

Besonderheiten bei der Tonabnahme von Akustikgitarren

Masterarbeit

Im Studiengang

Audiovisuelle Medien

vorgelegt am 21.12.2017 von

Victor Gogröf

Matrikelnummer: 31779

an der Hochschule der Medien Stuttgart

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Engineering“

Erstprüfer:

Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer:

Prof. Jens-Helge Hergesell

Eidesstattliche Versicherung

Name:	Gogröf	Vorname:	Victor
Matrikel-Nr.:	31779	Studiengang:	AM3

Hiermit versichere ich, Victor Gogröf, an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Besonderheiten bei der Tonabnahme von Akustik-Gitarren“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§19 Abs. 2 Master-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (siehe unten) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)

§ 156 StGB Falsche Versicherung an Eides statt

Wer von einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Stuttgart, den 21.12.2017

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Die Arbeit widmet sich einer ganzheitlichen Betrachtung der wichtigsten Aspekte bei der Tonabnahme von Akustikgitarren. Dazu werden nach einer Einführung über Geschichte, Aufbau und Resonanzverhalten des Instrumentes die technischen Aspekte aller gängigen Tonabnahme Verfahren untersucht und auf ihren Nutzen in verschiedenen Situationen hin beurteilt. Besondere Aufmerksamkeit wird der Fragestellung gewidmet, wie die Verbesserung eines Tonabnehmersignals durch digitale Bearbeitung realisiert werden kann und wo sie an ihre Grenzen stößt. Es wird als Ergebnis festgehalten, dass solche Ansätze zur Mikrofonsimulation das Signal hörbar verbessern, aber nicht zur naturgetreuen Wiedergabe sehr hochfrequenter Anteile des Klangspektrums geeignet sind und dieser Mangel auch nicht einfach durch weitere Verbesserungen des digitalen Modells behoben werden kann.

Schlagwörter: Akustische Gitarre, Akustikgitarre, Klassische Gitarre, Tonabnehmer, Kontaktmikrofon, Vorverstärker, Mikrofonposition, Faltung, Impulsantwort, Mikrofonsimulation, Fishman Aura, Yamaha SRT

Abstract

This thesis aims to provide a holistic inspection of the most important aspects of recording acoustic guitars. After an introduction about the history, the structure and the resonant behavior of the instrument the technical aspects of all established means of obtaining a signal are being assessed and evaluated for their usefulness in different situations. Special attention is dedicated to the question of how the improvement of a pickup signal by digital means can be realized and where the limits of such techniques are. The conclusion is drawn, that such means of microphone simulation make for an audible improvement of the signal, but are not suited for the natural reproduction of very high frequency parts of the sonic spectrum and that this shortage cannot easily be improved by further refinement of the digital model.

Keywords: acoustic guitar, classical guitar, pickup, contact microphone, preamplifier, microphone position, convolution, impulse response, microphone simulation, Fishman Aura, Yamaha SRT

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	6
Nomenklatur.....	7
1 Motivation und Zielsetzung	8
1.1 Die Lautstärke der Akustikgitarre.....	8
1.2 Verstärkung und Feedback	9
2 Einführung	10
2.1 Kurze Geschichte der Gitarre	10
2.2 Einordnung der Gitarre in verschiedene musikalische Kontexte	10
2.3 Vergleich von klassischen und Western-Gitarristen.....	11
2.4 Parallelen zu anderen Instrumenten.....	13
3 Die Klangerzeugung in der Gitarre.....	14
3.1 Geschichte eines Gitarrentons von der Anregung bis zum Hörer	15
3.2 Nylon und Stahlsaiten	16
3.3 Die Schwingungen der Gitarre im Detail.....	18
4 Live-Mikrofonierung und Rückkopplungen	22
4.1 Positionierung von Mikrofonen und Monitoren.....	22
4.2 Feedback Reduktion durch Klangregelung.....	23
4.3 Close Miking.....	24
4.4 Rückkopplungen bei Akustikgitarren	28
5 Tonabnehmersysteme	29
5.1 Under-Saddle Transducer	30
5.2 Sensoren an der Decke.....	40
5.3 Interne Mikrofone	45
5.4 Magnetische Tonabnehmersysteme.....	48
5.5 Kombinationssysteme	49
6 Vorverstärker und Klangregelung	50
6.1 Die Impedanz	50
6.2 Position des Vorverstärkers.....	52
6.3 EQ und Klangregelung	53
6.4 Leistungsverstärker	54

7	Mikrofonsimulation und Faltung	54
7.1	Grundidee	55
7.2	Einführung zur Faltung und Impulsantwort	55
7.3	Bestimmung der Übertragungsfunktion des Gitarrenkorpus	56
7.4	Stand der Technik	63
7.5	Abweichungen von Modellen und Realität	64
7.6	Fazit	65
7.7	Transfer auf andere Anwendungen	66
8	Tonabnahme im Studio	67
8.1	Allgemeines zur Mikrofonierung	67
8.2	Spezielle Aspekte	68
9	Fazit und Ausblick	70
	Abbildungsverzeichnis	71
	Literaturverzeichnis	72
	Internetquellen	75
	Anhang 1	76

Abkürzungsverzeichnis

AES	Audio Engineering Society – Internationaler Verband von Toningenieuren
DAW	Digital Audio Workstation – Software zum Bearbeiten und Mischen von Audio
DI-Box	Direkt Input Box – Ein Gerät zur Wandlung unsymmetrischer Signale in symmetrische Signale über XLR-Kabel
DSP	Digital Signal Processing – Digitale Signalbearbeitung
ETMF	Electrothermomechanical Film – Elektrothermomechanischer Film
EQ	Equalizer
FFT	Fast Fourier Transform – Algorithmus zur schnellen Fourier Transformation
ISS	International Space Station – Internationale Raumstation
LTI-System	Linear Time-Invariant System – Lineares und zeitinvariantes System
MEMS	Microelectromechanical Systems – Mikroelektromechanische Systeme
PA	Public Address – Bezeichnung für die ans Publikum gerichtete Beschallung
PC	Personal Computer – privater Rechner bzw. Computer
PVDS	Polyvinylidenfluorid – Polymer, auf dessen Basis piezoelektrische Übertrager hergestellt werden können
RMS	Root Mean Square – Quadratisches Mittel; Effektivwert
SRT	Studio Response Technology – Markenname eines speziellen Yamaha Pickup Systems mit Mikrofonsimulation
XLR	External Live Return – Bezeichnung der Kontakte bei Steckern zur symmetrischen Audiosignalübertragung

Nomenklatur

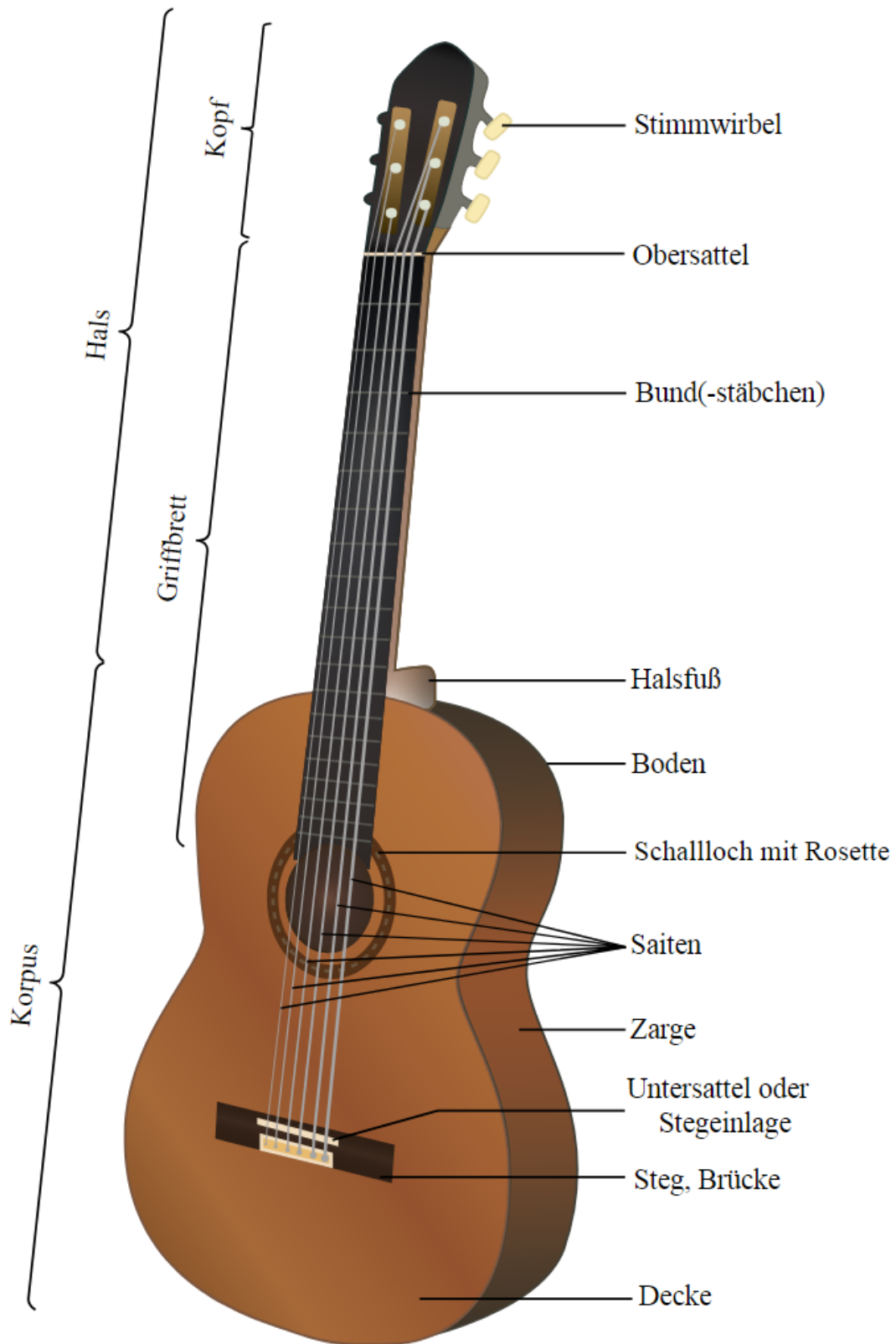


Abbildung 1 Benennung der Grundbestandteile einer akustischen Gitarre, aus [1]

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Die Lautstärke der Akustikgitarre

Die Gitarre ist im Vergleich mit anderen Instrumenten sehr leise. Das ist größtenteils der Tatsache geschuldet, dass sie ein Zupfinstrument ist. Viele Instrumente haben einen Erregungsmechanismus der es erlaubt, dem Ton zu jedem Zeitpunkt neue Energie zuzuführen. Streicher können einen Ton beliebig lange halten, indem sie mit dem Bogen auf und ab streichen und ihn dabei auch lauter werden lassen als zu Beginn. Bläser und Sänger können den gleichen Effekt erzielen, indem sie die Stärke des Luftstroms manipulieren und den Ton so lange bei gleicher Lautstärke halten, bis sie wieder einatmen müssen.

Zupf- und Schlaginstrumente dagegen regen den Ton nur einmal an, woraufhin er schnell wieder abklingt. Welche dieser beiden Instrumentenfamilien lautstärkemäßig den Kürzeren zieht, wird sich jeder bewusst sein, der schon einmal ein Schlagzeug aus der Nähe gehört hat und dabei feststellt, wie viel Kraft und körperlicher Einsatz hinter jeder einzelnen Note steckt, besonders verglichen mit dem Zupfen einer einzelnen Saite auf der klassischen Gitarre.

Auch wenn sich die wahrgenommene Lautstärke durch einige Tricks erhöhen lässt, beispielsweise durch das Verwenden von Saiten hoher Spannung und insbesondere Stahlsaiten, das Tremolieren langer Töne und dem Spielen von lauten Akkorden in schneller Abfolge mit einem Plektrum, bekommt eine Akustikgitarre schnell Probleme, sich in der Gruppe gegen andere Instrumente durchzusetzen. In „unplugged“ Settings kann schon ein einzelnes Blasinstrument oder gar ein lauter Sänger ausreichen, um die Gitarre zu übertönen. Natürlich lässt sich das Problem ein Stück weit lösen, indem die Gitarre so laut spielt wie sie kann und die Trompete gleichzeitig so leise wie möglich, allerdings geht dadurch sowohl bei den einzelnen Instrumenten als auch bei der Gruppe insgesamt ein großer Teil des Dynamikumfangs verloren. Auch die anderen oben genannten Tricks zwingen den Musiker, womöglich seine Spieltechnik und seinen Ausdruck der Forderung nach höherer Lautstärke unterzuordnen.

Es ist also offensichtlich, dass die Akustikgitarre als grundsätzlich leises Instrument von einer Verstärkung über Lautsprecher profitieren kann.

1.2 Verstärkung und Feedback

Mittlerweile sind viele Tonabnehmersysteme entwickelt worden, die eine Verstärkung der Akustikgitarre ermöglichen. Die Ergebnisse bleiben dabei aber häufig hinter den Erwartungen der Musiker zurück: Es scheint so, als ob jeder Tonabnehmer entweder sehr unnatürlich klingt oder eine hohe Anfälligkeit für Rückkopplungen besitzt oder einen Kompromiss aus beidem. Es stellt sich natürlich die Frage, warum dieses Phänomen trotz jahrzehntelanger Weiterentwicklung durch die Pickup Hersteller nach wie vor Bestand zu haben scheint. Den Grund für diese Beobachtung findet man letztlich in der Gitarre selbst: Sie besteht zu einem großen Teil aus einem Resonanzkörper, dessen Hauptfunktion darin besteht zu schwingen und dadurch insbesondere über die Decke Schall an die Umgebung abstrahlen, was einen großen Teil des gesamten Klangs der Gitarre ausmacht. Eben diese Neigung zu schwingen macht das Instrument aber auch anfällig für die Anregung von außen, zum Beispiel durch laute Bühnenmonitore. Die Sensibilität eines Tonabnehmers für die charakteristischen Schwingungen der Gitarrendecke, die den natürlichen Klang ausmachen, ist also dieselbe Eigenschaft, aus der auch die erhöhte Feedbackanfälligkeit hervorgeht.

Da die akustische Gitarre eher leise ist, benötigt sie eine hohe Verstärkung, um mit anderen Instrumenten wie beispielsweise Schlagzeug mithalten zu können. Aus höherer Verstärkung ergibt sich meist auch höhere Gefahr für Rückkopplungen, es bleibt also oftmals nur noch die Wahl eines Tonabnehmers, der eher durch Feedbackresistenz überzeugt als durch natürlichen Klang. Seit jeher sorgt dieses Problem für Unzufriedenheit bei Gitarristen und Tontechnikern, die auf die naturgetreue Wiedergabe des Instrumentes bei ausreichender Lautstärke Wert legen ebenso wie auf ein Konzert, das frei von Rückkopplungen ist.

Die Fragestellung, der sich diese Arbeit widmet, besteht also darin, ob und wie es möglich ist, eine Akustikgitarre zu verstärken, ohne dabei Kompromisse zwischen gutem Klang und zuverlässiger Beschallung ohne Rückkopplungen machen zu müssen. Dazu werden nach einer kurzen Einführung die wichtigsten Aspekte der Klangerzeugung und der verschiedenen Tonabnehmersysteme betrachtet. Schließlich wird untersucht, durch welche Techniken der Mikrofonierung, der Tonabnahme, der Signalbearbeitung und Veränderungen am Instrument selbst geeignet sind, um dem obigen Ideal so nahe zu kommen wie möglich.

Diese Arbeit strebt eine ganzheitliche Betrachtung des Themas an, in der neben der technischen Seite auch die Perspektive von Musikern sowie Tontechnikern gleichermaßen berücksichtigt wird, um letztlich aus den physikalischen Grundzusammenhängen Erkenntnisse abzuleiten, die sich in der Praxis zielgerichtet anwenden lassen.

