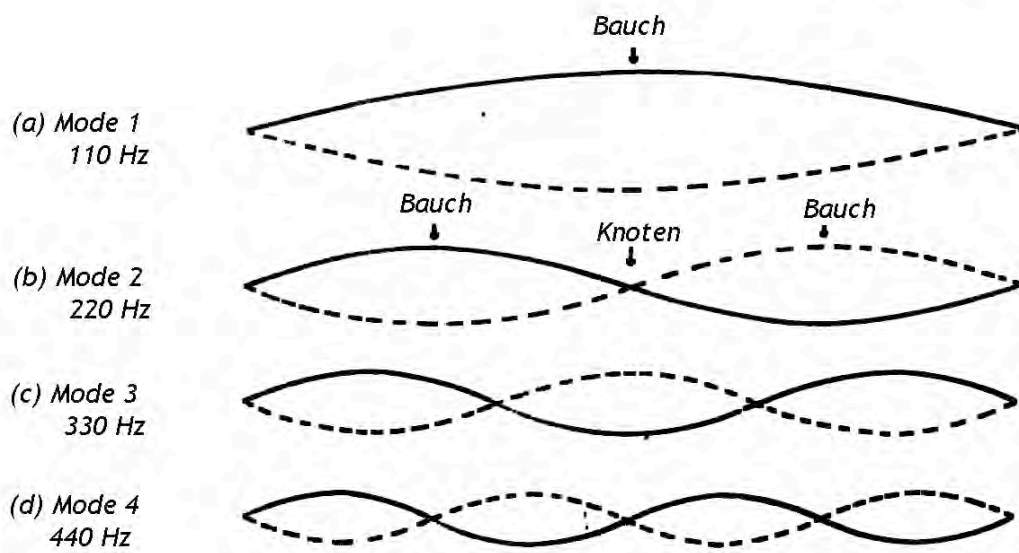


Abb.2 Schwingungsverhalten der Saite

Die Obertöne kann man auf der Gitarre anregen, dies sind die Flageolettöne: Durch Auflegen des Fingers auf die Saite entsprechend eines oben beschriebenen Zahlenverhältnisses wird ein künstlicher Knotenpunkt erzeugt.

Nun ist die Darstellung der harmonischen Schwingungen idealisiert.

In Wirklichkeit schwingt die Saite nicht völlig harmonisch. Schuld ist vor allem die Biegesteifigkeit der Saite. Die Obertöne werden zunehmend gespreizt. Das Verhältnis ist etwas größer als 1:2:3 usw.

Folge davon ist, dass die Töne weniger klar klingen. Außerdem können wegen der fehlenden Flexibilität hochfrequente Teiltöne nicht ausgeprägt werden.

Saitenmaterial

Um diese Effekte möglichst klein zu halten, sind Saiten mit geringer Eigensteifigkeit wünschenswert.

Carbon-Saiten oder exakter PVDF = Polyvinylidifluorid-Saiten erfüllen diese Bedingung besser als Nylon. Sie haben eine größere Materialdichte und sind deshalb bei gleicher Masse dünner und flexibler. Klarheit und Obertonreichtum werden befördert, und damit der gestalterische Spielraum.

Natürlich ist die Wahl des Saitenmaterials vor allem eine Geschmacksfrage und auch eine Frage der Spieltechnik.

Einflussmöglichkeiten des Spielers auf das Obertonspektrum der Saite

Welches Spektrum an Obertönen angeregt wird, kann der Spieler beeinflussen.

Es sind dies vor allem

- die Wahl des Anschlagsorts,
- die Nagelform
- und die Art und Weise, die Saite los zu lassen.

Eine gute Darstellung dieser Zusammenhänge findet man in dem Buch „Soundproduction on the classical guitar“ von John Taylor.

Ich gehe nur kurz auf den Einfluss des Anschlagsorts ein:

Regt man die Saite in der Mitte an, so entsteht ein warmer weicher Ton. Der Grundton ist stark ausgeprägt. Ebenfalls angeregt werden Obertöne, die an der Anschlagstelle einen Schwingungsbauch haben. Diejenigen, welche dort einen Knoten aufweisen, sind dagegen nicht angeregt. Das ist beim Anschlag in der Saitenmitte jeder zweite Oberton.

Schlägt man die Saite dagegen in Stegnähe an, so ist der Grundton nicht sehr ausgeprägt. Dafür nimmt die Zahl der angeregten Obertöne zu und auch deren Stärke.

Der Ton ist hell und scharf.

Dämpfungsmechanismen

Bei der Saitenschwingung wirken verschiedene Dämpfungsmechanismen. Dazu gehören die Materialdämpfung, die Luftreibung und die Energieübertragung auf den Korpus. Die Energieübertragung auf den Korpus ist durchaus erwünscht. Sie ermöglicht überhaupt erst eine Schallabstrahlung.

2.2. Kopf, Steg

Die Saite muss gespannt sein, um zu schwingen. Die Fixierung erfolgt an Kopf und Steg, genauer an den Mechanikenwellen und am Knüpfblock. Die Auflagepunkte Obersattel und Steg einlage definieren dabei die schwingende Saitenlänge.

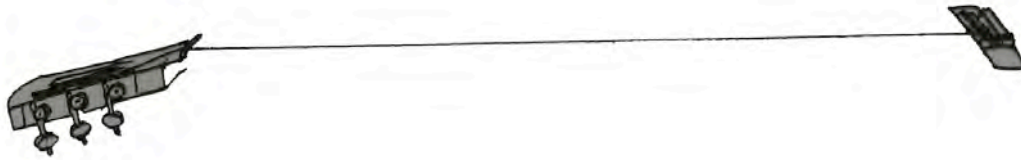


Abb.3 Fixierung der Saite an Kopf und Steg

Spielwiderstand

Häufig wird von Gitarristen ein gewisser Spielwiderstand der Saiten insbesondere für die rechte Hand gewünscht. Diese hängt ab von der Starrheit der Einspannung.

Durch die Zugkraft der Saite verbiegt sich die Gitarre leicht. Man registriert dies, wenn der Hals sich nach vorne wölbt oder auch wenn sich die Decke vor dem Steg deformiert.

Vergleichend beschreiben lässt sich dieser Aspekt in etwa mit einem Schießbogen. Die Sehne ist an die Enden der Wurfarme gespannt. Je steifer die Wurfarme sind, desto mehr Kraft wird benötigt, um die Sehne zu spannen..

Auf die Gitarre übertragen heißt dies, man erhält einen bestimmten Spielwiderstand, wenn die Konstruktion von Hals und Korpus zwischen den Saitenfixierungspunkten steif genug ist.

Ein weiterer Einflussfaktor ist das Gleitverhalten der Saite an ihren Auflagepunkten. Insbesondere am Obersattel und zwar durch den Kopfwinkel bestehen hier Gestaltungsmöglichkeiten.

Der Spielwiderstand ist weiterhin abhängig von der Elastizität der Saite. Insgesamt kann durch eine geeignete Konstruktion auch bei leichter Besaitung ein ausreichender Spielwiderstand erzielt werden.

Energieübertagung

Der Steg spielt natürlich auch eine zentrale Rolle bei der Energieübertragung.

2.3. Hals

Die Gitarre ist bekanntlich ein Halsinstrument.