2 Einführung

2.1 Kurze Geschichte der Gitarre

Da gezupfte Saiteninstrumente schon seit Jahrtausenden in verschiedener Form gebaut und gespielt wurden, ist die Entwicklung der Gitarre eine lange Geschichte, die in der Literatur ausgiebig behandelt wird. (Gerken et al. 2013) bietet einen guten Überblick über das Thema. Ein Meilenstein stellt die Form der klassischen Gitarre dar, die im 19. Jahrhundert vom spanischen Gitarrenbauer Antonio de Torres festgelegt wurde und seitdem den Standard darstellt. Bei der Entwicklung der Stahlsaitengitarre spielten die ersten Modelle der Firma Martin eine wichtige Rolle, die sich durch höhere Lautstärke bemerkbar machten als die Gitarre mit Nylonsaiten und dadurch vor allem in der amerikanischen Folk Musik beliebt wurden. Heute ist die Westerngitarre verbreiteter als die klassische Nylongitarre, trotzdem erfreuen sich beide Instrumente großer Beliebtheit in vielen verschiedenen Stilrichtungen.

2.2 Einordnung der Gitarre in verschiedene musikalische Kontexte

Die Akustikgitarre ist ein Instrument, das von Klassik über Country bis hin zu Pop und Rock in den verschiedensten musikalischen Stilrichtungen eingesetzt wird. Dabei sieht man sich bei der Tonabnahme live wie im Studio mit einer Vielzahl möglicher Klangvorstellungen konfrontiert. Außerdem kann sich die Lautstärke einer Beschallung dramatisch unterscheiden, je nachdem um welche Art der Veranstaltung es sich handelt. Während eine E-Gitarre fast immer in einer für Pop / Rock üblichen lauten Umgebung vorkommt, kann die Akustikgitarre ebenso im Rahmen eines unverstärkten Klassik-Konzertes auftreten wie als Instrument einer vollbesetzten Band inklusive Schlagzeuger. Um zu verstehen, wie drastisch dieser Unterschied sein kann, betrachten wir beide Fälle kurz exemplarisch:

Bei einem Konzert für Orchester und Sologitarre wie beispielsweise dem „Concierto de Aranjuez“ von Joaquín Rodrigo wird die Gitarre üblicherweise nur soweit verstärkt, dass sie mit dem Orchester mithalten kann. Dennoch bleiben die ruhigen Passagen so leise, dass ein Räuspern eines Zuhörers womöglich im ganzen Saal hörbar ist, entsprechend diszipliniert ist das Publikum üblicherweise. Bei einem Konzert von Eric Clapton dagegen muss dessen Gitarre sowohl auf den Bühnen Monitoren laut genug sein, um trotz Band inklusive Drummer hörbar zu sein. In der Beschallung muss sie sich souverän gegen ein möglicherweise vor Begeisterung schreiendes Publikum durchsetzen können.

Es sollte klar sein, dass im zweiten Fall durch die deutlich höhere Lautstärke auch ein größeres Risiko für Rückkopplungen besteht als im ersten Beispiel. Es macht daher wenig Sinn, für beide Gitarristen das exakt gleiche Tonabnahmeverfahren zu empfehlen. Diese Entscheidung muss immer individuell auf das Instrument, die Klangvorstellung und die Lautstärkepegel auf der Bühne und im Saal angepasst werden. Die Betrachtungen in dieser Arbeit können als Hilfestellung dabei dienen, die Auswahl des Abnahmeverfahrens zu erleichtern und dabei typische Probleme zu vermeiden.

2.3 Vergleich von klassischen und Western-Gitarristen

Der Unterschied zwischen den verschiedenen Arten der Akustikgitarre ist nicht groß. Auch wenn die Version mit Stahlsaiten beispielsweise ein anderes Bracing verwendet, um dem größeren Saitenzug standzuhalten, können fast alle Aussagen über die Klangerzeugung und Tonabnahme gleichermaßen auf die klassische Gitarre wie die Westerngitarre bezogen werden. Der Einfluss des Instruments selbst fällt teils weniger ins Gewicht als der jeweilige musikalische Kontext und die dazugehörigen Musiker, die in den verschiedenen Stilrichtungen zu Hause sind. Insbesondere der rein klassische Gitarrist unterscheidet sich recht deutlich von einem typischen Stahlsaiten-Gitarristen, was den musikalischen Hintergrund, die Spieltechnik, das Repertoire, die Klangvorstellung und die Rolle in einer Gruppe angeht.

Es ist auffällig, dass beispielsweise klassische Gitarren standardmäßig fast nie mit einem Tonabnehmer ausgestattet sind, während dies bei Westerngitarren die Regel ist, und das obwohl Instrumente mit Stahlsaiten von Natur aus bereits lauter sind. Als Erklärung liegt nahe, dass die Klassiker entweder nie auf sonderlich lauten Veranstaltungen spielen oder eine Tradition des Instrumentenbaus weiterleben, die vor dem Aufkommen von Pickups als Ideal definiert wurde. Beides mag in gewissem Umfang zutreffen, es spielen aber noch weit mehr Gründe eine Rolle dafür, weshalb viele klassische Gitarristen gar nicht daran denken wollen, ihr Instrument mit einem Tonabnehmer nachzurüsten:

Anders als bei der Westerngitarre, die häufig als Rhythmus- und Begleitinstrument eingesetzt wird, lebt das klassische Gitarrenspiel häufig von Melodien und Phrasen, die im Arrangement den Stellenwert einer gesanglichen Hauptmelodie haben. Der klassische Gitarrist widmet in seiner Vorbereitung daher der klanglichen Gestaltung jedes Teils der Melodie viel Zeit und Aufmerksamkeit. Auch auf semi-professionellem Niveau ist es absolut üblich, dass beispielsweise eine Melodie, die in der ersten Lage und unter Einsatz von Leersaiten gespielt werden könnte, stattdessen in einer höheren Lage und ohne Leersaiten

eingesübt wird, weil sie dort womöglich besser klingt und man mehr Kontrolle über den Klang jeden Tones hat. Auch der Technik der rechten Hand wird deutlich mehr Aufmerksamkeit gewidmet als beim Akkordspiel mit dem Plektrum. Die Zupfposition zwischen Steg und Griffbrett sowie der Winkel, in dem die Saite angeschlagen wird, spielen eine wichtige Rolle für die Klangfarbe. Außerdem werden die Fingernägel der rechten Hand gründlich gefeilt und poliert, so dass die Saite beim Anzupfen mit möglichst wenigen Nebengeräuschen und ohne hängen zu bleiben darüber gleiten kann.



Abbildung 2 Rechte Hand eines klassischen Gitarristen, aus [2]

Werden nun beide Instrumente über einen unnatürlich klingenden Tonabnehmer verstärkt, wird der klassische Gitarrist feststellen, dass ein großer Teil seiner Vorbereitung dadurch zunichte gemacht wird. Der andere Musiker dagegen, der vor allem das Akkordspiel und Schlagmuster mit dem Plektrum eingesübt hat und nicht jedem einzelnen Ton dabei die Aufmerksamkeit eines Sängers widmet, kann eher zufrieden damit sein, dass er nun dieselben Akkorde und Rhythmen hört, nur eben lauter.

Das Phänomen, dass klassische Gitarristen eher Pickup-Verweigerer sind als Westerngitarristen, hat also durchaus nachvollziehbare Gründe. Trotzdem ist auch der Unmut des Tontechnikers darüber nicht unberechtigt, wenn er plötzlich eine leise klassische Gitarre ohne Tonabnehmer in einer lauten Umgebung abnehmen muss, was immer ein hohes Risiko für Feedback bedeutet. Für diese Problematik wiederum fehlt manchen klassischen Musikern das Bewusstsein, wenn sie ansonsten überwiegend im klassischen Rahmen ohne Verstärkung auftreten.

Ein typisches Beispiel für diesen Punkt ist das legendäre Akustikgitarrentrio bestehend aus Paco de Lucia, Al Di Meola und John McLaughlin. Der Flamencogitarrist de Lucia ließ weder für die Tour und auch sonst nie einen Tonabnehmer in seine handgefertigte Meistergitarre einbauen. Die beiden anderen Musiker waren weit weniger zimperlich, zu Standardmodellen von Ovation zu greifen, die über integrierte Tonabnehmer verfügen.

2.4 Parallelen zu anderen Instrumenten

Es macht Sinn, gleich zu Anfang dieser Arbeit einzuordnen, inwieweit sich die folgenden Betrachtungen über die Akustikgitarre, die verschiedenen Tonabnehmersysteme und die Möglichkeiten der Signalbearbeitung auf andere Instrumententypen übertragen lassen. Denn wie so häufig finden sich die zugrunde liegenden technischen Prinzipien und physikalischen Zusammenhänge nicht nur bei exakt diesem einen Instrumentd sondern auch bei seinen nächsten Verwandten.

So kann beispielsweise gesagt werden, dass fast alle Aussagen, die für die Akustikgitarre zutreffen, auch bei anderen Zupfinstrumenten gelten, die demselben Grundaufbau folgen. Mandoline, Mandola, Ukulele, Banjo, die akustische Baritongitarre sowie der Akustikbass und alle Variationen dieser Instrumentes so wie ihre historischen Vorgänger aus der Familie der Laute erzeugen ihren Klang, indem eine Saite zum Schwingen angeregt wird, die wiederum über einen Steg die Decke eines Resonanzkörpers anregt. Die klanglichen Unterschiede liegen hauptsächlich in der Größe und Form der Instrumente sowie den verschiedenen Materialien, die für Saiten und Korpus verwendet werden und nicht zuletzt in den unterschiedlichen Spielweisen in den jeweils typischen Musikrichtungen. Bei den Aspekten, die für die Tonabnahme entscheidend sind, kann das Wissen über die Eigenschaften der Akustikgitarre überwiegend übertragen werden, sofern die magnetischen Tonabnehmer den Instrumenten mit passenden Stahlsaiten vorbehalten bleiben.

Die nächsten Verwandten der Zupfinstrumente sind Streichinstrumente wie Violine und Cello. Der größte Unterschied besteht, wie der Name schon sagt, in der Anregung der Saite durch das darüber-Streichen mit dem Bogen anstelle eines Zupfens. Mit der Pizzicato-Spieltechnik können aber auch Streichinstrumente gezupft werden. Während diese Technik in der Klassik eher eine Ausnahme und einen besonderen Effekt darstellt, ist das Zupfen beispielsweise beim Jazz Kontrabass der Normalfall.

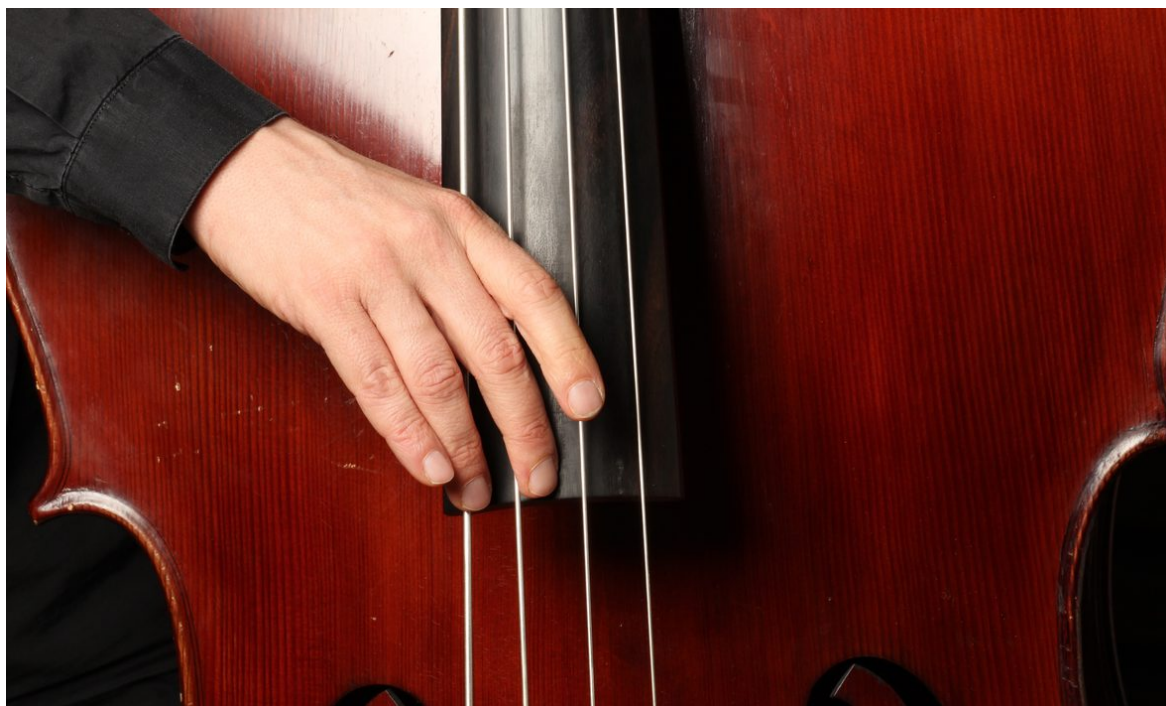


Abbildung 3 Handhaltung beim Jazzkontrabass, aus [3]

Auch der Grundaufbau der Instrumente ähnelt den Zupfinstrumenten weitgehend. Insofern können auch hier einige Parallelen gezogen werden, wenn man sich der Unterschiede bewusst ist: So hat einerseits bei Streichinstrumenten der Steg nicht die Funktion, auch die Zugspannung der Saiten zu tragen, sondern wird von diesen nur senkrecht auf den Korpus gedrückt. Er unterscheidet sich auch in der Form und Höhe deutlich von Zupfinstrumenten und bietet daher die Option, Kontaktmikrofone seitlich am Steg anzubringen anstatt nur direkt darunter. Außerdem muss bei der Auswahl eines Sensors für die Decke berücksichtigt werden, dass diese gewölbt ist und nicht flach wie bei der Akustikgitarre. Kontaktmikrofone mit größerer Auflagefläche lassen sich also möglicherweise gar nicht an dem Sweet-Spot montieren, den man durch Ausprobieren und tiefgreifende Kenntnis über das Schwingungsverhalten von Holzdecken und ihrer Eigenmoden gefunden hat.

3 Die Klangerzeugung in der Gitarre

Für die Tonabnahme eines jeden Instrumentes ist es wichtig zu wissen, wie und an welcher Stelle der Ton entsteht und in welche Richtung die verschiedenen Klanganteile an die Umgebung abgestrahlt werden. Betrachten wir daher die Akustikgitarre unter diesem Gesichtspunkt.

3.1 Geschichte eines Gitarrentons von der Anregung bis zum Hörer

Beginnen wir mit dem Ereignis, bei dem zum ersten Mal vom Musiker Energie in das System „Gitarre“ zugeführt wird, dem Anregen der Saite. Dieser Vorgang geschieht meist durch Schlagen mit dem Plektrum oder Zupfen mit dem Fingernagel. Dabei wird die unter Spannung stehende Saite zunächst unter Aufwand von Kraft um eine bestimmte Strecke ausgelenkt. Erst mit dem Loslassen der Saite beginnt der Weg des Tons. Bezeichnend für Zupfinstrumente ist, dass dieses Ereignis auch den einzigen Moment darstellt, wo dem Ton Energie zugeführt wird. Jedes weitere Anschlagen gilt bereits als ein neuer Ton.

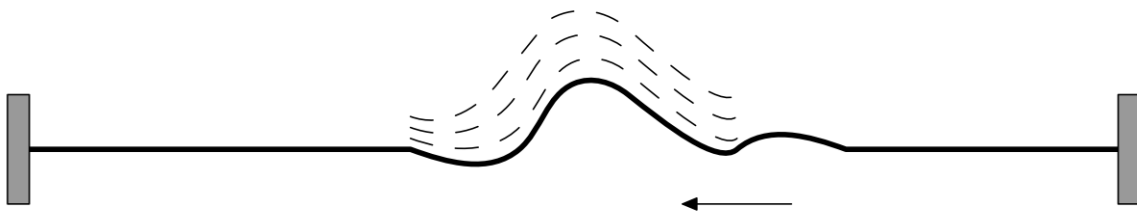


Abbildung 4 Ausbreitung einer Wanderwelle auf einer Saite, aus (French 2009)

Es folgt die Ausbreitung einer Wanderwelle auf der Saite, die sich vom Punkt der Anregung in beide Richtungen gleichermaßen ausbreitet und an deren Enden reflektiert wird. Nach einem kurzen Einschwingvorgang bestehend aus mehrfachem Hin- und Herwandern der Welle auf der Saite bilden sich stehende Wellen verschiedener Frequenzen aus, deren Wellenlänge jeweils im Verhältnis zur effektiven Länge der Saite steht.

Am Steg wird die Welle allerdings keineswegs vollständig reflektiert. Ein guter Teil der Energie fließt hierüber auf die Decke und darüber auf den Korpus der Gitarre, wo sich ebenfalls nach kurzem Einschwingvorgang stehende Wellen bilden, die die Resonanzfrequenzen des Korpus darstellen. Diese stehenden Wellen äußern sich vor allem auf der Decke die Form einer in eine Auf- und Ab-Bewegung, die es ihr zusammen mit der großen Oberfläche ermöglicht, effektiv Luft in Bewegung zu setzen und somit Energie in Form von Schall an die Umgebung abzustrahlen. Auch die Saiten tun dies bereits in kleinerem Maße, aber nur bei hohen Frequenzen. Wie man auch an Lautsprechern sehen kann, benötigt das Abstrahlen tieferer Frequenzen eine größere bewegte Fläche beziehungsweise ein größeres bewegtes Luftvolumen, und genau diese Funktion hat die Decke.

Während ein Teil ihres Schalls bereits unterwegs zum Hörer ist, strahlt die Decke genauso Energie ins Innere des Instrumentes ab wie nach außen. Im Korpus bilden sich dadurch weitere Resonanzen aus, bei denen Boden und Decke sowie das dazwischenliegende Luftvolumen aneinander gekoppelt sind. Der Schall dieser Frequenzen zusammen mit den anderen Klanganteilen, die im Korpus einige Male reflektiert worden sind, treten nun aus dem Schallloch aus und erreichen kurz darauf ebenfalls den Zuhörer.

Mittlerweile ist das ganze Instrument in Schwingung geraten, selbst am Kopf lassen sich die Schwingungen messen, wie die beliebten Clip-Stimmgeräte dort zeigen. Die Gitarre strahlt daher in alle Richtungen Schall ab, der sich natürlich in je nach Orientierung dadurch unterscheidet, von welchem Teil des Instruments er letztendlich ausging. All diese Klanganteile breiten sich im Raum aus und tragen zum diffusen Teil des Klanges bei, die den Ton besonders gegen Ende mit auszeichnen, wenn die Amplitude aller Frequenzen nach und nach exponentiell abnimmt, bis der Ton verstummt.

3.2 Nylon und Stahlsaiten

Das Herz der Klangerzeugung jedes Saiteninstrumentes ist die Anregung und Schwingung der Saite selbst. Die Saite speichert einen großen Teil der Schwingungsenergie, von der ein Teil selbst absorbiert wird, ein Teil direkt abgestrahlt wird und ein Teil über den Korpus weitergegeben wird. Nylon und Stahlsaiten unterscheiden sich vor allem in zwei Punkten: Zum einen haben schlicht die Materialien an sich einen unterschiedlichen Klang, so klingen Stahlsaiten „metallischer“ und obertonreicher, Nylonsaiten dagegen weicher und weniger hell.

Ein anderer großer Unterschied ist die übliche Saitenspannung. Während bei beiden Formen des Instrumentes unterschiedlich dicke Saiten zur Auswahl stehen, die entsprechend für die gleiche Tonhöhe unterschiedliche Zugspannungen benötigen, haben Stahlsaiten grundsätzlich eine etwa doppelt so hohe Spannung wie Nylonsaiten. Das erfordert einerseits eine etwas steifere Verstrebung der Gitarrendecke, andererseits wirkt es sich auf die Lautstärke aus: So wie beim Bogenschießen ein Bogen mit einer Spannung von 35 Pfund den Pfeil bei gleicher Auslenkung weiter schießt als ein 20 Pfund Bogen, so enthält auch eine Stahlsaite bei gleicher Auslenkung mehr Energie als eine Nylonsaite und erzeugt einen lautereren Klang. Tatsächlich war die höhere Lautstärke ein entscheidendes Kriterium bei der Entwicklung der Westerngitarre, da sich eine unverstärkte Nylongitarre in einer Gruppe nur sehr schwer durchsetzen kann.

Die Einheit „Pfund“, die auch bei der Angabe von Saitenstärken zu finden ist, ist streng genommen völlig falsch im Zusammenhang mit einer Zugkraft, und auch das Kilogramm ist nicht viel besser. Die korrekte Einheit für Kraft ist das Newton N, das nicht auf eine etwaige Schwerkraft angewiesen ist, um eine Spannung zu erzeugen. Schließlich ist bei Schwerelosigkeit die Aussage „die Saiten der Gitarre ziehen mit einem Gewicht von je 20 Pfund am Steg“ recht unsinnig, denn dort hat Masse kein Gewicht. Das mag kleinlich klingen, die Beliebtheit der Akustikgitarre reicht aber tatsächlich bis in die Schwerelosigkeit des Orbits hinein, wie der Astronaut Chris Hadfield mit seinem Cover von David Bowie's „Space Oddity“ zeigt, aufgenommen auf der Internationalen Raumstation (ISS) und damit der erste Fall einer Tonaufnahme einer Akustikgitarre im Weltraum. Trotzdem ist die mit Abstand häufigste Angabe für die Spannung einer Gitarrensaite deren entsprechendes Gewicht in Pfund, so dass man auf einer Packung neuer Saiten häufig das zugehörige Abkürzung „lb“ oder den Plural „lbs“ liest.

Ein weiterer bemerkenswerter Aspekt der Gitarrensaiten ist, dass die Leersaiten bei normaler Stimmung schon einen Tonumfang von zwei vollen Oktaven aufweisen – und das bei konstanter Mensur. Kein anderes Saiteninstrument treibt das Prinzip derart auf die Spitze, nur über die Dicke und Masse der Saiten einen so hohen Tonumfang bereitzustellen, und die Länge der Saite als Variable offen zu lassen. Dies ist der Grund dafür, dass die Bassseiten auch bei Nylonsaiten stets metallisch umspinnen sind, denn dadurch erhöht sich ihre Masse pro Längeneinheit deutlich und es kann bei moderatem Durchmesser eine niedrigere Grundfrequenz erreicht werden. Dass der übliche Tonumfang schon nah an der Grenze des Möglichen ist, sieht man an 12-saitigen Gitarren, die dank der oktavierten G-Saite nochmal drei Halbtöne draufsetzen. Die hohe g-Saite muss dadurch entweder so dünn sein oder so stark gespannt werden, um diesen Ton bei fester Mensur zu erreichen, dass sie sehr häufig reißt.

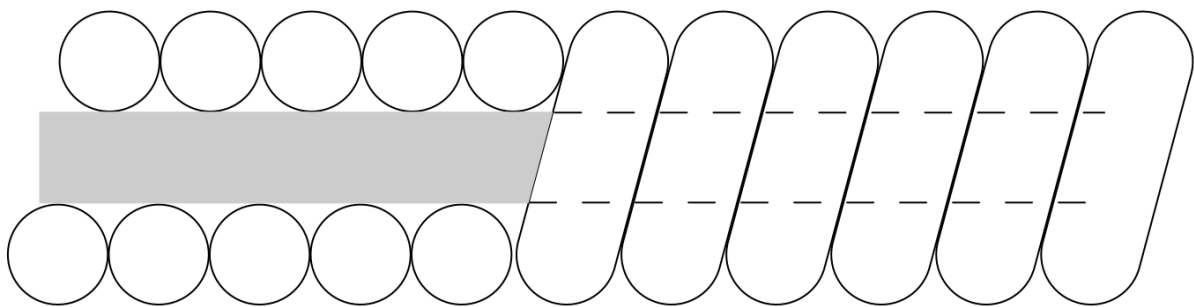


Abbildung 5 Aufbau einer unwickelten Gitarrensaite, aus (French 2009)

Auch bei Erweiterung des Tonumfangs im Bassbereich durch noch dickere Saiten und tiefere Stimmungen kommt man bald an einen Punkt, wo die Saite beginnt zu schnarren, da sie entweder zu dick ist oder zu locker aufgezogen ist. Trotzdem erfreuen sich auch Gitarren mit beispielsweise 8 Saiten und damit deutlich erweitertem Tonumfang durchaus einiger Beliebtheit besonders im E-Gitarren Segment, wo zumindest nicht auch noch zusätzlich der Korpus entsprechend dimensioniert werden muss.

3.3 Die Schwingungen der Gitarre im Detail

Die kritischste Stelle in der Übertragung von Schwingungen auf der Gitarre ist der Steg und die darin eingelassene Stegeinlage. Hier finden der Transfer der Schwingungen von der Saite zur Decke statt, ebenso wie in umgekehrter Richtung von Korpus zu Saite und die Kopplung zwischen den einzelnen Saiten untereinander. Dass die Schwingungen über den Steg prinzipiell stets in alle Richtungen übertragen werden können, kann man leicht demonstrieren:

Klopft man auf den Korpus, kann man daraufhin die Saiten leise nachschwingen hören. Zupft man nur eine der Saiten an und dämpft daraufhin auch nur sie wieder ab, kann man die anderen Saiten nachschwingen hören.

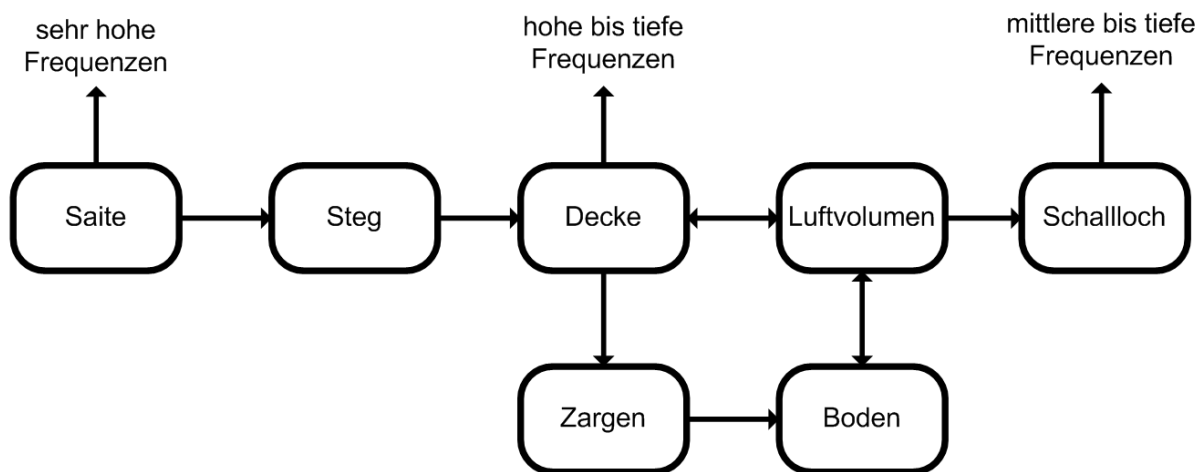


Abbildung 6 Modell der Gitarre und ihrer Schallabstrahlung

Betrachtet man die Gitarre als ein zusammenhängendes System, kann man sehen, dass unterschiedliche Bereiche unterschiedliche Teile des Klangspektrums an die Umgebung abstrahlen. Die Gitarre als Ganzes lässt sich grob in die Untersysteme Saite und Korpus einteilen, die über den Steg aneinander gekoppelt sind. Im Folgenden werden beide jeweils im Detail betrachtet.

3.3.1 Die Saite

Durch die gesamte Geschichte der Musik hindurch wurden schwingende Saiten zur Herstellung von Musikinstrumenten verwendet. Eine Saite ist besonders gut zur Erzeugung musikalischer Klänge geeignet, da sie die einzige einfache Struktur ist, deren Resonanzfrequenzen ganzzahlige Vielfache des Grundtones sind.

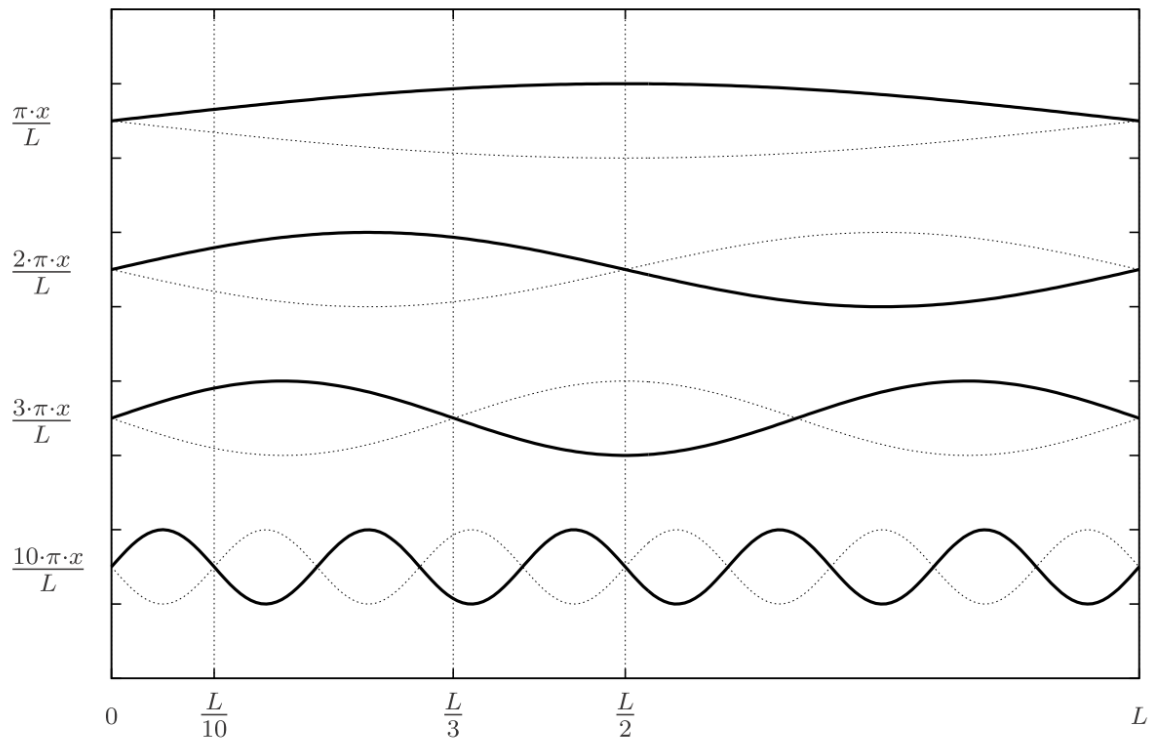


Abbildung 7 Stehende Wellen einer Saite, aus (French 2009)

Die Saite schwingt in zwei Polarisierungen, zum einen parallel und zum anderen senkrecht zur Decke. Letztere ist die Orientierung, in der Schwingungen hauptsächlich über den Steg an die Decke übertragen werden. Wenn eine Saite nur in der Ebene parallel zur Decke angespielt wird, kann der Ton trotzdem gehört werden, weil beim Schwingen die Spannung der Saite sich periodisch verändert, was ebenfalls als Kraftänderung auf den Steg einwirkt. Außerdem wird die jeweils andere Polarisierung durch wechselseitiges Koppeln mitangeregt. Der Klang kann sich aber dennoch unterscheiden, je nachdem in welchem Winkel zur Decke eine Saite angeschlagen wird. Zusätzlich nehmen die beiden Polarisierungen die Terminierung am Steg leicht unterschiedlich wahr, was zu kleinen Abweichungen der effektiven Saitenlänge jeder Schwingungsrichtung führt und dadurch leichte Schwebungen verursachen kann.