Dadurch, dass man die Saiten durch Abgreifen verkürzt, um die Tonhöhe zu verändern, benötigt man nur eine geringe Anzahl von Saiten, um einen brauchbaren Tonumfang zu erhalten. In unserem Fall sind dies sechs.

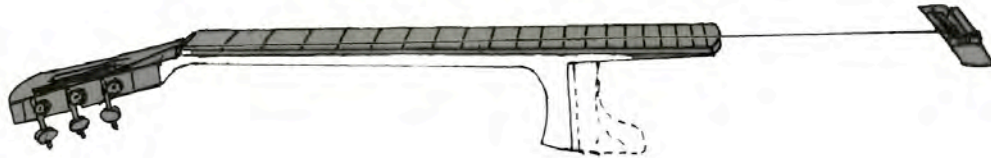


Abb.4 Hals mit bundiertem Griffbrett

Die gegriffenen Tonhöhen sind durch die Bünde sehr definiert. Sie können nur durch die Art des Greifens ein wenig variiert werden.

Gleichschwebend temperierten Tonskala

Die Festlegung der Bünde erfolgt auf der Grundlage der gleichschwebend temperierten Tonskala. Diese teilt die Oktave in zwölf gleiche Teile, die Halbtöne. Es gibt bei dieser Skala keine reinen Intervalle. Alle sind gleichmäßig ein bisschen unrein. Sie ist deshalb immer ein Kompromiss.

Wie berechnen sich die Bundabstände?

Das Verhältnis der Frequenzen zwischen Grundton und Oktave beträgt 1:2. Die Frequenz unserer leeren A-Saite ist 110 Hz, die Oktave 220 Hz. Es muss nun einen Faktor geben, der zwölf mal mit sich selbst multipliziert 2 ergibt. 12mal wegen der 12 Halbtöne. Der Faktor ist etwa 1,059 und genau diese Zahl dient als Grundlage für die Bundeinteilung bezogen auf eine bestimmte Mensurlänge.

Ist die Bundeinteilung korrekt, spricht man von **Bundreinheit**. Dies ist nicht zu verwechseln mit den Begriffen Oktavreinheit und Stimmungsreinheit (s. Abschnitt 3: Intonation).

Es treten nämlich bei gegriffenen Saiten trotz Bundreinheit zusätzliche Verstimmungen auf. Auf die Gründe gehe ich im dritten Abschnitt unter dem Stichwort Intonation noch ein.

Der Hals stellt, zieht man den Vergleich mit dem Schießbogen nochmals heran, einen Wurfarm dar und hat damit Einfluss auf den Spielwiderstand.

Außerdem besitzt er Eigenschwingungen und trägt so zum Gesamtschwingverhalten der Gitarre bei.

2.4. Decke

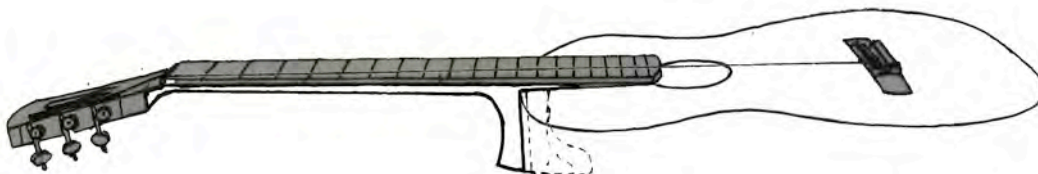


Abb. 5 Decke als schwingende Platte

Über den Steg werden die Saitenschwingungen unmittelbar auf die Decke übertragen und der Schall nach vorne abgestrahlt.

Natürlich spielen alle Teile der Gitarre für den Klang eine Rolle. Die Decke ist jedoch zweifellos der wichtigste Teil der Gitarre und der Gitarrenbauer widmet ihr gewöhnlich die größte Aufmerksamkeit.

Bei der Konstruktion der Decke sind immer zwei Aspekte zu beachten und zur Balance zu bringen.

Das ist einmal der **Klang**. Die Decke muss leicht und flexibel sein, um auf die Anregung durch die Saiten reagieren zu können. Um eine gute Abstrahlung zu erzielen, ist aber auch eine hohe Steifigkeit anzustreben.

Der zweite Aspekt ist die **Statik**. Durch die Saiten wirken recht starke Zug- und Druckkräfte auf die Decke. Heutige Besaitungen erreichen bis über 40 kp (entspricht kg) Eine ausreichende Stabilität muss gewährleistet sein, um die Verformung unter Dauerbelastung zu begrenzen.

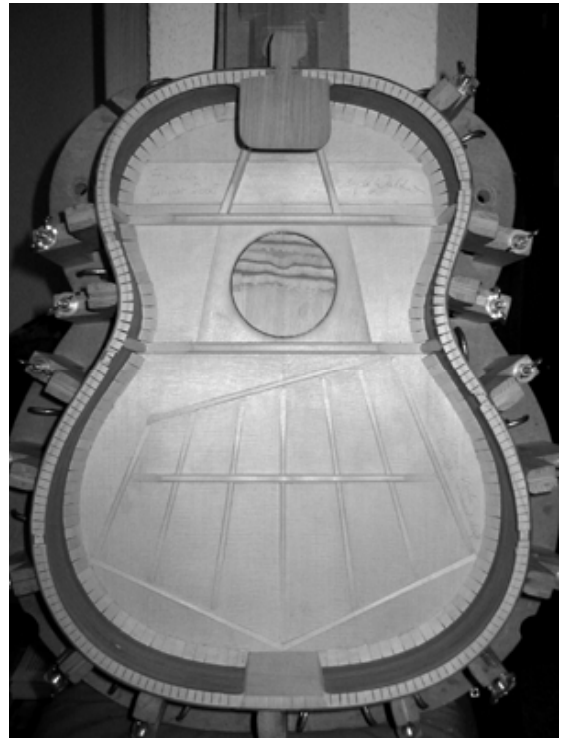


Abb.6 Asymmetrische Fächerbeleistung
(Gitarre von Angela Waltner)

Seit **Antonio de Torres** die moderne spanische Gitarre entwickelt hat, existiert ein ausgefeiltes Konstruktionskonzept. Torres hat den Deckenumriss und damit die schwingende Fläche und das Korpusvolumen vergrößert.

Dies wurde erst möglich durch ein spezielles Beleistungssystem, die Fächerbeleistung. Die Decke kann hier dünn und flexibel gehalten werden und trotzdem ausreichend Stabilität gewährleisten. Eine Deckenwölbung erhöht noch die Steifigkeit. Torres verwendete ausschließlich symmetrische Beleistungen. Nachfolger führten auch asymmetrische Beleistungsformen ein.

Die symmetrische Form funktioniert zweifellos. Weshalb ich jedoch eine asymmetrische Anordnung der Leisten bevorzuge (Abb.6), werde ich zu einem späteren Zeitpunkt noch darlegen.

Eine zentrale Rolle spielt die **Holzauswahl**.

Die üblicherweise verwendeten Deckenhölzer Fichte und Zeder besitzen ein recht optimales Verhältnis von Steifigkeit und Materialdichte, im Endeffekt von Steifigkeit und Masse. Sehr wichtig ist der richtige Einschnitt. Abgeschnittene Fasern und schräg stehende Jahresringe verringern die Steifigkeit beträchtlich. Die innere Dämpfung soll möglichst klein sein.

Abb 7: Radial herausgeschnittene Platte mit senkrecht stehenden Jahren.

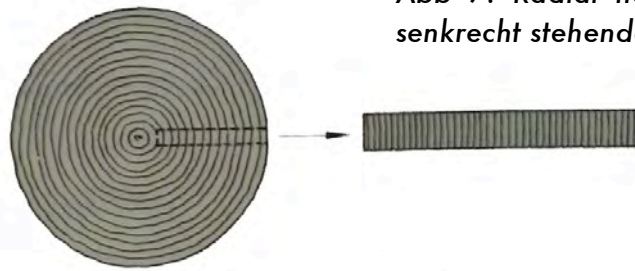


Abb. 8:
Schnitt entlang der Faser-
richtung
(„im Spalt“)

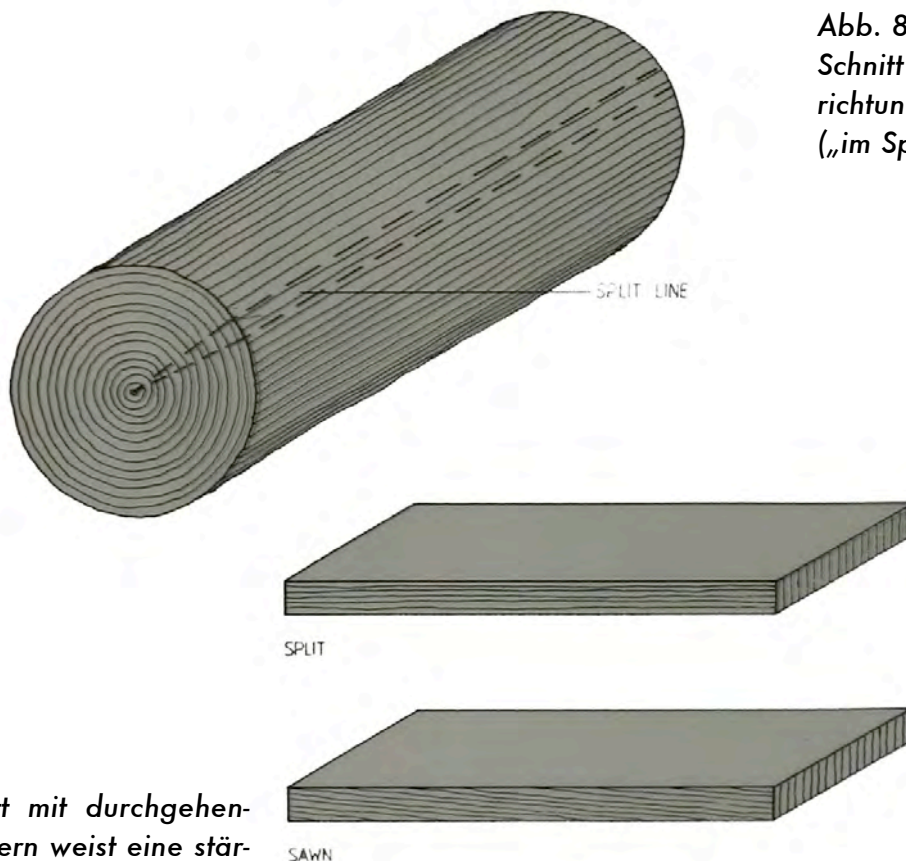


Abb. 9:
Ein Brett mit durchgehen-
den Fasern weist eine stär-
kere Längssteifigkeit auf
als eines mit durchge-
schnittenen Fasern

2.5. Zargen

Damit die Decke der Zugkraft der Saiten standhalten kann, muss sie fixiert sein. Dies gewährleisten die Zargen und auch der Boden.

Die Zargen bilden die **Randeinspannung** der Decke (Abb. 10). Diese ist von großer Bedeutung. Sie kann mehr oder weniger steif sein, was abhängig vom Baukonzept ist. Im Allgemeinen gilt eine starre Aufhängung als vorteilhaft. Die Schwingungen werden an der Zarge reflektiert.

Dadurch bleibt die Energie auf die Decke konzentriert und wird nach vorn zum Publikum abgestrahlt.

Reifchen oder einzelne Klötzchen beeinflussen die Starrheit des Decken- und des Bodenrandes. Auch die Dicke der Zargen spielt eine Rolle.

Die Zargenhöhe bestimmt die Größe des im Korpus eingeschlossenen Luftvolumens.

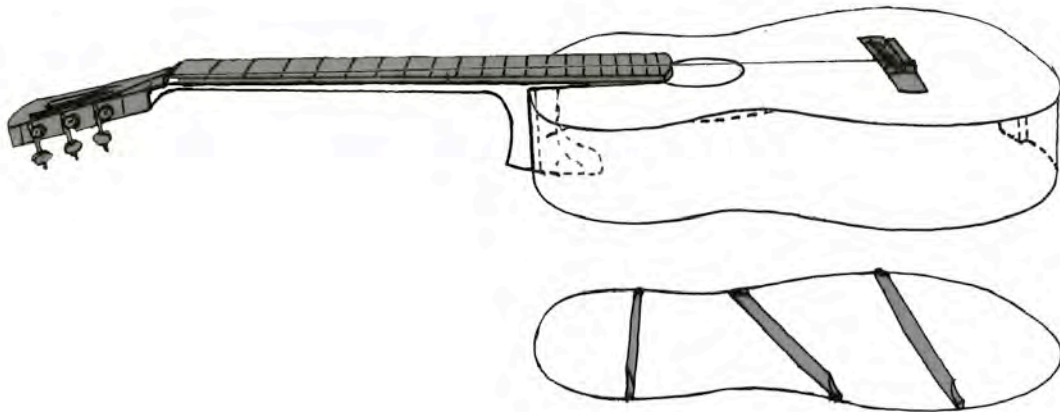


Abb.10: Durch Zargen und Boden entsteht ein stabiler Hohlkörper mit bestimmtem eingeschlossenen Luftvolumen.

2.6. Boden

Der Boden schließt den Resonanzkörper, den Korpus.

Er besitzt drei Funktionen:

1. wird ein akustischer Kurzschluss vermieden. D.h. es wird der Druckausgleich der Luft zwischen Deckenvorderseite und -rückseite verhindert.
2. entsteht im Korpus ein bestimmtes Volumen an eingeschlossener Luft. Die Luft wird ebenfalls zu Schwingungen angeregt.
3. erhöht sich die Stabilität.

Der Boden schwingt mit. Auch reflektiert er Schallwellen im Korpusinneren nach vorn. Ein gewölbter Boden verstärkt diesen Effekt.

2.7. Akustik

Die Gitarre als komplexes gekoppeltes Schwingungssystem

Die Gesetzmäßigkeiten der Schwingungen der Gitarre sind weitgehend dieselben wie bei der Saite beschrieben. Hier setzen sich die Schwingungen zusammen aus einer Vielzahl von Plattenschwingungen und sonstigen Eigenschwingungen aller einzelnen Teile der Gitarre, der Gitarre im Ganzen und aus Schwingungen der im Korpus eingeschlossenen Luft. Diese werden gleichzeitig angeregt und beeinflussen sich gegenseitig, d.h. sie sind miteinander gekoppelt.