Da die Saite selbst nur eine kleine Oberfläche hat, ist sie nicht in der Lage eigenständig tiefe Frequenzen in der Luft anzuregen. Im hohen Frequenzbereich dagegen gelingt das durchaus. Wie hoch in etwa der Anteil des Direktschalls der Saiten am gesamten Klang ist kann man sich veranschaulichen, indem man eine Westerngitarre anschlägt, und daraufhin eine E-Gitarre ohne Verstärker gleich stark anspielt. Da bei dieser der Korpus sehr steif ist und nicht viel mitschwingt, können die Saiten praktisch isoliert gehört werden. Allerdings wird eine E-Gitarre einen längeren Sustain haben, da der Korpus den Saiten auch keine Energie entzieht. Während bei der E-Gitarre der Verstärker dem Abstrahlen aller Frequenzen auf die Sprünge hilft, trägt die Akustikgitarre diese Funktion in sich selbst:

3.3.2 Der Korpus

Der Korpus kann als akustischer Impedanzwandler zwischen der Saite und der Luft gesehen werden, der die Effektivität der Klangabstrahlung drastisch verbessert. Wie die meisten Strukturen in der Praxis, ist er ein Kompromiss aus sich gegenseitig widersprechenden Anforderungen. So muss die Decke zum Beispiel leicht genug sein, um effektiv schwingen zu können, aber stark genug um dem Zug der Saiten standzuhalten und die Stabilität der Struktur insgesamt zu gewährleisten. Die gängige Lösung besteht aus einer dünnen Decke aus sorgfältig ausgewähltem Tonholz, die von innen durch ein Muster aus dünnen Holzleisten, dem sogenannten „Bracing“, verstärkt ist. Dieses wird so sparsam wie möglich zum Einsatz gebracht, denn zu viel zusätzliche Masse an der Decke mindert die Effizienz der Schallabstrahlung (vgl. Lai et al. 1990).

Wie jede flexible Struktur hat auch der Korpus der Gitarre bestimmte Frequenzen, bei denen er besonders stark zu schwingen neigt. Gleichzeitig sind bestimmte Bereiche der Struktur bei unterschiedlichen Frequenzen stärker aktiv. Insbesondere niederfrequente Grundschwingungen sind eher auf den großflächigsten Bereichen anzutreffen, die zu der längeren Wellenlänge passen. Bei der Gitarre ist es zudem so, dass der schmalere Teil des Korpus deutlich steifer ist als der Rest der Decke, da der Hals darauf aufgeklebt ist, wodurch dieser Teil weniger stark schwingt.

Abgesehen davon, dass verschiedene Teile des Korpus mit verschiedenen Frequenzen schwingen, können spektrale Anteile an zwei Orten auch mit gleicher Frequenz und Amplitude, aber außer Phase zueinander schwingen. Je nach Hör- bzw. Mikrofonposition können sich diese Frequenzanteile daher durch Interferenz entweder gegenseitig verstärken oder auslöschen, wodurch sich ein sehr komplexes und schwer berechenbares dreidimensionales Klangbild ergibt.

Während die Resonanzfrequenzen von Strukturen zu hohen Frequenzen hin immer dichter beieinander liegen, lassen sich die tiefsten Eigenmoden oft noch einzeln benennen und aufzeigen. Die fundamentalste Eigenfrequenz im Fall der Gitarre kann aus ihrer Geometrie abgeleitet werden, denn als Klangkörper mit eingeschlossenem Luftvolumen kann sie als Helmholtzresonator betrachtet werden. Die Resonanzfrequenz hängt hier von den Abmessungen ab, insbesondere dem Gesamtvolumen und der Größe der Öffnung durch das Schallloch. Sie liegt bei klassischen Gitarren bei etwa 90 Hz.

Die nächst höheren Eigenmoden können auf der Decke der Gitarre sichtbar gemacht werden, in dem man diese mit Sägespänen oder Sand bestreut und den Korpus über einen Lautsprecher mit Sinustönen passender Frequenz anregt. Die Sandkörner werden überall durch die Schwingungen weggestoßen, bis sie sich schließlich exakt entlang des Verlaufs des Schwingungsknotens sammeln, der stets in Ruhe bleibt. Ein messtechnisch besseres Werkzeug ist das Laservibrometer, das auch quantitative Aussagen über beispielsweise die Amplitude der Schwingungen ermöglicht.

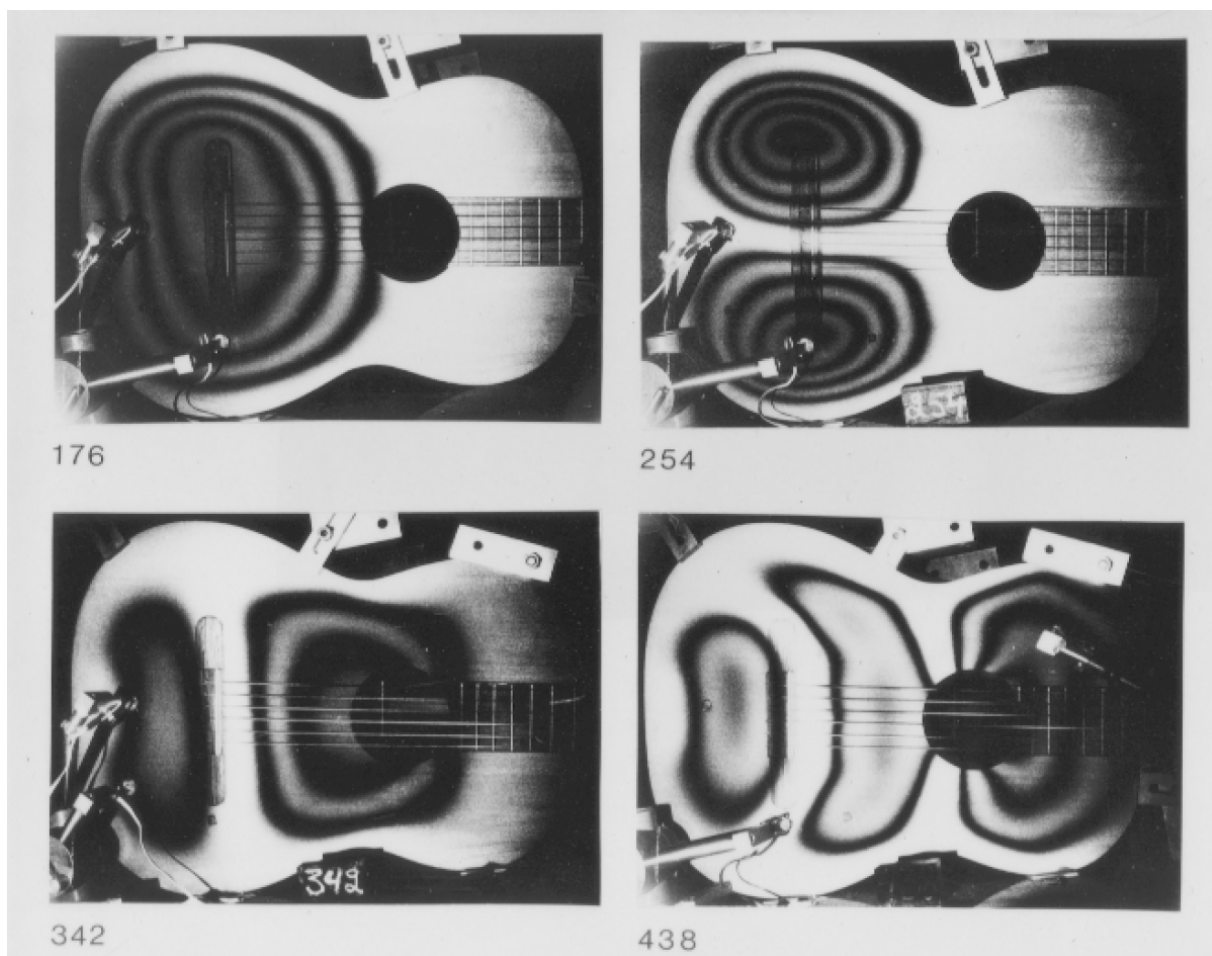


Abbildung 8 Die ersten vier Eigenmoden der klassischen Gitarre, aus (French 2009)

Wer kein Laservibrometer zur Hand hat, bekommt ein ungefähres Gefühl davon, wo die Gitarre wie stark schwingt, indem während der angeregten Schwingung mit dem Finger über das Instrument gefahren wird. In Abbildung 8 ist gut zu erkennen, dass gerade bei den tiefsten Eigenmoden vor allem die Region um den Steg herum angeregt wird, zu höheren Frequenzen hin schwingen dann immer mehr Bereiche der Decke mit.

4 Live-Mikrofonierung und Rückkopplungen

Akustische Rückkopplungen, aus dem englischsprachigen Raum auch als „Feedback“ bekannt, treten immer dann auf, wenn ein Signal aus einem Lautsprecher wieder vom selben Mikrofon aufgenommen wird, dessen Signal er wiedergibt. Unter Mikrofon kann dabei jede Form von Tonabnehmer verstanden werden, auch beispielsweise der magnetische Pickup einer E-Gitarre. Während hier manche Gitarristen ihr Instrument absichtlich vor den Verstärker halten, um mit dem entstehenden Sound zu experimentieren, sind Rückkopplungen in aller Regel unerwünscht und eines der größten Probleme, mit denen sich ein Toningenieur im Live-Betrieb konfrontiert sieht. Die dabei entstehenden Geräusche klingen häufig nach einem Brummen oder Pfeifen, das zu allem Überfluss auch noch immer lauter wird, da sich innerhalb der Rückkopplungsschleife das Signal von selbst verstärkt.

Wird nicht rechtzeitig eingegriffen, erkennen selbst die Laien im Publikum das verbreitete Phänomen als solches und gewinnen den Eindruck, dass „die Technik“ die Lage nicht im Griff hat. Da Feedback den Hörer nicht nur aus dem musikalischen Erlebnis herauswirft sondern auch zu Lautstärken anschwellen kann, die das Gehör schädigen können, ist es unbedingt zu vermeiden. Das Publikum sowie die Band werden dem Toningenieur viel eher verzeihen, dass der Sound hinter dem Ideal einer Studioaufnahme zurückbleibt, als mehrmals auftretende Rückkopplungen hinzunehmen.

4.1 Positionierung von Mikrofonen und Monitoren

Feedback wird extrem begünstigt, wenn ein Mikrofon sehr nah an einen Lautsprecher herangeführt wird und dabei mit der empfindlichen Seite in seine Richtung zeigt. Im Umkehrschluss empfiehlt es sich also alle Komponenten so auszurichten, dass die Mikrofone möglichst keine der Monitore wahrnehmen können, über die ihr Signal wiedergegeben wird. Dieses Grundprinzip sollte den meisten Tontechnikern bewusst sein, der Teufel liegt jedoch wie immer im Detail. Auch mit guter Kenntnis aller Richt- und Abstrahlcharakteristiken kann Feedback nie ganz ausgeschlossen werden, da ab einem

bestimmten Lautstärkepegel auch über indirekt reflektierten Schall eine Rückkopplungsschleife geschlossen werden kann. Bei welcher Frequenz und zwischen welchen Komponenten dies genau passieren wird, lässt sich leider weder zuverlässig berechnen oder vorhersagen. Es macht daher Sinn, beim Soundcheck absichtlich Feedback zu provozieren und sich den entsprechenden Lautstärkepegel als oberste Grenze für die Lautstärke der Veranstaltung zu merken. Ansonsten lassen sich Rückkopplungen zumindest teilweise durchgezielte Klangregelung verhindern:

4.2 Feedback Reduktion durch Klangregelung

Der beste Freund des Tontechnikers im Kampf gegen Rückkopplungen ist der stimbare Hochpassfilter. Dieser ist spätestens seit dem Siegeszug der Digitalmischpulte bei den meisten Modellen für jeden Kanal einzeln vorhanden. Der Nutzen davon, tiefe Frequenzen unterhalb des Tonumfang jedes Instrumentes herauszufiltern ist vielfältig: Zum einen werden niederfrequente Anteile von Griff- und Trittgeräusche unterdrückt, zum anderen kann ein Teil des Übersprechens tiefer Instrumente wie Bass und Basstrommel auf die Mikrofone der übrigen Instrumente herausgefiltert werden. Außerdem ist die Richtcharakteristik von Mikrofonen üblicherweise in gewissem Maß frequenzabhängig, wobei sie zu tiefen Frequenzen hin breiter wird. Ein Low-Cut kann also eine besser kontrollierte Richtwirkung des Mikrofons bewirken und so insbesondere niederfrequenten Rückkopplungen mit den Bühnenmonitoren vorbeugen.

Vom Feedback zwischen Mikrofon und Monitor her würde es ausreichen, diese Klangregelung nur auf den Monitorweg anzuwenden; da sie sich aber auf den Mix ebenfalls positiv auswirkt, wird sie meistens direkt im jeweiligen Kanal angewendet und zwar als allererstes direkt nachdem Mikrofonvorverstärker. Dadurch wird zudem das Risiko für indirektes niederfrequentes Feedback von der PA auf die Bühnenmikrofone begrenzt.

In den Monitorwegen kommen zur Vermeidung von Feedback häufig grafische Equalizer zum Einsatz. Früher noch teure Geräte im Rack Format sind sie heute Standard bei den Ausgängen vieler Digitalpulte. Beim Soundcheck findet dann ein Vorgang statt, der auch als „Einpfeifen“ bezeichnet wird. Dabei wird nach Aufbau aller Mikrofone absichtlich Feedback im Monitor provoziert, und das Frequenzband in dem die Rückkopplung auftritt daraufhin abgesenkt.

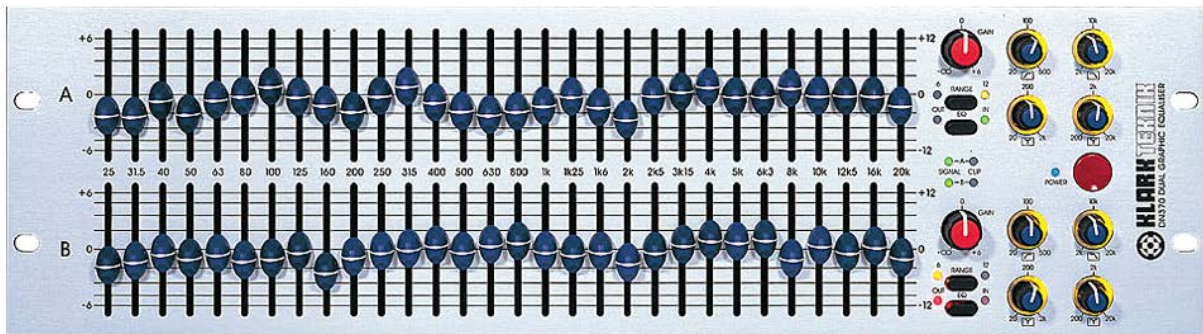


Abbildung 9 Grafischer EQ, aus [4]

Nach und nach lassen sich so die kritischsten Frequenzbänder eliminieren und die Lautstärke, die man ohne Feedbackgefahr erreichen kann, nimmt zu. Zu beachten ist dabei, dass der Klang des jeweiligen Monitors nicht so sehr verfremdet wird, dass er den Musiker irritiert. Natürlich macht es auch Sinn, den Monitor nur so laut wie nötig einzustellen. Wenn aber der Akustikgitarist einen Schlagzeuger im Rücken hat, wird er nun mal einige Verstärkung brauchen, um sich selbst überhaupt hören zu können.

4.3 Close Miking

4.3.1 Hintergrund

Prinzipiell empfiehlt sich bei einer Beschallung der Einsatz von Mikrofonen mit einer engen Richtcharakteristik von mindestens Niere. Bei Kugelmikrofonen ist Feedback praktisch garantiert; je nach der individuellen Anwendung und dem Lautstärkepegel sollten auch besonders enge Richtwirkungen wie Superniere in Betracht gezogen werden. Zudem werden Mikrofone in lauten Umgebungen gerne sehr nah an der Schallquelle platziert, oft im Abstand von nur wenigen Zentimetern. Möglich ist das nur bei Schallquellen, die sich nicht bewegen können, wie E-Gitarren Verstärkern oder einzelnen Trommeln des Schlagzeugs.