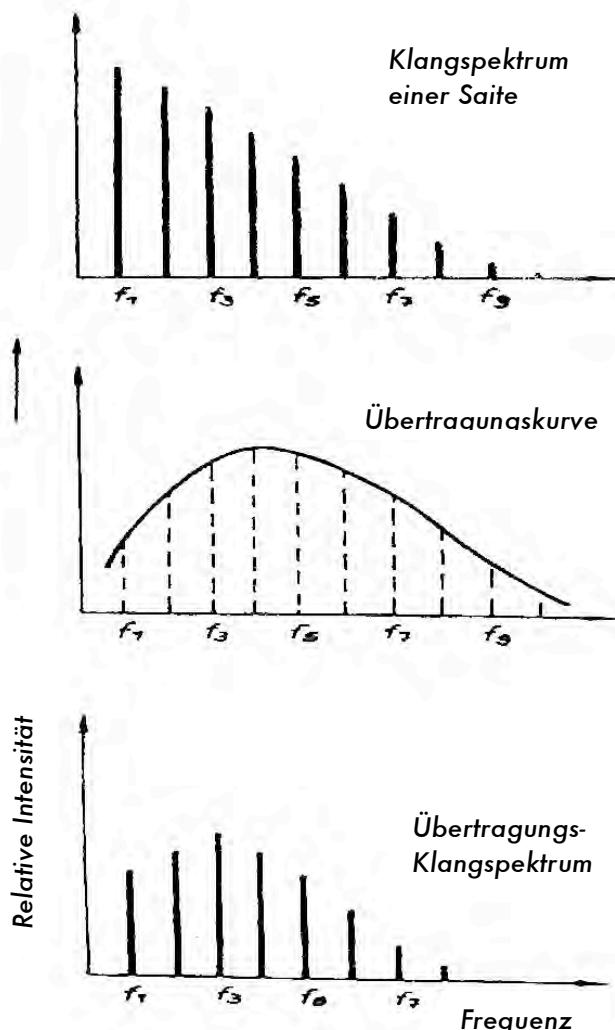
Im Unterschied zu den Saiten besitzen Platten (hier z.B. Decke und Boden) aufgrund spezifischer Eigensteifigkeit des Materials inharmonische Schwingungen.

Weitere Einflussfaktoren für die Ausprägung der Schwingungsformen sind die Inhomogenität des Holzes, die Umrissform und die Konstruktion.

Freie Schwingungen - erzwungene Schwingungen

Bei Korpuschwingungen tritt im Vergleich zur Saitenschwingung folgender Unterschied zutage: Die Saite erfährt mit dem Anschlag eine einmalige Energiezufuhr und schwingt dann frei in ihren jeweiligen Eigenfrequenzen. Dementsprechend spricht man von freien Schwingungen.

Durch die periodische Schwingung der Saite mit bestimmten Eigenfrequenzen beginnt die Gitarre nach einer bestimmten Anlaufzeit mitzuschwingen. Es entstehen erzwungene Schwingungen.



Resonanz

Stimmt eine Frequenz der Saitenschwingung weitgehend mit einer Eigenfrequenz der Gitarre überein, ist die Schwingungserregung besonders groß. Saiten und Gitarre befinden sich in Resonanz.

Filterfunktion des Klangkörpers

Bestimmte Frequenzen der Saiten werden auf diese Weise verstärkt, andere abgeschwächt. Der Klangkörper wirkt also als Filter.

In Abb. 11 wird deutlich, wie die Eigenschwingungen der Saiten und des Korpus sich zu einem resultierenden Frequenzbild addieren

Die Eigenfrequenzen der Gitarre nennt man auch Resonanzfrequenzen oder Eigenresonanzen. Gute Gitarren zeichnen sich durch einen Reichtum an Resonanzen aus.

Abb.11: Prinzip der Übertragung von Saitenschwingungen auf den Korpus

Frequenzspektrum

Eine Möglichkeit, die Eigenresonanzen der Gitarre sichtbar zu machen, ist das in Abb. 11 schon vorausgesetzte Frequenzspektrum, auch Resonanzkurve genannt.

Klopft man die Gitarre mit einem Klöppel oder Impulshammer am Steg an und nimmt den abgestrahlten Schallimpuls über ein Messmikrofon auf, so erhält man alle relevanten Informationen über die Resonanzeigenschaften.

Die waagrechte Achse zeigt die Frequenz an, die senkrechte Achse den Pegelwert, also die Stärke der Resonanzen.

Was sagt die Kurve aus?

Wir sehen hier eine untere markante Resonanzspitze (= Peak) bei ca. 100Hz. Das liegt zwischen G und Gis. Es ist die Hohlraumresonanz.