Ein Musiker müsste sich bei zu naher Mikrofonierung sehr in seiner Bewegungsfreiheit einschränken, damit es nicht sofort nicht zu klanglichen Veränderungen kommt, wenn das Instrument ein wenig gedreht wird. Um dieses Problem zu umgehen gibt es für viele Instrumente Ansteckmikrofone verschiedener Anbieter, bei denen eine kleine Mikrofonkapsel direkt über eine Klemme mit Schwanenhals an dem Instrument befestigt wird, so dass die Mikrofonposition gleich bleibt, selbst wenn sich der Musiker bewegt. Bei hoher Bühnenlautstärke, oder wenn man einfach auf Nummer sicher gehen möchte, wird man um „Close Miking“ nicht herumkommen, wenn die Akustikgitarre über keinen Tonabnehmer verfügt. Betrachten wir daher kurz, wie sich Abstand und Position eines Mikrofons auf den abgenommenen Klang auswirkt:

4.3.2 Klangliche Aspekte

Der wahrgenommene Klang eines Instrumentes hängt von dessen harmonischen Obertonspektrum ab sowie der relativen Lautstärke von Grundton und den verschiedenen Obertönen. Ein Instrument strahlt verschiedene Spektren mit unterschiedlicher Lautstärke in verschiedene Richtungen ab. Die Art, wie ein Instrument den Klang „in den Raum hinein wirft“ bezeichnet man als Projektion und sie unterscheidet sich stark zwischen verschiedenen Instrumententypen. Ein Instrument wie die Trompete strahlt wegen der hornartigen Bauform deutlich gerichteter als beispielsweise eine Querflöte oder eine Trommel. Auch zwischen identisch aussehenden Exemplaren desselben Instrumententyps können sich der Klang und die Projektion mitunter stark unterscheiden, anderenfalls gäbe es keinen Grund für die große Auswahl und die Preisunterschiede auf dem Markt. Eine Konsequenz des komplexen Abstrahlverhaltens jedes Instrumentes ist, dass der Klang maßgeblich von der Position des Zuhörers, beziehungsweise des Mikrofons abhängt.

Im Studio und unter idealen Bedingungen nimmt man Instrumente in der Regel in einem Abstand und mit einer Richtcharakteristik ab, die es dem Mikrofon erlaubt, das Instrument als Ganzes wahrzunehmen. Mit Erfahrung und Ausprobieren lässt sich so meist schnell ein Klang finden, der natürlich wirkt. Live hat man diesen Luxus wegen der Gefahr von Rückkopplungen und Übersprechen häufig nicht, wodurch es deutlich schwieriger wird, eine natürlich klingende Mikrofonposition zu finden. Einige Aspekte kommen dabei besonders zum Tragen:

Auch wenn ein Mikrofon angibt, einen sehr linearen Frequenzgang zu haben, ist dabei im Wesentlichen das Übertragungsverhalten entlang der Achse des Mikrofons gemeint. Beim Ansprechen des Mikrofons von der Seite kann es sein, dass es deutlich anders klingt als von vorne. Beim Close Miking tritt dies besonders zu tage, da ein großer Teil des Klangs seitlich auf das Mikrofon fällt, während bei größerem Abstand der Schall überwiegend von vorne kommt.

Es empfiehlt sich daher, ein Mikrofon einzusetzen, dessen Frequenzgang auch über verschiedene Ansprechwinkel möglichst konstant ist, also möglichst wenig außeraxiale Verfärbungen hat. Steht kein Mikrofon, das dieses Qualitätskriterium erfüllt zur Verfügung, ist es hilfreich, sich zumindest mit dem außeraxialen Übertragungsverhalten des gewählten Mikrofons vertraut zu machen.

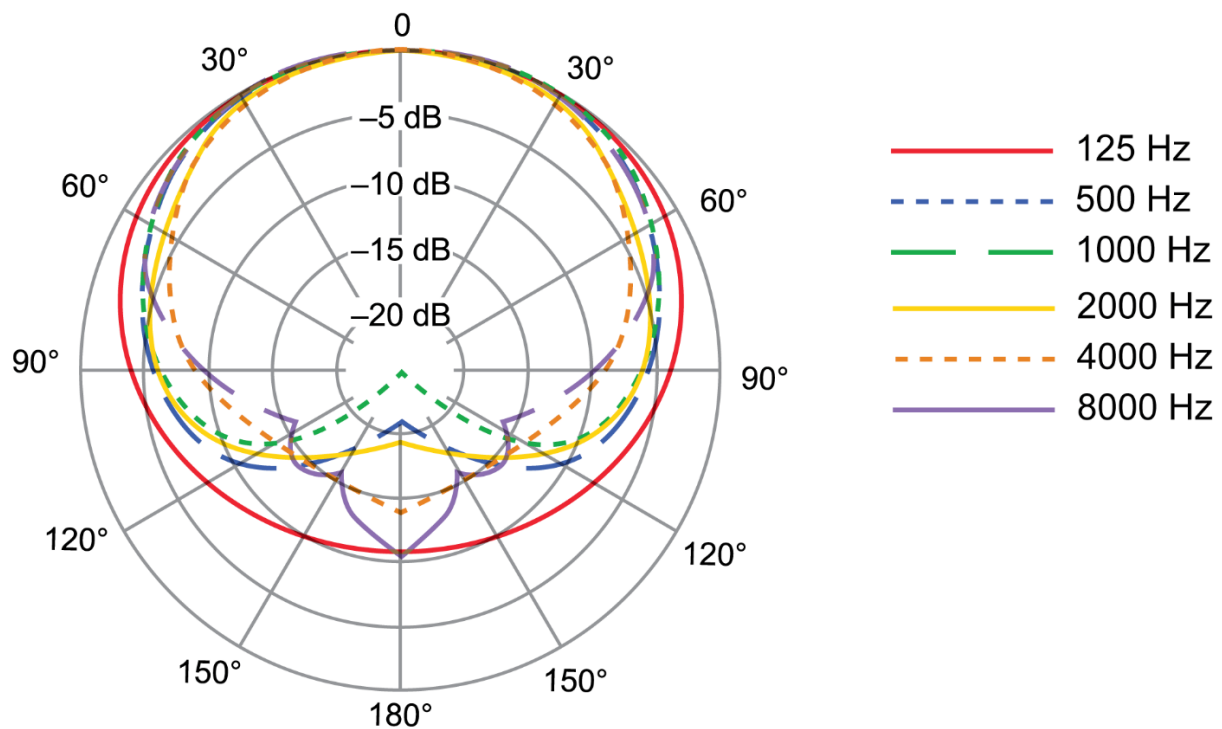


Abbildung 10 Frequenzabhängige Richtcharakteristik eines Mikrofons, aus [5]

Man kann versuchen, die durch nahe Mikrofonierung entstandene Veränderung der Klangfarbe mit Hilfe des Equalizers rückgängig zu machen. Dabei können selbstverständlich subjektive Verbesserungen erzielt werden, vollständig ausgleichen lässt sich die Mikrofonposition durch den EQ aber nicht. Ein Grund dafür ist, dass die Klangregelung immer das ganze Signal angreift, eine Trennung des seitlich einfallenden Schallanteils vom frontalen ist nicht möglich und damit auch keine Entzerrung, die gezielt nur den gewünschten Teil angreift.

Ein anderer Grund liegt darin, dass sich die richtungsabhängigen Klangspektren jedes Instrumentes von Note zu Note ändern. Sie setzen sich schließlich aus den harmonischen Obertönen zusammen, die vom jeweils gerade gespielten Grundton abhängen. Ein Equalizer dagegen kennt nur feste Frequenzbänder und kann daher nicht den Klang jeder Note unabhängig voneinander korrigieren. Außerdem ist es schlicht nicht möglich, Klanganteile überzeugend zu rekonstruieren, die gar nicht mit aufgenommen wurden. Wenn man ein Mikrofon von unten auf den Resonanzboden eines Konzertflügels richtet, wird einem der Direktschall der Saiten entgehen und beim Mikrofonieren einer Akustikgitarre hinter dem Steg verhält es sich entsprechend ähnlich.

4.3.3 Close Miking der Akustikgitarre

Für die Auswahl einer nahen Mikrofonposition ist es also wichtig zu wissen, welcher Teil des Instrumentes welchen Teil des Klangspektrums ausmacht und in welche Richtung dieser projiziert wird. Im Fall der Akustikgitarre können wir dafür die Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel anwenden. Zunächst aber macht es Sinn, die angestrebte Klangästhetik zu definieren:

Wenn eine nahe Mikrofonierung notwendig ist, befindet sich die Akustikgitarre offenbar in einer sehr lauten oder großen Gruppe mit hoher Bühnenlautstärke. Ein typisches Beispiel wäre eine Pop / Rock Band, die ein lautes Schlagzeug beinhaltet sowie Keyboard, E-Gitarre und Bass. In diesem Fall liegt das Ziel möglicherweise darin, die Gitarre gegenüber den anderen Instrumenten im Mix überhaupt hörbar zu machen und ihr charakteristischstes Merkmal, die impulsiven bzw. perkussiven Transienten beim Akkordspiel herauszuarbeiten oder das metallische Schimmern der Stahlsaiten. Der Fokus auf die Bass- und Mittenregion, die der Gitarre normalerweise zu ihrer dichten Klangfülle verhelfen, kann in diesem Fall durchaus unerwünscht sein, wenn diese Rollen schon von E-Bass und Keyboard ausgefüllt werden. Natürlich sind verschiedenste musikalische Kontexte denkbar – es gibt auch Musiker, die gerne Flamenco Gitarre in einer Metall Band spielen – der springende Punkt ist, dass die „richtige“ Mikrofonposition nicht nur vom jeweiligen Instrument und Mikrofon abhängt sondern auch von der Rolle der Gitarre im gesamten Arrangement.

Wenn wir uns also entscheiden, besonders den impulsiven und brillanten Teil des Akustikgitarrenklangs herauszuarbeiten und die Region vom Bass bis zu den unteren Mitten eher zu meiden, können einige Positionen bereits ausgeschlossen werden: Eine Platzierung direkt vor dem Schallloch führt zwar zu einem lauten Signal, das aber stark von den tiefen und mittigen Eigenschwingungen der Gitarre dominiert ist. Diese gehen von der Anregung des gesamten Korpus und darin enthaltenen Luftvolumen aus und treten daher besonders stark am Schallloch zu tage. Beim Mikrofonieren im Bereich des Stegs verhält es sich ähnlich, nur dass hier die niederfrequenten Eigenschwingungen auf der Decke der Gitarre besonders stark abgestrahlt werden.

In beiden Fällen wird das Problem der dominanten Bass- und Mittenregion noch zusätzlich vom Nahbesprechungseffekt verschärft, der bei gerichteten Mikrofonen in kurzem Abstand zur Schallquelle zu einer Bassanhebung führt.



Abbildung 11 Typische Mikrofonposition bei kurzer Entfernung, aus [6]

Als gute Ausgangsposition für ein Mikrofon erscheint daher der Übergang von Hals und Korpus am 12 bzw. 14 Bund der Gitarre. Diese Position wird auch bei größerem Abstand als recht ausgewogen wahrgenommen, durch die kürzere Distanz verlagert sich die Balance zu Gunsten des höherfrequenten Direktschalls der Saiten gegenüber der niederfrequenten Abstrahlung der unteren Hälfte des Korpus. Der Klang hat dort daher eine helle Klangfarbe und eine gute Wiedergabe der Transienten beim Anschlagen bzw. Zupfen der Saiten. Somit integriert er sich meist besser in den Mix als der volle, mitten-reiche Ton der zuvor betrachteten Mikrofonpositionen. Ausgehend von dieser Startposition lässt sich durch Verschieben oder Drehen des Mikrofons in Richtung des Schalllochs die Balance entsprechend verändern, bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht ist. Da besonders Transienten und hochfrequente Klanganteile gefragt sind, empfiehlt sich beispielsweise die Verwendung eines Kleinmembran-Kondensatormikrofons als Mikrofontyp.

4.4 Rückkopplungen bei Akustikgitarren

Grundsätzlich muss man Rückkopplungen nach ihrer Ursache unterscheiden. Die häufigste Art der Rückkopplung geschieht über eine Feedback-Schleife von Mikrofon und Monitor, oder im unglücklicheren Fall von Mikrofon und PA. In diesem Fall gibt es unabhängig vom verwendeten Instrument nur wenige Optionen, sofern die oben aufgeführten Strategien bereits alle berücksichtigt wurden. Letztendlich bleibt nur ein Absenken der Lautstärke des Instrumentes auf dem Bühnenmonitor und eventuell auch auf der PA. Es ist aber auch eine andere Ursache denkbar: Das Koppeln über das Instrument selbst und den darin integrierten Tonabnehmer.

Gut zu beobachten ist dieses Phänomen bei elektrischen Gitarren, die absichtlich vor den Verstärker gehalten werden, bis Rückkopplungen auftreten, die dann als besonderer Effekt der Klanggestaltung genutzt werden. Von diesem Beispiel können wir zwei Dinge lernen:

Zum einen muss man es bei einem Instrument ohne besonders schwingfähigen Korpus wie der E-Gitarre schon wirklich darauf anlegen, um direkt über die Saiten hörbare Rückkopplungen zu erzeugen, und das selbst bei sehr hoher Grundlautstärke auf der Bühne. Zum anderen sind die dabei hörbaren Rückkopplungen immer sehr hochfrequent, was sich dadurch erklären lässt, dass die schwingende Saite selbst überwiegend im hohen Frequenzbereich mit der Luft koppelt und wenig im Tieftonbereich. Kommt es also zu Rückkopplungen an der Akustikgitarre in Form von tieferem Brummen oder Dröhnen, liegt die Ursache auf der Hand: Der resonanzfreudige Korpus und seine Decke. Dieser wird nicht nur breitbandiger von außen angeregt als die Saite, sondern hat auch mehr Zeit sich zu Rückkopplungen aufzuschaukeln, da die Resonanzfrequenzen hier konstant bleiben, während sie sich auf der Saite mit jeder Note ändern.

Möglicherweise lassen sich mit dem grafischen Equalizer einige der Resonanzfrequenzen der Gitarre auf dem Bühnenmonitor absenken. Wenn es auf der Bühne aber schon so laut ist, dass die Decke der Gitarre von außen stark zum Schwingen angeregt wird, ist spätestens jetzt der Zeitpunkt gekommen, an dem man sich über ein anderes Tonabnahmeverfahren Gedanken machen muss: Der im Instrument integrierte Pickup.

5 Tonabnehmersysteme

Seit dem Beginn der Beschallungstechnik wurden stets neue Techniken gesucht und entwickelt, um die verschiedenen Instrumente zu verstärken, so dass sie auch bei großen Veranstaltungen für das gesamte Publikum gut hörbar sind. Mit Mikrofonen kann man dabei auch bei enger Richtcharakteristik schnell an die Grenze des Rückkoppelns geraten. Außerdem ist das Übersprechen sehr lauter Instrumente auf die Mikrofone der eher leisen Instrumente ein Problem.

Als erster Schritt zur Verstärkung der Akustikgitarre kann die Entwicklung der elektrischen Gitarre gesehen werden. Sie ist mit magnetischen Tonabnehmern ausgestattet und damit deutlich resistenter gegenüber Feedback und Übersprechen als eine mikrofonierte Akustikgitarre. Die vielseitigen Möglichkeiten, den Klang der E-Gitarre mit verschiedenen Verstärkern, Verzerrern und Effekten zu formen hat dabei ganz neue Klangwelten eröffnet, die einen prägenden Einfluss auf viele Musikgenres hinterlassen hat, insbesondere die Rockmusik. Tatsächlich ist ein typischer E-Gitarren Sound soweit vom Klang einer Akustikgitarre entfernt, dass man eher von einem neuen Instrument innerhalb der Familie der Zupfinstrumente sprechen muss als von einer verstärkten Akustikgitarre. Insofern stehen wir mit unserem Problem der Verstärkung einer Akustikgitarre praktisch wieder am Anfang.

Es wurde im Laufe der Zeit mit verschiedensten Systemen experimentiert, von denen sich verschiedene bewährt haben und als vorinstallierte oder nachrüstbare Optionen auf dem Markt angeboten werden. Während praktisch alle E-Gitarren Tonabnehmer magnetische Pickups sind, gibt es bei den Akustikgitarren eine Vielzahl verschiedener Tonabnehmer und Kombinationen mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen, die im Folgenden im Detail vorgestellt werden.

5.1 Under-Saddle Transducer

Der mit Abstand häufigste Pickup-Typ bei Akustikgitarren ist der sogenannte „under-saddle Transducer“ (UST), also ein Schallwandler, der zwischen der Stegeinlage und dem Steg platziert ist. Häufig handelt es sich dabei um ein piezoelektrisches Element, weshalb er im Deutschen wie im Englischen manchmal auch schlicht „Piezo“ genannt wird.

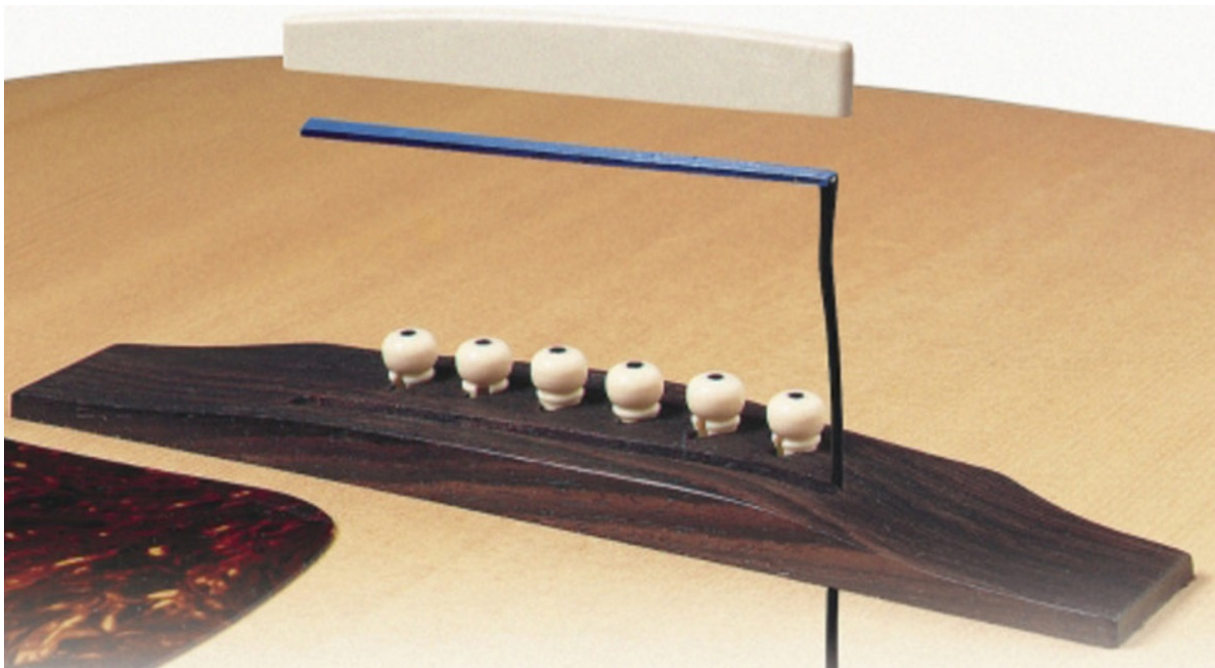


Abbildung 12 Position eines under-saddle Transducers, aus [7]

Ein solcher Transducer hat in der Regel dieselbe Länge wie die Stegeinlage und wird über ein Kabel durch ein kleines Loch am Ende des Stegs mit der Elektronik im inneren der Gitarre verbunden. Er besteht allgemein betrachtet aus einem elektromechanischen Schallwandler, verschiedenen Schichten dielektrischen Materials und leitfähiger Elektroden und im Idealfall einer Abschirmung gegen elektromagnetische Störeinflüsse.

Bei der genauen Umsetzung dieses Prinzip gibt es wiederum viele unterschiedliche Varianten, z.B. solche mit einem durchgehendem Wandler-Element oder einzelnen Segmenten für jede Saite, oder Varianten in denen der Tonabnehmer vollständig in die Stegeinlage integriert ist, anstatt sich darunter zu befinden. Im folgenden wird auf die verschiedenen Techniken und Systeme jeweils einzeln eingegangen. Trotzdem lassen sich schon vorher einige Gemeinsamkeiten und allgemeine Aussagen festhalten:

Aufgrund seiner Position unter der Stegeinlage reagiert der Transducer vor allem auf die dynamische Druckänderung zwischen Steg und Korpus, die wiederum durch das Schwingen der Saiten verursacht wird. Die Schwingungen des Korpus dagegen werden verhältnismäßig nur sehr schwach wahrgenommen. Entsprechend eignet sich keines dieser Systeme wirklich gut dazu beispielsweise Perkussion auf dem Korpus wiederzugeben. Dass das Resonanzverhalten des Korpus weitestgehend ignoriert wird ist der Grund, warum man dem „Piezo“ einen eher unnatürlichen Klang nachsagt. Gleichzeitig führt diese Eigenschaft aber auch zu einer überragend niedrigen Feedback-Anfälligkeit. Wenn der Pickup die Schwingungen des Korpus ohnehin kaum wahrnimmt, bleibt er auch davon unbeeindruckt, wenn dieser extern durch die PA oder laute Bühnenmonitore zum Schwingen angeregt wird.

Under-saddle Transducer sind häufig passive Komponenten, die nur einen recht niedrigen Signalpegel ausgeben. Sie werden daher meist in Kombination mit einem Verstärker in der Gitarre verbaut, der mit einem 9V-Block betrieben wird und eine mehr oder weniger ausgefeilte Klangregelung besitzt. Auf Vorverstärker wird an späterer Stelle noch ausführlich eingegangen.

5.1.1 Piezokeramische Wandler

Eines der ersten Materialien, das sich durch die Fähigkeit Druckänderungen in elektrische Signale umzuwandeln bemerkbar gemacht hat, ist der piezoelektrische Kristall. Ein piezoelektrischer Kristall setzt Ladungsträger frei, wenn er mechanischem Druck ausgesetzt wird, die als Spannung abgegriffen werden können. Wird umgekehrt eine elektrische Spannung an ihn angelegt, verformt er sich. Die Anwendungen für diesen piezoelektrischen Effekt sind vielfältig, so verwenden beispielsweise Quarz-Uhren als Taktgeber einen kleinen piezoelektrischen Kristall, der elektrisch angeregt wird und bei einer bestimmten Resonanzfrequenz schwingt, die sehr stabil ist. Der piezoelektrische Effekt tritt an verschiedenen Materialien auf, heute wird zur Herstellung von Tonabnehmern oft Barium-Titanat oder Blei-Zirkonat-Titanat verwendet.

Will man eine Piezokeramik herstellen, werden viele tausend der mikroskopisch kleinen Einzelkristalle benötigt. Diese werden mit anderen synthetischen Materialien in Pulverform zusammen gemischt und hoch erhitzt. Dabei wird die entstehende Keramik einem starken elektrischen Feld mit hoher Gleichspannung ausgesetzt. Dadurch wird die Mehrheit der Dipole der Einzelkristalle gleich ausgerichtet, wodurch die Struktur insgesamt eine einheitliche Polarität erhält. Diese Polarisierung findet in derselben Richtung statt, in die später die Druckänderung gemessen werden soll. Eine Piezokeramik zur Verwendung als under-saddle Transducer wird also senkrecht zu der Ebene, in der er später im Steg der Gitarre liegt polarisiert. An den beiden Flächen der sich gegenüberliegenden Pole werden jeweils elektrisch leitfähige Elektroden angebracht, die die in den einzelnen Kristallen entstehende Ladungsänderung abgreifen und eine Anbindung an ein Kabel ermöglichen.

Da es sich um eine Keramik handelt, erhält man eine insgesamt sehr steife, unflexible Struktur mit einer Dicke von mindestens etwa einem halben Millimeter. Beim Einbau eines solchen Pickups muss daher die Stegeinlage abgefeilt werden, wenn die Saitenlage gleich bleiben soll. Dabei ist entscheidend, dass so präzise wie möglich gearbeitet wird. Über die Stegeinlage und den Steg erfolgt die mechanische Übertragung der Schwingungen von den Saiten an den Korpus der Gitarre. Diese Stelle ist daher enorm wichtig für das Zustandekommen eines Tons auf dem Instrument und bei auch nur minimal unsauberer Verarbeitung kann sowohl der verstärkte als auch der unverstärkte Klang der Gitarre in Mitleidenschaft gezogen werden. Kontaktmikrofone und mechanische Kopplungen haben schließlich die Eigenschaft, nur bei direktem Aufliegen an einem schwingenden Körper dessen Schwingungen zu übertragen; bereits der kleinste Luftspalt macht das Prinzip zunichte. Im Fall der Gitarre heißt das, dass schon eine kleine Lücke an nur einer Stelle zwischen Stegeinlage und Transducer dazu führen kann, dass zum einen die darüber liegende Saite weniger gut von dem Pickup wahrgenommen wird als die anderen Saiten, und zum anderen auch weniger gut an den Korpus gekoppelt ist als zuvor.

Wer einen solchen Tonabnehmer im Nachhinein in sein Instrument integrieren möchte ist daher gut beraten, den Einbau von einem Fachmann durchführen zu lassen und danach mit Kopfhörern probenzuhören, ob die Balance zwischen den einzelnen Saiten stimmt. Ein guter Trick dabei ist es, gleichzeitig ein Mikrofon vor die Gitarre zu stellen und beispielsweise voll auf den linken Kanal zu pannen, den Pickup ganz nach rechts. Wenn die verschiedenen Saiten nun im Stereobild an stark unterschiedlichen Positionen zu sein scheinen, ist dies ein Zeichen für eine schlechte Balance, die sich auch durch Klangregelung nicht beheben lassen wird. Da die Stegeinlage in diesem Fall nicht überall gleich gut auf dem Pickup aufliegt, ist es außerdem möglich, dass der unverstärkte Klang des Instruments in Mitleidenschaft gezogen wurde. Es empfiehlt sich dann, die Stegeinlage solange nachzuschleifen, bis das Ergebnis

zufriedenstellend ist. Der Autor kann aus eigener Erfahrung bestätigen, dass dieses Problem beim Nachrüsten piezokeramischer Tonabnehmer unter der Stegeinlage tatsächlich in der Praxis auftreten kann und auch die Veränderung des unverstärkten Klangs hörbar ist. Eigene Messungen haben ergeben, dass sich die Lautstärke der einzelnen Saiten zueinander gegenüber der von einem Mikrofon wahrgenommenen Balance um über 6 dB unterscheiden kann (vgl. Anhang 1).

Wie viele Wandler funktioniert das Wirkprinzip von Piezokeramiken in beide Richtungen, sie sind daher sowohl für Anwendungen als Sensor geeignet als auch als Hochtön Lautsprecher oder zumindest Pieper in PCs oder kleinen Alarmen.

5.1.2 Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Mit der Zeit wurden neue synthetische Transducer-Materialien entwickelt, die meist deutlich elastischer sind als eine Piezokeramik. Eines dieser Materialien ist Polyvinylidenfluorid (PVDF). Weiche bzw. elastische Materialien haben den Vorteil, dass praktisch keine Luftspalte zwischen dem Material und der Fläche, gegen die es gedrückt wird, bestehen können. Die oben beschriebene Balanceproblematik wird daher drastisch reduziert. Nachteilig ist allerdings, dass elastische Materialien unter Druckänderung mehr nachgeben und dadurch prinzipiell eher eine dämpfende Wirkung auf die Übertragung von Schwingungen haben als steife Materialien. In der Praxis macht sich diese Dämpfung aber deutlich weniger bemerkbar als z.B. eine ungleichmäßige Balance der verschiedenen Saiten.

PVDF ist ein langkettiger Halbkristall, er ist leicht und flexibel und robust gegenüber Feuchtigkeit und Staub. Bei der Herstellung wird PVDF in eine Achse gestreckt und dabei unter hoher Temperatur polarisiert. Dabei richten sich im Material enthaltene elementare Dipole entsprechend der Richtung des anliegenden Feldes aus. Ähnlich wie bei allen anderen Systemen auch werden darauf hin beide Seiten der entstandenen Folie metallbeschichtet und man erhält eine Struktur, die mechanischen Druck in elektrische Spannung wandelt. Im Vergleich mit Piezokeramiken überzeugt PVDF mit einer höheren Bandbreite.

Da PVDF in dünnen und flexiblen Folien produziert werden kann, eignet es sich sowohl zur Verwendung als flacher Pickup als auch als Material zur Umwicklung koaxialer Tonabnehmer, auf die später noch detailliert eingegangen wird.

5.1.3 Elektret Film

Schon vor über hundert Jahren erkannte man, dass es für viele Anwendungen nützlich wäre, ein Material mit einem statischen elektrischen Feld zur Verfügung zu haben, das auch ohne Energie- oder Spannungszufuhr erhalten bleibt. Für solche Materialien wurde die Bezeichnung Elektret eingeführt, da sie praktisch das elektrostatische Pendant zu einem Permanentmagnet darstellen. Sie ermöglichen beispielsweise, ein Kondensatormikrofon ohne externe Phantomspannung zu betreiben, indem entweder die schwingfähige Membran oder deren Gegenelektrode aus einem Elektret Material bestehen. Das statische elektrische Feld, das vom Elektret ausgeht, erfüllt die gleiche Funktion wie sonst die Phantomspeisung und ermöglicht, dass bei Anregung der Membran die Änderung der Kapazität durch die permanente Ladung eine messbare Änderung der Spannung erzeugt.

Solche als Elektret-Mikrofone bezeichneten Geräte sind vor allem bei mobilen Anwendungen sehr beliebt, da sie kompakt und billig herzustellen sind und eine gute Signalqualität aufweisen, ohne eine Vorspannung zu benötigen. Dank des Einsatzes in Mobiltelefonen, Headsets und vielem mehr bilden Elektret-Mikrofone nach Stückzahlen 90% des gesamten Marktanteils bei Mikrofonen weltweit.

Zur Herstellung von Elektret Film wird ein isolierendes Polymer wie beispielsweise Teflon verwendet, auf das bei hoher Temperatur Elektronen als zusätzliche Ladungsträger geschossen werden. Nach dem Abkühlen bleiben diese Ladungsträger praktisch im Material „eingefroren“, wodurch sich ein dauerhafter Potentialunterschied gegenüber der Erde oder einem anderen Bezugspotential ergibt.

In der Audiotechnik kann Elektret Film verwendet werden, um sehr kompakte und stromsparende Kondensatormikrofone herzustellen, was sie für Lavaliermikrofone an Funkstrecken oder batteriebetriebene Instrumentenmikrofone interessant macht. Wegen des schlechten Rufs der Elektret Technik in ihren Anfängen – die ersten Elektrete haben nach einiger Zeit ihre Ladung und damit ihre Funktionsfähigkeit verloren – vermeiden allerdings viele Hersteller diese Bezeichnung und sprechen lieber von „vorpolarisierten Kondensatormikrofonen“.

Andere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich durch das Beschichten von nachgiebigen Strukturen wie ETMF zur Herstellung von Kontaktmikrofonen und Transducern verschiedener Form.

5.1.4 Elektrothermomechanischer Film (ETMF)

Elektrothermomechanischer Film (ETMF) besteht einfach aus Kunststoffen wie Polypropylen oder Polyethylen. Bei der Herstellung werden flache Luft- oder Gasblasen in das Material eingebracht, die etwa das halbe Gesamtvolumen ausmachen. Da sich die Gasblasen recht gut komprimieren lassen, ist das entstandene Material insgesamt sehr dehnbar bzw. nachgiebig.

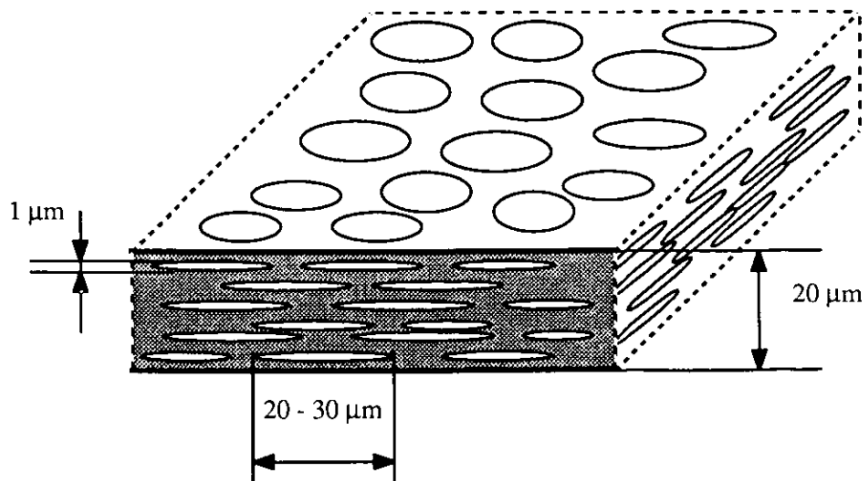


Abbildung 13 Grundstruktur von ETMF, aus (Backman 1990)

ETMF ist selbst nicht piezoelektrisch, erzeugt also selbstständig keine elektrische Spannung. Vielmehr ähnelt das Wirkprinzip dem eines Kondensatormikrofons: Unter dynamischen Druckänderungen ändert sich die Dicke des Materials. Werden die Oberflächen leitfähig beschichtet oder anderweitig mit Elektroden versehen, erhält man einen Kondensator, dessen Kapazität sich abhängig vom gerade anliegenden Druck verändert. Um diese Änderung der Kapazität auswerten zu können wird entweder eine Phantomspannung benötigt oder ein Material mit einer permanenten Vorspannung, wie beispielsweise ein Elektret-Material. Sobald nun eine Vorspannung zwischen den beiden Elektroden anliegt, bewirkt die druckabhängige Änderung der Kapazität eine Spannungsänderung, aus der das akustische Signal hervorgeht.