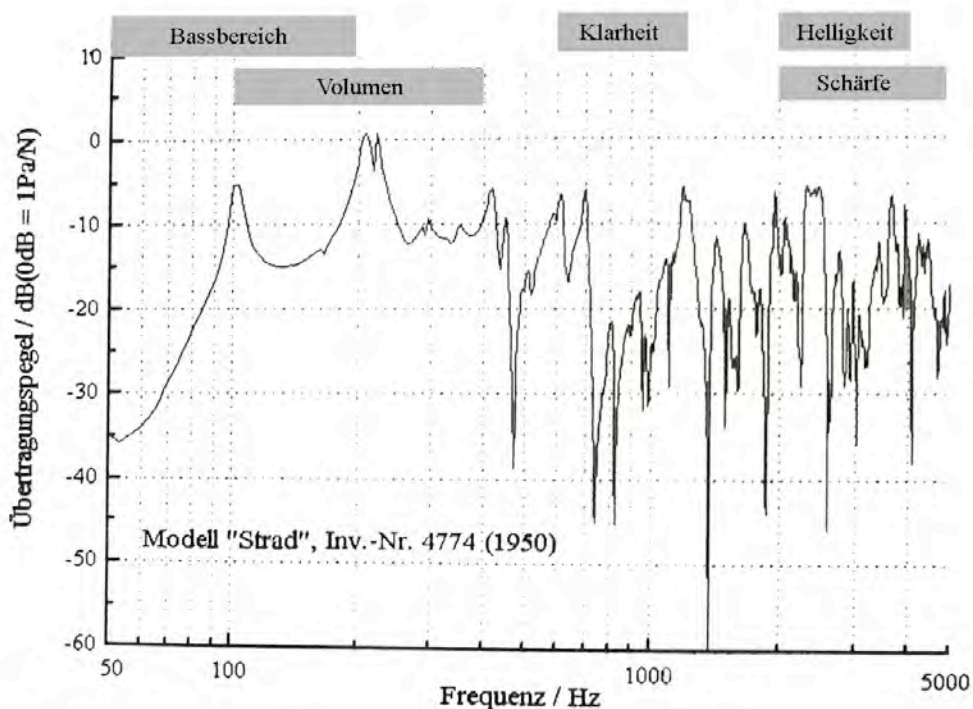


Abb. 12 Frequenzspektrum einer „Weißgerber“-Gitarre

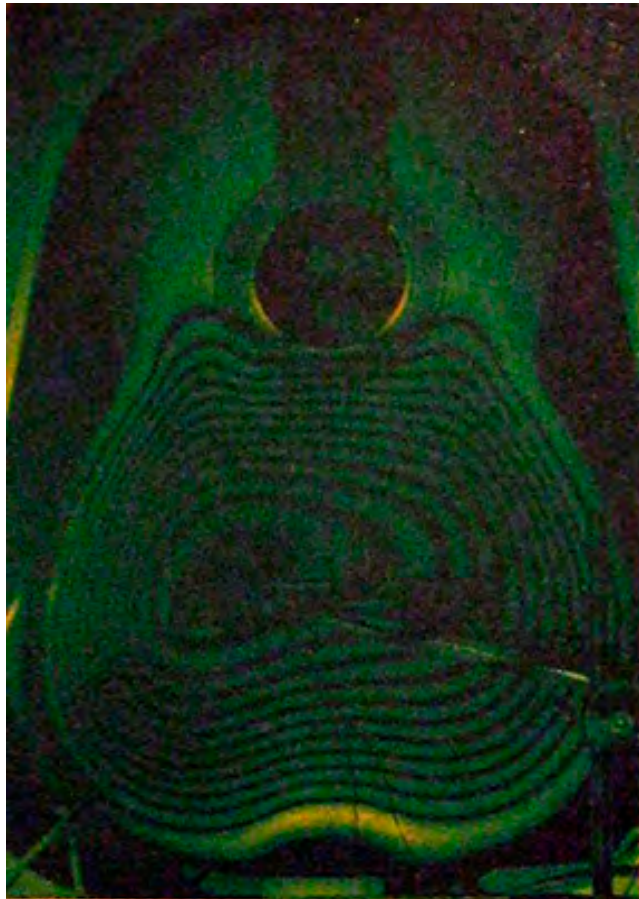
Bei dieser Resonanz findet so etwas wie ein Atmen des Korpus statt. Die im Hohlraum eingeschlossenen Luft strömt durch das Schallloch periodisch ein und aus.

Die nächste Spitze liegt bei ca. 200Hz. Dieser Peak zeigt die erste Deckenresonanz an.

Die Spitze neben der ersten Deckenresonanz wird die erste Bodenresonanz anzeigen. Es schließen sich weitere Decken-, Boden- und Korpusresonanzen an.

Das Frequenzspektrum ist in etwa vergleichbar mit einem genetischen Fingerabdruck. Sie ist bei jeder Gitarre unterschiedlich ausgeprägt und mit etwas Erfahrung kann man anhand der Kurve Aussagen zu Lautstärke und Klang treffen. Wir werden auf diese Kurve im dritten Abschnitt nochmals zurückkommen.

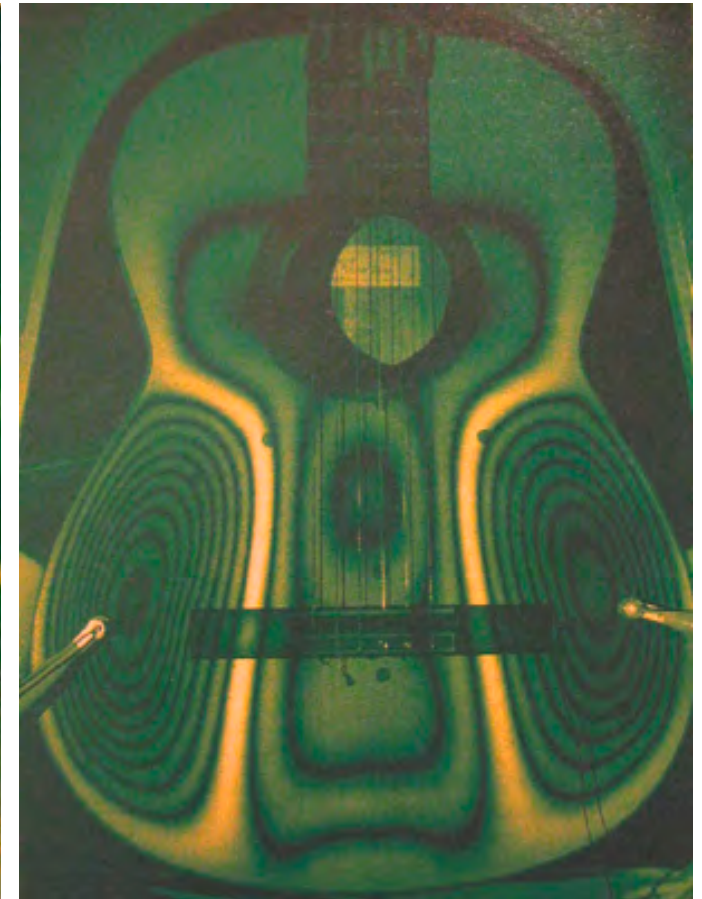
Optisch sehr schön sichtbar werden die Resonanzen bei holographischen Aufnahmen. Abb. 13 zeigt die Schwingungsformen (= Moden) der 1., 2. und 4. Deckenresonanzen. Bei der 3. Resonanz treten Knotenlinien in Querrichtung zur Achse in Erscheinung. Es entstehen zunehmend mehr schwingende Felder und Knotenlinien.



1.Mode
103Hz



2. Mode
268Hz



4.Mode
553Hz

Abb. 13: Holographische Darstellung von Schwingungsmoden einer Gitarrendecke (B.E. Richardson/G.W. Roberts 1985)

3. Klang und Qualitätsparameter

In diesem Abschnitt wird der Klang der Gitarre und eine Bestimmung von Bewertungskriterien für die Gitarre behandelt.

Erinnern wir uns an die Klangerzeugungskette: Der ans Ohr treffende Schall wird im Gehirn zu Empfindungen verarbeitet.

Bei der Beschreibung von Klängen sind Musiker manchmal sehr findig und entlehnen Begriffe aus anderen Erlebniswelten (z.B. „wie junger/alter Wein“). Oft tut man sich aber schwer, genau in Worte zu fassen, was man hört. Bei Klängen handelt es sich wie erwähnt um Empfindungen, „das Unaussprechliche“.

Wenn man dennoch nachvollziehbare Richtlinien oder Kriterien für die Klangbewertung findet, wird es möglich, verschiedene Klänge zu vergleichen und anderen mitzuteilen.

Gutes Hören kann man lernen. Die Auseinandersetzung mit den gefundenen Kriterien schärft die Wahrnehmung und kann hilfreich für die Erkundung der eigenen Klangvorstellung sein. Dann kann z.B. die Kaufentscheidung für ein Instrument nach eigenen Maßstäben gefällt werden.

3.1. Physikalische Methodik

Die Physik kann uns bei der Klangbewertung Anregungen geben. Klänge sollen möglichst objektiv charakterisiert und bewertet werden können. Deshalb trennt man einzelne Empfindungen klar voneinander ab und führt sie auf bestimmte Größen zurück. Bei Schallereignissen sind dies: Tonhöhe, Lautstärke, Klangdauer und Klangfarbe.

Im Mittelpunkt steht immer der Mensch. In Hörtests kristallisieren sich für den jeweiligen Instrumententyp bestimmte besonders geeignete Kriterien oder Klangattribute heraus.

Neben diesen Klangattributen, die dem Hörer zugänglich sind, gibt es noch weitere Qualitätsparameter, die vorrangig sind für den Spieler relevant sind:

Hörer

- ▶ Lautstärke
- ▶ Klangdauer/ Sustain
- ▶ Volumen
- ▶ Klarheit/Offenheit
- ▶ Brillanz
- ▶ Transparenz/Trennschärfe
- ▶ Klangschönheit

Spieler

zusätzlich

- ▶ Spielbarkeit
- ▶ Ansprache
- ▶ Ausgeglichenheit
- ▶ Dynamik
- ▶ Intonation
- ▶ Modulationsfähigkeit

Bei manchen, auch gängigen Begriffen stößt man hin und wieder auf Verwechslungen und fehlende Differenzierungen. Diese sollen hier vorrangig behandelt werden.

3.2. Lautstärke/ Dynamik/ Tragfähigkeit

Das Lautstärkeempfinden hängt ab von der Schallintensität, dem Druck, mit der die Schallwellen auf das Trommelfell treffen.

Für den musikalischen Einsatz ist die Lautstärke unter zwei Gesichtspunkten von Bedeutung. Diese sind die Dynamik und die Tragfähigkeit.

Dynamik

Darunter versteht man in der musikalischen Akustik die Spanne des Schalldrucks zwischen dem leisesten und dem lautesten möglichen Spielen.

Weshalb treten hier Unterschiede zutage?

Bei Gitarren mit schwerer Decke kann häufig beim pianissimo der Ton nicht mehr richtig geformt werden. Die Decke ist zu wenig flexibel, um auf eine sehr geringe Kraft zu reagieren.

Umgekehrt ist bei Gitarren mit dünner Decke die maximal mögliche Lautstärke oft schnell erreicht. Sie sprechen zwar sehr leicht an. Einer Steigerung durch Forcieren des Anschlags sind Grenzen gesetzt. Vor allem, wenn auch Boden und Zargen leicht gebaut sind, stößt man hier auf Probleme.

Ich vertrete die Auffassung, dass für die Erzielung einer möglichst großen Dynamik die Decke gezielt unterschiedlich auszuarbeiten ist. Im Unterbug, wo die Anregung stattfindet und sich die wichtigsten Schwingungen ausbilden, ist Flexibilität durch dünnes Ausarbeiten gefordert. Dynamische Reserven gewinne ich, wenn im Bereich des Oberbugs genügend Material vorhanden ist, das bei stärkerem Anschlag zusätzlich in Bewegung gesetzt werden kann.

Die maximale Lautstärke ist dann noch durch die Saitenlage begrenzt. Früher oder später werden die Saiten auf die Bünde schlagen. Hier ist ein Kompromiss zu suchen zwischen Spielbarkeit und Stärke des Anschlags.

Tragfähigkeit

Manche Gitarrenbauer sind der Ansicht, dass für eine gute Tragfähigkeit vor allem die tieffrequenten Klanganteile zuständig sind. Bestrebungen laufen dann darauf hinaus, die Gitarre möglichst tief abzustimmen, um eine gute Abstrahlung zu erreichen.

Die tiefsten Resonanzen beanspruchen tatsächlich die meiste Schwingungsenergie. Dennoch erscheint mir dieses Konzept wenig einsichtig.

Vielmehr ergibt sich die Tragfähigkeit aus der Stärke aller Frequenzen und ist von mehreren Faktoren abhängig.

Welche Faktoren sind das?

Man muss wissen, dass die Empfindung der Lautstärke **tonhöhenabhängig** ist. Die größte Empfindlichkeit besitzt das Ohr zwischen 1000 bis 5000 Hz. Im Vergleich: Die Frequenz der tiefen E-Saite ist ca. 82Hz, die des e'' am 12. Bund der hohen e'-Saite ca. 660Hz.

Versuche ich, den Gehalt hochfrequenter Klanganteile zu vergrößern und die Energie dorthin zu verlagern, wird dies die Tragfähigkeit stärker befördern, als bei der Steigerung tieffrequenter Anteile.

Die **Form der Schwingungsfelder** (vgl. Abb. 13) ist auch von Bedeutung. Die einzelnen Flächen sollen möglichst großflächig und ungleichmäßig verteilt sein. Damit verringert sich die Gefahr von akustischen Kurzschlüssen, dem Druckausgleich der Luft. Manchmal ist eine Gitarre im Nahfeld durchaus laut und kann doch bei größerer Entfernung erheblich abnehmen.

Für eine gute Tragfähigkeit arbeite ich an folgenden Punkten:

- Asymmetrische Bauweise v.a. in Bezug auf die Beleistung. Akustischen Kurzschlüsse werden verhindert und es entstehen zusätzliche Resonanzen.
- Dünne Ausarbeitung der Decke im Unterbug erzeugt einen großen Anteil an Obertönen.
- Niedrigere Zargen sind von Vorteil, weil die Energie zu den höheren Frequenzen verlagert wird.

Die Tragfähigkeit ist ein Kriterium, das vor allem für konzertierende Musiker von Bedeutung ist. Für einen Gitarristen ohne Konzertambitionen wird sie eher eine untergeordnete Rolle spielen. Für ihn spielt sich die Musik im Nahfeld ab und es ist eben eine Geschmacksfrage, ob er/sie eine sehr laute oder eine intime, eine helle oder bassbetonte Gitarre bevorzugt.

Gesamtlautstärke

Um die Gesamtlautstärke zu erhöhen, ziele ich auf eine **Vergrößerung des Wirkungsgrades** hin. Durchschnittlich nur unter 1% (!) der mit dem Anschlag eingebrachten Energie wird letztendlich als Schall abgestrahlt. Bei starken Resonanzen können es mitunter 5-10% sein. Der Rest geht durch Dämpfung und nicht abstrahlende Schwingungsformen verloren. Man weiß darüber noch recht wenig. Lässt sich der Grad der Abstrahlung nur um wenige Prozent erhöhen, wird bereits ein beträchtlicher Anstieg der Lautstärke zu verzeichnen sein.

Dazu gibt es mehrere Ansatzpunkte:

- Verwendung von dämpfungsarmem, spannungsfrei gelagertem Holz,
- Vermeidung von nicht beabsichtigten Spannungen beim Zusammenbau
- Herausarbeiten von freiklingenden Eigenschwingungen v.a. der Decke.

3.3. Klangdauer, Sustain

Aus berufenem Munde hörte ich schon die Äußerung, dass für die Gitarre eine kurze Klangdauer einfach typisch ist. Damit will ich mich nicht abfinden.

Die Herausforderung bei der Gitarre besteht darin, dass die Tonanregung impulsförmig geschieht, d. h. es wird mittels Anreißen, Anschlagen der Saite nur kurzzeitig Energie zugeführt. Das Instrument wird zu Schwingungen angeregt, die möglichst andauern sollen.

Abhängigkeiten

Die Tondauer oder das Sustain der Gitarre hängt ab:

- Von der Dämpfung des Instruments. Dämpfung entsteht in Abhängigkeit von den verwendeten Hölzern. Außerdem durch Spannungen, die beim Zusammenbau entstehen. Auch der Lack verursacht Dämpfung je nach Art und Dicke.
- Von der Art der Rückkoppelung des Korpus mit den Saiten.

Wichtig ist hier der Bereich zwischen Obersattel und Steg. Der Hals und besonders die Konstruktion der Hals-Korpus-Verbindung sollte möglichst steif sein, damit dort wenig Energie aufgesaugt wird. Die Energie soll möglichst über den Steg an den Korpus abgegeben werden. Ich bevorzuge eher schwere Hälse, z. B. aus Kirsche, wo die Dämpfung der Hand reduziert ist und ich baue Karbonstäbe ein. Karbon besitzt neben einer hohen Steifigkeit sehr gute Schalleiteigenschaften.

Der Steg hat eine zentrale Bedeutung. Bei einem zu leichten Steg wird die Energie sehr schnell an den Korpus abgegeben und verpufft. Ist er zu schwer, werden die Saitenschwingungen stark reflektiert. Der Ton steht zwar lange, braucht aber auch lange, um sich auszubilden. Die Ansprache leidet.