Unter dem Markennamen EMFi (kurz für **E**lektro **M**echanischer **F**ilm) von B-Band wurde ein Produkt entwickelt, das die Elektret Eigenschaften in das Polymer integriert: Dabei werden Ladungsträger im Polymer eingeschlossen, sodass der Film eine konstante Ladung besitzt. Ändert sich durch Druckänderungen nun sein Volumen, ändert sich auch seine Kapazität und dadurch die Spannung.

5.1.5 Koaxiale Transducer

Ein koaxialer Transducer setzt auf die gleichen technischen Wirkprinzipien wie die oben genannten Übertrager, nur eben in koaxialer statt ebener Ausführung.

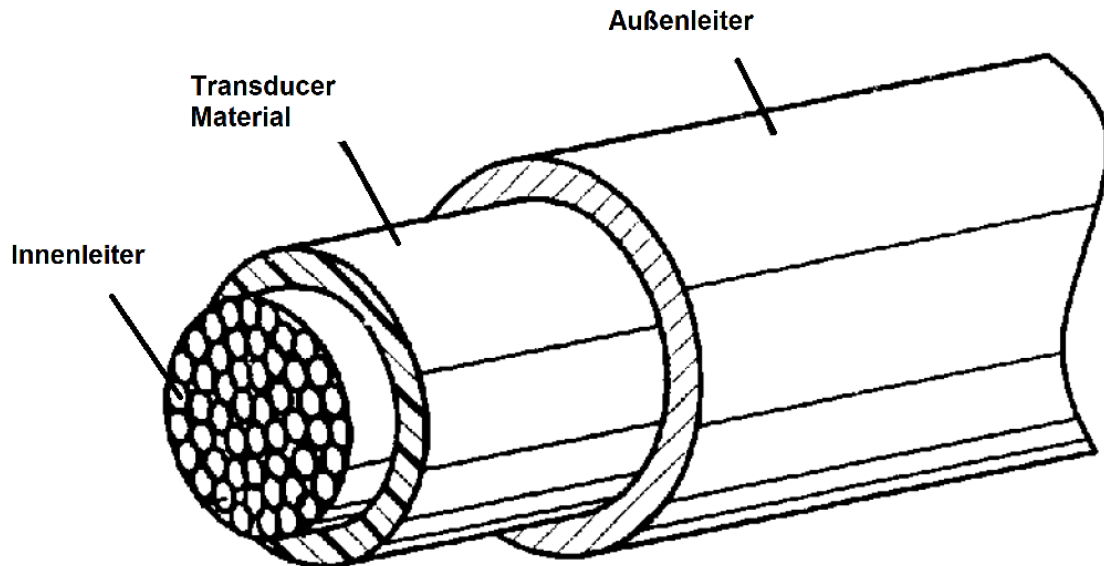


Abbildung 14 Struktur eines koaxialen Transducers, aus (Fishman 2004)

Der koaxiale Transducer hat in der Mitte einen Leiter aus Draht oder Drahtgeflecht, um den ein elektromechanischer Film wie PVDF oder Electret Film angebracht wird, so dass der eine Pol nach innen zeigt und der andere radial nach außen. Es kann entweder ein vorher polarisiertes Material verwendet werden oder eines, das erst während der Herstellung des Transducers seine Polarität erhält. Die äußere Schicht bildet wieder ein Leiter als zweite Elektrode, die im einfachsten Fall aus einer elektrisch leitfähigen Farbe besteht, aus Folie oder aus einem Drahtgeflecht. Letzteres hat den Vorteil, dass es auch einen gewissen mechanischen Schutz bietet und sich relativ einfach eine Litze herauslösen lässt, an die das Signalkabel angelötet werden kann.

Durch seine Grundstruktur hat ein koaxialer Transducer eine gewisse Flexibilität, ohne dass dabei ein besonders nachgiebiges und damit potentiell dämpfendes Material verwendet werden muss. Ein Nachteil besteht darin, dass beim Nachrüsten eines solchen Transducers mit einem kreisrunden Querschnitt manchmal eine entsprechende Ausfräsung in der Nut der Stegeinlage notwendig ist, die nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Alternativ sind aber auch ovale oder andere Querschnitte denkbar, die diesen Arbeitsschritt ersparen und praktisch wie plattgedrückt unter der Stegeinlage liegen.

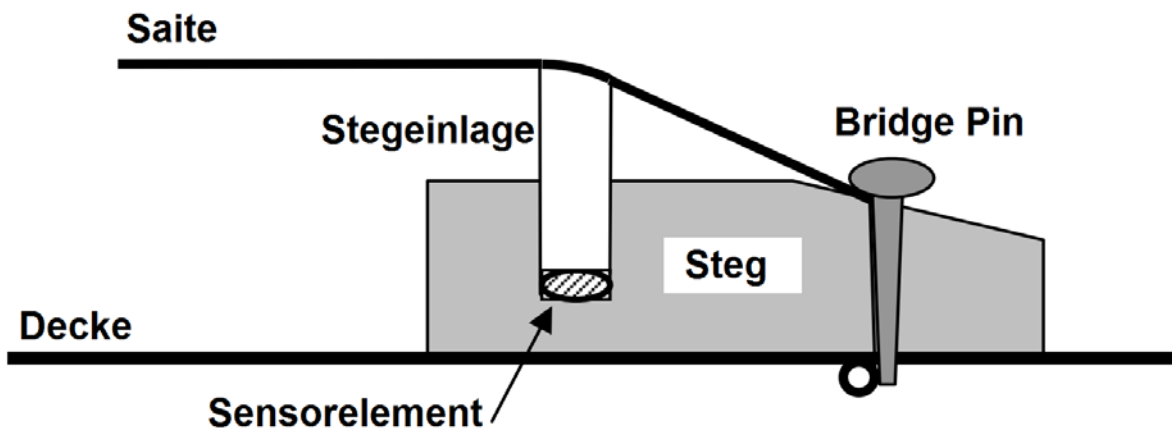


Abbildung 15 Querschnitt des Stegs mit ovalem Transducer, aus (French 2009)

5.1.6 Individuelle Segmente

In seltenen Fällen findet man bei Akustikgitarren einen Steg, in dem jede Saite eine eigene Stegeinlage mit je einem individuellen Tonabnehmer besitzt. Die dadurch gewonnenen separaten Signale können auf verschiedene Weise genutzt werden: Im einfachsten Fall werden sie im Vorverstärker zusammengemischt um die perfekte Balance oder eine bestimmte Klangvorstellung zu erreichen. Möglich sind auch das Pannen jeder einzelnen Saite im Stereobild und die Ausgabe des Signals über eine Stereoklinkenbuchse. Dadurch ergibt sich ein interessantes Klangbild, das nicht ohne weiteres mit einem anderen Tonabnahmeverfahren imitiert werden kann.

Eine dritte Option besteht darin, alle Kanäle einzeln mit einem speziellen Stecker an ein passendes Interface zu übertragen, das mit Hilfe von Software eine Umwandlung der einzelnen Signale in Midi-Notation oder Gitarren-Tabulatur ermöglicht. Bei dieser Anwendung ist die Signaltrennung zwischen den einzelnen Saiten gegenüber einer Monoaufnahme enorm hilfreich. Ein solches System ist vor allem für Musiker interessant, die viel als Komponisten tätig sind oder ihr Gitarrenspiel um Synthesizer-Sounds und -Techniken erweitern möchten.

Der eigene Klang eines Instruments wird durch die Wahl eines solchen Tonabnehmersystems durchaus verändert. Im Normalfall regt jede gespielte Saite in gewissem Maße auch die anderen Saiten zum Mitschwingen der entsprechenden Obertöne an. Die Kopplung erfolgt dabei sowohl über die durchgehende Stegeinlage als auch über den Korpus. Bei einer in einzelne Segmente aufgeteilten Stegeinlage ist dieses Mitschwingen reduziert, und der Gesamtklang enthält weniger harmonische Schwebungen von gegenseitig koppelnden Obertönen mit leicht unterschiedlichen Frequenzen. Ein Akkord wird also

möglicherweise nicht so sehr „schimmern“, wie es bei einem Instrument mit durchgehender Stegeinlage der Fall ist. Wie drastisch dieser Effekt ist und ob er gegenüber den obigen Vorteilen ins Gewicht fällt, ist natürlich eine andere Frage, die individuell beantwortet werden muss. Zumindest ist das Phänomen der gegenseitig koppelnden Saiten und harmonischen Schwebungen wichtig genug, dass ihm beim physikalischen Modellieren von Instrumenten Beachtung geschenkt wird (vgl. Karjalainen 1993).

5.1.7 Vergleich verschiedener under-saddle Transducer

Versuche, die klanglichen Eigenschaften der verschiedenen Transducer anhand von objektiv messbaren Kriterien zu vergleichen, gibt es nur wenige. Zumindest die klanglichen Unterschiede von Elektret Film und piezoelektrischen under-saddle Transducern wurden von (Tikander 2006) untersucht. Es stellte sich unter anderem heraus, dass der piezoelektrische Pickup sich durch eine etwas stärkere Basswiedergabe bemerkbar macht. Viel interessanter ist allerdings die Beobachtung, dass die Übertragungsfunktion beider Tonabnehmer von verschiedenen Faktoren abhängt.

So spielen sowohl die Saitenspannung, mit der die Stegeinlage auf den Tonabnehmer gedrückt wird eine Rolle als auch die Stärke des Transienten, mit dem das System angeregt wird. Wenn also sowohl die gewählte Saitenspannung als auch die Lautstärke, mit der gespielt wird zu Unterschieden im Übertragungsverhalten des Pickups führen können wird klar, dass ein objektiver Sieger im klanglichen Vergleich aller Systeme nicht abzusehen ist. Konzentrieren wir uns daher auf die Aussagen, die sich aus den physikalischen und technischen Eigenschaften der verschiedenen Transducer selbst ableiten lassen.

Beim Einbau unflexibler Transducer wie piezokeramischen Pickups können kleine Luftspalte auftreten, die zu unerwünschten klanglichen Veränderungen sowohl der verstärkten als auch der unverstärkten Gitarre führen. Diesem Risiko steht kein großer Vorteil entgegen, so dass der Autor eher den Einsatz flexibler Transducer-Materialien empfiehlt. Das Sortiment der Pickup Hersteller über den Zeitverlauf scheint sich ebenfalls in Richtung zu neuartigen, eher dünnen und flexiblen Materialien zu bewegen.

Die Marketingabteilungen schlagen dabei allerdings gerne auch etwas über die Stränge: So gibt es beispielsweise Behauptungen, der eine under-saddle Pickup würde natürlicher klingen als andere, weil er in allen drei Dimensionen empfindlich ist und damit auch die Schwingungen der Decke wahrnehmen könne. Während ersteres stimmen mag, ist die Schlussfolgerung weit übertrieben. Schließlich schwingt die Decke an der Position des Steges vor allem senkrecht zu ihrer Ebene, da dies ihr vorherrschender Freiheitsgrad ist und

in dieser Richtung auch die Anregung über den Steg erfolgt. An dieser Position wird daher jeder denkbare Transducer eine Anregung erfahren, bei der das komplexe Schwingverhalten der Decke praktisch vernachlässigbar schwach wahrgenommen wird im Vergleich mit der Druckänderung durch das dynamische Schwingen der Saite.

Andere sagen aus, dass ihr Pickup die bessere mechanische Impedanz-Anpassung an Holz hat. Dabei vergessen sie scheinbar, dass im Steg ohnehin eine Kopplung von sehr elastischen Saiten über eine sehr harte Stegeinlage an unterschiedliche Hölzer stattfindet. Ob ein Transducer dabei von seinen mechanischen Eigenschaften her eher dem Steg ähnelt oder dem Holz ist letztendlich nebensächlich, da er in beiden Fällen die Druckänderung zwischen den beiden Materialien wahrnimmt. Und der schöne „holzige“ Klang der Decke mit allen Resonanzen wird ihm auch bei der bestangepassten Impedanz größtenteils entgehen, schlicht weil an seiner Position das über die Saiten übertragene Signal die Balance dominiert. Gleiches gilt für die Behauptung, dass Elektret Film Transducer vom typischen „Piezo-Sound“ aller under-saddle Transducer verschont bleiben würden, nur weil ihr Wirkprinzip mehr Ähnlichkeit mit einem Kondensatormikrofon aufweist als mit dem piezoelektrischen Effekt.

Zusammenfassend wird nochmals betont, dass alle under-saddle Transducer unabhängig vom Material die Eigenschaft haben, wenig vom natürlichen Klang der Decke wahrzunehmen. Der Klang ist meistens stark mittenbetont und zeichnet sich durch einen stark betonten Attack mit vergleichsweise schwachen Sustain aus, was ihm in manchen Kreisen die Bezeichnung „Piezo Quack“ eingebracht hat. Trotzdem stellen sie die mit Abstand gebräuchlichste Form des Akustikgitarren Pickups dar, da sie kaum anfällig für Feedback sind, was sie live ab einer bestimmten Lautstärke praktisch zur einzigen Option macht.

Manche Hersteller haben übrigens aus der Not eine Tugend gemacht und Instrumente mit Tonabnehmern entwickelt, die sich die gut schwingende Decke und den großen Korpus einfach sparen oder drastisch einschränken. Ein gutes Beispiel dafür ist die Bass-Ukulele. Der Korpus ist hier viel zu klein, um unverstärkt eine überzeugende Basswiedergabe zu erlauben. Verwendet man sie aber mit dem eingebauten Tonabnehmer und einem Verstärker wird der Korpus ohnehin praktisch ignoriert, und die tiefen Töne der dicken Gummisaiten kommen direkt zur Geltung.

Ein anderes Beispiel ist die „Silent Guitar“ von Yamaha, die sich praktisch den ganzen Korpus spart und für Musiker interessant ist, die gerne in der Nacht üben möchten, ohne die Nachbarn zu stören. Der eingebaute Pickup kann über Kopfhörer abgehört werden und auf der Bühne verstärkt werden, wobei der Klang vergleichbar ist mit dem einer kompletten

Gitarre, die auf gleiche Weise verstärkt wird. Nur der Sustain wird bei der Silent Guitar ähnlich wie bei der E-Gitarre länger sein. Ansonsten führt dieses Beispiel einem aber auch wieder deutlich vor Augen, wie viel tatsächlich vom akustischen Klang der Gitarre bei der Wiedergabe über den Pickup verloren geht.



Abbildung 16 Yamaha „Silent Guitar“, aus [8]

Einen Mittelweg stellen halbakustische Gitarren dar, deren Korpus in der Dicke und Schallochgröße reduziert ist, wie beispielsweise die „Multiac“ Serie des Herstellers Godin. Diese Instrumente sind vom technischen Design her speziell für die Verwendung auf lauten Bühnen optimiert und haben neben dem Transducer am Steg auch einen dazu regelbaren Sensor an der Decke der Gitarre. Außerdem verwenden beide Hersteller bei einigen Modellen eine Technik, die sie als „Sound Imaging“ oder Mikrofonsimulation bezeichnen, deren Ziel es ist, den Klang des Tonabnehmers zu verbessern. Auf derartige Systeme wird später noch detailliert eingegangen.