Hier ist eine Balance zu finden, auch in Verbindung z.B. mit einer Querleiste unter dem Steg.

3.4. Klangfarbe

Die Klangfarbe ist eine recht komplexe Größe, die man mit vielfältigem Vokabular beschreiben kann. Problematisch dabei ist, dass die Auffassung über die Bedeutung von Begriffen sehr unterschiedlich ausfallen können. Abhängig ist dies von jeweiligen Bezugspunkten, von Erfahrungen und der persönlichen Entwicklung des einzelnen.

An der Wahrnehmung der Klangfarbe sind maßgeblich die Ein- und Ausschwingvorgänge und die Zusammensetzung des Frequenzspektrums beteiligt.

Ein- und Ausschwingvorgänge

Sehen wir uns den zeitlichen Verlauf eines gespielten Tones an.

Der Ton braucht eine gewisse Zeit, um sich voll zu entwickeln. Die Schnelligkeit/ Steilheit der Tonentwicklung bestimmt die Härte der Klangempfindung.

Ein schnell einschwingender Ton wird als hart, perkussiv, ein langsam einschwingender Ton als weich empfunden. Dabei spielt auch eine Rolle, in welcher Weise sich die einzelnen Teiltöne unterschiedlich ausbilden. Interessant ist, dass es sich in dieser Phase der Klangausprägung entscheidet, welche Instrumentenart wir erkennen können. Schneidet man den Einschwingvorgang ab, fällt es schwer zu unterscheiden, ob man eine Gitarre oder eine Posaune hört.

Einen **stationären Teil** kann man bei der Gitarre anders als bei einem Streich- oder Blasinstrument mit gleichmäßiger Energiezufuhr nur bedingt angeben.

Beim **Ausschwingvorgang** entfärbt sich der Klang. Die Pegel der hochfrequenten Obertöne nehmen viel schneller ab als die unteren.

Der Spieler kann den Einschwingvorgang durch den Tonansatz beeinflussen, z.B. durch den Anschlagswinkel.

Als Gitarrenbauerin werde ich vor allem durch die Anlage des Steges Einfluss nehmen. Je nach Masse des Steges wird die Energie der Saiten mehr oder weniger schnell an den Korpus abgegeben. In der Physik spricht man von Impedanz.

Auch die Beleistung ist zu beachten. Ich sehe deren Funktion nämlich auch darin, den Schall auf die Deckfläche zu verteilen. In Längsrichtung der Holzfasern breitet sich der Schall viel schneller aus als in Querrichtung. Mit einer bestimmten Anordnung der Leisten erhalte ich eine mehr oder weniger schnelle Anregung von Resonanzen.

Resonanzspektrum

Um noch mehr über die Klangfarbe zu erfahren, betrachten wir noch einmal die Resonanzkurve (Abb. 12).

Durch eine Anzahl von ausgeprägten Resonanzspitzen sowie Anhebungen und Absenkungen von bestimmten Bereichen erhält ein Instrument einen individuellen Charakter. Wesentlich ist nicht die absolute Höhe der einzelnen Pegel, sondern das Verhältnis der Pegel zueinander.

Volumen

Die Abstrahlung des unteren Frequenzbereichs zwischen 50Hz und 400Hz, vor allem bis 200Hz bestimmt den Eindruck des Volumens.

Hier spielt vor allem die Frequenz der Hohlraumresonanz und deren Ausprägung eine große Rolle, aber auch die ersten Plattenschwingungen. Ist dieser Frequenzbereich zu dominant, neigt die Gitarre zum Dröhnen.

Der Volumeneindruck ist für alle Saiten der Gitarre von Bedeutung und nicht nur für die Basssaiten. Über das gekoppelte Schwingungssystem schwingen ja außer der angeschlagenen Saite auch andere Saiten und deren Obertöne mit.

Man hört das sehr deutlich, wenn man eine Saite anzupft und die anderen bedämpft hält.

Klarheit/ Offenheit

Der Bereich von 800 bis 1200 Hz charakterisiert die Klarheit oder Offenheit der Gitarre. Die Klarheit ist nicht zu verwechseln mit der Transparenz, auch Trennschärfe.

Man beschreibt die Klangfarbe auch mit Hilfe der Vokale.

Ein Vokal bleibt bei veränderlicher Tonhöhe und Lautstärke immer der gleiche Vokal. Genauso bestimmt eine Klangfarbe den gesamten Tonumfang der Gitarre.

In der Physik existiert dazu der Begriff Formant.

Beim a-Formanten ist der hier bezeichnete Frequenzbereich stark ausgeprägt. „a“ wird als besonders angenehm bewertet.

Helligkeit/Brillanz

Frequenzen von 2000 bis 5000 Hz bestimmen den Eindruck der Helligkeit und der Schärfe. Positiv ausgedrückt ist die Schärfe die Brillanz.

In Hörtests ist man auch zu der Erkenntnis gekommen, dass es tendenziell zwei Hörvorlieben gibt. Die eine Gruppe bevorzugt einen dunklen, bassbetonten Klang, während die andere einen hellen, obertonreichen Klang favorisiert. Dementsprechend werden die jeweiligen Gegenpole eher negativ bewertet.

3.5. Intonation

Eine korrekt intonierte Gitarre ist wünschenswert. Gerade im Ensemblespiel und bei Tonaufnahmen, natürlich auch für den Solomusiker kommen die Vorteile gegenüber Gitarren mit herkömm-

lichen, oft unzureichend stimmenden Gitarren zum Tragen. Eine genaue Intonation ist nicht nur eine Frage des Hörkomforts. Verbesserungen treten auch in klanglicher Hinsicht auf.

Transparenz/Trennschärfe

Wie schon gesagt, werden beim Anschlag eines Tones gleichzeitig die übrigen Saiten und ihre Obertöne angeregt. Je besser die jeweiligen Frequenzen zusammenfallen, umso leichter gelingt die Anregung. Der Klang wird kräftiger.

Und außerdem transparenter. Dicht nebeneinander liegende Frequenzen verursachen Schwebungen, die zu Rauigkeiten führen.

Somit ergibt sich aus dem Maß an Stimmungsunreinheiten der Saiten und der Intonation noch ein weiteres Qualitätsmerkmal, nämlich die Transparenz oder Trennschärfe.

Sie hängt aber genauso mit der mehr oder weniger scharfen Ausprägung der einzelnen Resonanzen zusammen.

Ursache von Intonationsungenauigkeiten - Oktavreinheit

Ist das Griffbrett richtig eingesägt, d.h. bundrein (s. Abschnitt 2), ergeben sich beim gegriffenen Ton dennoch Intonationsfehler.

Worin liegt die Ursache?

Beim Niederdrücken wird die Saite in ihrer Länge gedehnt. Ihre Spannung wird erhöht. Folge dieses Erscheinung ist eine Frequenzerhöhung. Sie wird umso größer, je weiter die Saite gegen das Griffbrett gedrückt wird.

Der Effekt steigert sich, wenn man in die höheren Lagen kommt, denn der Abstand der Saiten zum Griffbrett wird zunehmend größer.

Diese Abweichung lässt sich am Steg ausgleichen. Man spricht von **Kompensation**. Zusätzlich zur berechneten Mensurlänge ist eine Zugabe notwendig. Sie beträgt etwa 1-4mm.

Das Maß der Kompensation hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Von den Saiten, v.a. von der Steifigkeit und dem Durchmesser der Saite. Karbonsaiten, richtigerweise PVDF-Saiten brauchen weniger Zugabe als Nylonsaiten, die e'-Saite weniger als die g-Saite.
- Von der Saitenlage: je höher die Saitenlage ist, desto größer ist auch die Dehnung. Deshalb wird bei einer festen Nut die Stegeinlage meist etwas schräg gesetzt.
- Dann hängt die Kompensation noch ab vom jeweiligen Spieler und seiner Technik des Abgreifens.

Man überprüft die Stimmung, indem man das Oktavflageolet mit der gegriffenen Oktave am 12. Bund vergleicht. Stimmt beides überein, spricht man von **Oktavreinheit**.

Eine weitere Fehlerquelle hinsichtlich der Stimmung sind die Saiten. Verstimmungen entstehen durch Inhomogenitäten im Material, Abweichungen im Durchmesser oder unrunder Querschnitten. Insbesondere bei den Diskantsaiten ist dieses Phänomen bekannt.

Man sagt: Die Saite ist nicht **stimmungsrein**. (Bei Streichinstrumenten wird hierzu auch der Begriff **quintenrein** verwendet)

Durch die im Folgenden erörterte Stegkonstruktion kann neben der Einstellung der Oktavreinheit auch ein Saitenfehler innerhalb bestimmter Grenzen ausgeglichen werden.

Freie Untersattelhalterung (FABS)

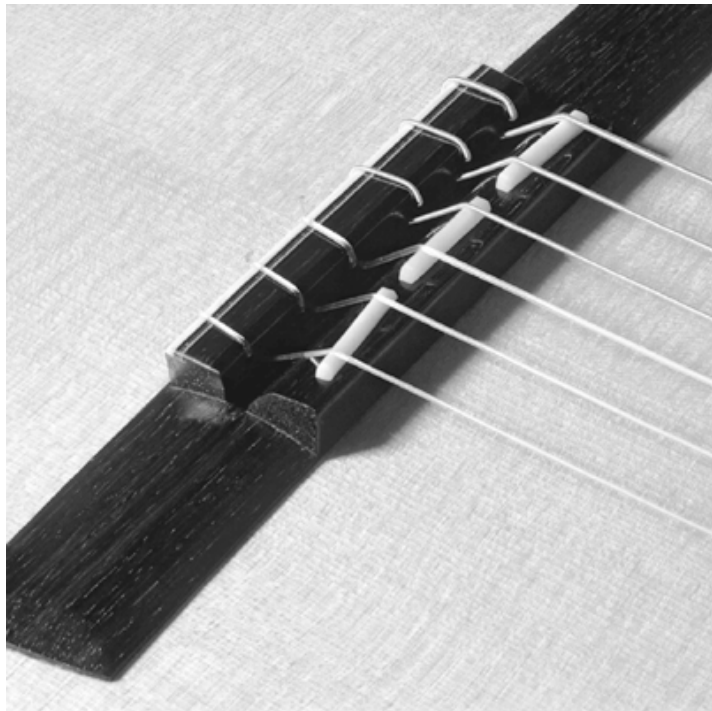
Für meine Gitarren verwende ich einen vom Herkömmlichen abweichenden Steg mit dreigeteilten Knochen.

Was will ich damit bezwecken?

Bei unterschiedlichen Saiten und Saitentypen kann sich aufgrund der vorhin aufgeführten Abhängigkeiten das notwendige Maß der Kompensation verändern.

Bei diesem Stegsystem hat man die Möglichkeit, die Kompensation beliebig einzustellen:

Auf einem leicht schräggestellten Plateau liegen die Knochen auf und werden durch den Saitendruck fixiert, im Prinzip ähnlich wie bei der Geige oder der Jazzgitarre. Für jede Saite kann der Knochen nun nach Bedarf nach vorn oder zurückgeschoben werden.



Vor ca. 30 Jahren wurde dieses System parallel unabhängig von mehreren Personen ausgedacht (Karl Sandvoß, Bernd Ahlert, Carlo Dominiconi) und von ISIGL (Institut for Stringed Instruments Guitar and Lute unter dem Vorsitz von Karl Sandvoß) unter der Bezeichnung FABS (= Free Adjustable Bridge Saddle) publik gemacht. Der deutsche Begriff ist freie Untersattelhalterung .

Abb. 14 Intonationskorrektur mit freier Untersattelhalterung (FABS)

Mir fiel auf, dass oft die tiefe E-Saite eines Gitarrensatzes eine viel geringere Kompensation benötigt als die A-Saite,. Die Saitenzugkräfte sind nämlich innerhalb eines Satzes nicht gleich. Die E-Saite wird offenbar gerne niedriger bemessen. Mit einer üblichen, auf der Basseite schräg nach hinten gesetzten Stegeinlage hat man in diesem Fall keine Chance.

Auch für den Obersattel ist manchmal eine gewisse Korrektur notwendig. Der Abstand des 1. Bundes zum Sattel wird dann verringert, um eine spiel- und saitentechisch verursachte Erhöhung der Stimmung auszugleichen.

3.6. Klangsönheit

Am Ende steht die Klangsönheit. Sie ergibt sich als Gesamturteil und kann oft gar nicht begründet werden. Gewisse Klanganteile sind für uns nur unterschwellig wahrnehmbar. Psychoakustiker sind in diese Materie schon sehr tief eingedrungen. Ein Normalsterblicher darf die schönen Klänge einfach auf sich wirken lassen.

Quellen:

- Hall, Donald: Musikalische Akustik – Ein Handbuch. Mainz 1997
- Löben Sels, Hans van: Tension, forces and deformation – Constructural aspects of the classical guitar. o. O. 1996
- Meinel, E.; Ziegenhals, G.: Lehrbrief Musikalische Akustik, Teil I Grundlagen. o.O. 1991
- Meinel, E.: Lehrbrief Musikalische Akustik, Teil II Akusik der Streich- und Zupfinstrumente. Markneukirchen 1995
- Meinel, Eberhard: Messergebnisse. Skript zum Forschungsprojekt „Weissgerber“ der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH), Markneukirchen 2000
- Meyer, Jürgen: Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen. Frankfurt/M. 1985
- Roederer, Juan, G.: Physikalische und Psychoakustische Grundlagen der Musik. Berlin Heidelberg 2000
- Sandvoß, Karl: Die Intonation – das Stiefkind der Gitarre? In: Gitarre Aktuell IV/04 (S. 55ff.) u. I/05 (S. 16ff.)
- Sandvoß, Karl: Konstruktive Grundregeln zum Bau intonationssicherer Gitarren und das Saitenproblem. In: Gitarre & Laute, 6/ 1994 u. 1/1995
- Schleske, Martin: Klangpraxis Geigenbau – Zur Anwendung neuer akustischer Forschungsmethoden in der Werkstatt des Geigenbauers. In: Das Orchester, 4/98 (S. 5ff.)
- Schleske, Martin: Modalanalyse im Geigenbau. In: Musikinstrumentenbau-Zeitschrift, Teil I: 2-3/1992 (S. 98ff.), Teil II: 6/1992 (S. 10ff.), Teil III. 9/1992 (S.58ff.)
- Ziegenhals, Gunter: Charakterisierung musikalischer Klänge mittels psychoakustischer Größen. Zwota o.J.