5.2 Sensoren an der Decke

Kontaktmikrofone an der Decke sind eine weitere beliebte Art der Tonabnahme bei Akustikgitarren und anderen Instrumenten mit Resonanzkörper. Der Vorteil besteht darin, dass das komplexe Resonanzverhalten des Korpus abgebildet werden kann, während gleichzeitig Übersprechen durch andere laute Instrumente minimiert wird. Nachteilig ist, dass das Signal entsprechend auf die Schwingung des Körpers begrenzt ist und beispielsweise der Direktschall schwingender Saiten nicht mit abgebildet wird. Außerdem werden unerwünschte Nebengeräusche am Korpus mitverstärkt, wenn beispielsweise der Arm des Musikers an der Decke reibt. Gleichzeitig bietet das den Vorteil, dass perkussive Spieltechniken auf dem Korpus übertragen werden können.

Kontaktmikrofone können grob in zwei Kategorien unterschieden werden: Zum einen gibt es solche, die eine längliche und eher großflächige Form haben und Schwingungen auf einer Oberfläche wahrnehmen, indem diese zu einer Biegung des Sensors führen. Die Alternative sind Beschleunigungssensoren, die auf schnelle Auslenkungsänderungen senkrecht zur Ebene hin empfindlich sind. Sie sind bei günstigen Kontaktmikrofonen weit verbreiteter und existieren wiederum in verschiedenen Ausführungen.

Die Beschleunigung eines schwingenden Körpers ist direkt proportional mit dem Schalldruck in dessen unmittelbarer Nähe. Da auch das Gehör auf Änderungen des Schalldrucks reagiert, kann ein Beschleunigungssensor prinzipiell geeignet sein, dem natürlichen Klang eines Instrumentes sehr nahe zu kommen, wenn er an einer Stelle platziert wird, an der das Klangspektrum zufällig demjenigen ähnelt, das der Hörer in einiger Entfernung wahrnimmt.

Da die meisten Sensoren eigentlich Druck oder Kraft messen, ist eine träge Masse erforderlich, um dadurch indirekt die Beschleunigung zu messen. Der Zusammenhang ergibt sich aus dem Newton'schen Gesetz welches besagt, dass Kraft das Produkt von Masse und Beschleunigung ist.

$$F = m * a$$

Die träge Masse kann dabei schlicht das eigene Gewicht des Sensors sein, oder eine extra auf das System abgestimmte schwingfähige Masse. Im Idealfall besitzt ein Kontaktmikrofon eine möglichst kleine Eigenmasse, damit es nicht selbst die Masse und Trägheit des Klangkörpers erhöht und dadurch bestimmte Resonanzfrequenzen verschiebt oder dämpft.

5.2.1 Position und Platzierung

Der Klang eines Kontaktmikrofons reagiert extrem sensibel auf die exakte Position, da auf dem Klangkörper viele Schwingungsmoden und –knoten vorhanden sind und teils sehr nah aneinander liegen. An jedem einzelnen Punkt wird letztlich ein anderes Klangspektrum wahrgenommen. Die Resonanzfrequenzen bleiben dabei überall gleich, ihre jeweiligen Amplituden aber sind stark davon abhängig, ob an dem Punkt gerade ein Schwingungsbauch oder –knoten vorliegt.



Abbildung 17 Gängige Position für ein Kontaktmikrofon, aus [9]

Beim Suchen einer Position für ein Kontaktmikrofon kann man so vorgehen, dass man während das Instrument gespielt wird mit dem Mikrofon auf der Oberfläche entlangfährt, das Signal über geschlossene Kopfhörer abhört und seine Aufmerksamkeit den klanglichen Unterschieden widmet. Wenn eine Stelle besonders ausgewogen klingt, merkt man sie sich oder markiert sie vorsichtig. Daraufhin wird der Bereich des Korpus gereinigt und von Staub befreit, sodass der Sensor mit der dazugehörigen Klebmasse oder –Folie Halt finden kann. Bei der akustischen Gitarre wird als typische Ausgangsposition oft die Region hinter dem Steg und dort etwas in Richtung der Diskantseite genannt. Eine Alternative ist auch die Region, in der sich bei manchen Gitarren das Schlagbrett befindet.

Bei einer permanenten Montage von Kontaktmikrofonen im Inneren der Gitarre kann das gleiche Vorgehen angewendet werden wie gerade beschrieben, da es vom Klangspektrum wenig Unterschied macht, ob die Beschleunigung an einer bestimmten Stelle der Decke von oben oder unten gemessen wird. Es kann aber vorkommen, dass an manchen Stellen das Bracing im Weg ist, dann muss eine andere Position gefunden werden. Viele Hersteller geben auch selbst klare Empfehlungen für die Position, auf die sie ihr System ausgelegt haben.

5.2.2 Piezoelektrische Kontaktmikrofone

Das einfachste Kontaktmikrofon besteht schlicht aus einer piezoelektrischen Scheibe, wie sie häufig auch als billiger Lautsprecher für Pieper, Spielzeug oder in kleinen Alarmen verwendet werden. Entsprechend sind solche Sensoren bereits sehr günstig zu kaufen, ohne

deswegen schlecht klingen zu müssen. Es ist eher die Verarbeitungsqualität, die bei günstigen Produkten zu wünschen übrig lässt. So fehlt häufig eine Schirmung gegen elektromagnetische Störeinflüsse oder das Kabel koppelt mechanisch so stark mit dem Sensor, so dass jede kleinste Bewegung daran zu hörbaren Nebengeräuschen führt.

Neben Piezokristallen können auch Elektret-Film artige Sensorelemente eingesetzt werden. Das Wirkprinzip ist dabei das gleiche: Durch die Trägheit der eigenen Masse wirkt auf das Sensorelement eine Kraft, wenn es durch die schwingende Decke eine Beschleunigung erfährt. Diese Kraft wird in eine Spannung umgewandelt, die idealerweise dem akustischen Signal an dieser Stelle entspricht.

5.2.3 Seismische Pickups

Alternativ zu der obigen Ausführung können Kontaktmikrofone so konstruiert werden, dass sie eine definierte „seismische“ Masse haben, die speziell auf den gewünschten Frequenzgang des Systems eingestellt ist. Je nach Orientierung des Feder-Masse Systems im Gehäuse kann festgelegt werden, in welcher Achse der Pickup Beschleunigung wahrnimmt. Als Sensorelement kommen dabei wieder alle der zuvor genannten piezoelektrischen Materialien in Betracht.

Seismische Pickups sind größer und meistens teurer in der Herstellung als die einfacheren, flachen Varianten und finden sich daher eher bei teureren Kontaktmikrofonen und in messtechnischen Anwendungen als in der breiten Masse der Gitarren Pickups.

5.2.4 Mikroelektromechanische Systeme

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) werden ähnlich wie integrierte Schaltungen und Mikrochips in der Halbleitertechnik hergestellt. Aus einem Wafer monokristallinen Siliziums wird dabei eine Struktur herausgeätzt, die in der Lage ist sich unter Beschleunigung oder Druck zu bewegen und dadurch ein entsprechendes Sensorelement zu bilden. Es liegt ein Feder-Masse-System vor, das aus einem dünnen Silizium-Steg als Feder besteht, an dessen Ende eine breitere Struktur aus Silizium die Masse darstellt. Dank der nahen Verwandtschaft mit der Halbleiter-Schaltungstechnik kann auf demselben Chip auch gleich die Elektronik zur Auswertung und Übertragung der Messdaten integriert werden. Solche Systeme sind mittlerweile sehr verbreitet und finden sich unter anderem in der Fahrzeugtechnik im Auslöser des Airbags und in jedem Smartphone zum Erkennen der Orientierung gegenüber der Richtung der Schwerkraft.

Bei ausreichendem Dynamikumfang und Bandbreite kann ein MEMS Beschleunigungssensor auch für akustische Anwendungen eingesetzt werden. Ein Vorteil ist dabei, dass diese Systeme so klein und leicht sind, dass die Auswirkung auf das zu messende Objekt praktisch vernachlässigbar klein ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass Chips verfügbar sind, die die Beschleunigung gleich in allen drei Dimensionen messen, was bei der tontechnischen Verwendung der Signale mehr Möglichkeiten eröffnet.

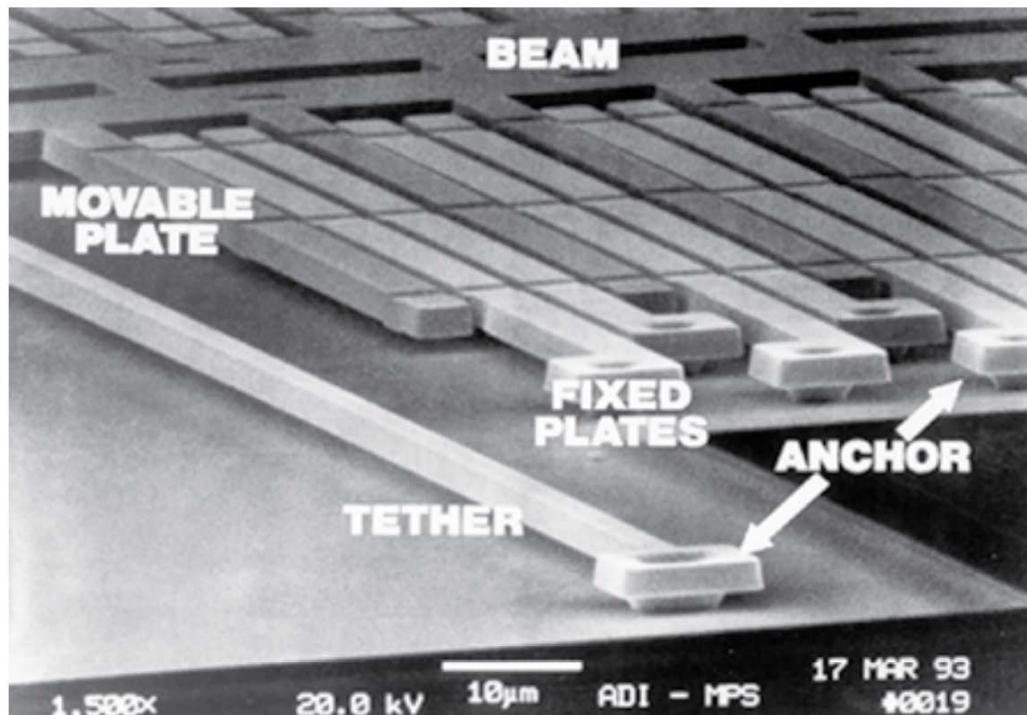


Abbildung 18 Beispiel für ein MEMS, aus (O'Reilly et al. 2009)

Derzeit besitzen die meisten MEMS gemessen an tontechnischen Maßstäben ein recht hohes Grundrauschen und eine zu niedrige Bandbreite, was sich in fehlenden Klang-Anteilen im oberen kHz-Bereich bemerkbar macht (vgl. O'Reilly et al. 2009). Dank des exponentiellen Fortschritts in der gesamten Halbleitertechnik ist es aber gut möglich, dass schon bald MEMS Sensoren verfügbar sein werden, die ihre Alternativen aus piezoelektrischen Materialien klanglich in den Schatten stellen, und das bei gleichem oder günstigeren Preis.

5.3 Interne Mikrofone

Wenn ein natürlicher Klang angestrebt wird ohne sich auf externe Mikrofone verlassen zu müssen, warum dann nicht einfach die Gitarre von innen mikrofonieren? Dies ist der Ansatz hinter internen Mikrofonen für Akustikgitarren. Ähnlich wie die kleinen Lavalier Mikrofone, die unauffällig an Personen angesteckt werden können, handelt es sich dabei entweder um miniaturisierte Echkondensator oder um Elektret Mikrofone. Sie werden in der Regel in Kombination mit dem passenden Vorverstärker angeboten, der als Stromversorgung eine Batterie benötigt. Was den Klang angeht, ähneln sie sich insofern, dass sie sich alle im gleichen Raum befinden – dem Resonanzkörper der Gitarre. Entsprechend dominieren die tiefen Frequenzen im Bereich der Helmholtzresonanz der Gitarre den Klang, sofern dies nicht bereits in der Mikrofonkonstruktion oder der anschließenden Klangregelung kompensiert wird. Je nach Richtcharakteristik und Position kann auch noch ein ausgeprägter Nahbesprechungseffekt dazukommen.

5.3.1 Positionierung interner Mikrofone

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Varianten des internen Mikrofons und eine ebenso große Zahl möglicher Positionen. Das eine System arbeitet mit einem Grenzflächenmikrofon, das unter dem Steg angebracht wird, ein anderes platziert das Mikrofon in den Vorverstärker, der direkt vor der Endpin-Buchse sitzt. Wieder andere integrieren ein Mikrofon in die Klangregelung, die innen am Schalllochrand installiert wird oder in einen abnehmbaren magnetischen Tonabnehmer, der mittig ins Schallloch eingesetzt wird. Es ist nicht möglich pauschal zu sagen, welches dieser Mikrofon Systeme seiner Aufgabe am besten gerecht wird. Trotzdem lassen sich unabhängig von der individuellen Gitarre und der Art des Mikrofons zumindest einige Aussagen darüber treffen, wie sich dessen Position auf den Klang auswirkt:

Bei vielen Systemen hängt das Mikrofon an einem kurzen Schwanenhals, der es dem Musiker ermöglicht je nach Bedarf und Geschmack auszuwählen, welche Bestandteile des Klangs er hervorheben möchte. Eine häufige Position besteht darin, das Mikrofon von innen durch das Schallloch auf die Saiten hin auszurichten. Dadurch werden die Transienten und der hochfrequente Direktschall der Saiten gut herausgearbeitet und die Region um den Steg herum vermieden, um die die tiefen Frequenzen herum stark abgestrahlt werden. Kann man sich diese Position wegen des Feedback Risikos nicht leisten, oder ist ein dichter und warmer Klang erwünscht, liegt es nahe, das Mikrofon von innen auf die Decke zeigen zu lassen.

Wegen der sehr dichten und unvorhersehbaren Verteilung der Eigenmoden auf der Decke und der Reflexionen im Korpus kann die genaue Position nur durch Versuch und Irrtum ermittelt werden. Dabei spielen sowohl die gewünschte Klangvorstellung als auch die Spieltechnik eine Rolle. Wer viel mit perkussiven Elementen auf dem Korpus spielt, muss eine Mikrofonposition finden, bei der diese gut zur Geltung kommen. Ansonsten ist auch wichtig, dass ein internes Mikrofon fast immer Teil eines Kombinationssystems ist. Häufig ist gleichzeitig ein under-saddle Transducer installiert, dessen feedbackrobustes aber klanglich bescheidenes Signal um das des Mikrofons ergänzt wird. In dem Fall macht es Sinn, beim Suchen der Mikrofonposition das zusammengemischte Signal gegenzuhören, und ein insgesamt gut ausbalanciertes Signal anzustreben, anstatt das Mikrofon isoliert zu betrachten.

5.3.2 Feedback Reducer

Ein sogenannter „Feedback Reducer“, auch „Feedback Buster“ oder „Soundhole Cover“ genannt, ist im Grunde ein Gummistöpsel, der bei Bedarf in das Schallloch der Gitarre eingesetzt werden kann. Er ist idealerweise so dimensioniert, dass er mit etwas Druck genau in das Schallloch passt und allein durch seine Form und Elastizität fest in dieser Position gehalten wird, bis man ihn wieder entfernt. Dabei ist es in der Regel nicht notwendig, die Saiten zu lockern oder gar zu entfernen.



Abbildung 19 Einsetzen eines Feedback Reducers, aus [10]

Der Zweck eines solchen Gerätes besteht – wie der Name schon sagt – darin, akustische Rückkopplungen bei der Tonabnahme im Live Einsatz zu unterdrücken. Der nicht verstärkte Klang des Instrumentes ändert sich dabei enorm, da deutlich weniger Klang aus dem Schallloch kommen kann. Die tiefen Eigenmoden der Gitarre, bei denen normalerweise Luft durch das Schallloch strömt, werden ebenfalls verändert, da dieser Luftstrom nun blockiert ist. Auch das Schwingverhalten der Decke wird durch die zusätzliche Masse des Feedback Reducers beeinflusst. Da das Schallloch selbst aber meistens der Stabilität halber mit Bracings umschlossen ist, schwingt die Decke am Schallochrand deutlich weniger als in der Stegregion, weshalb sich die Dämpfung der Decke durch den Feedback Buster zumindest etwas in Grenzen hält.

Betrachten wir nun, wie sich beim Einsetzen eines Feedback Reducers das Verhalten der verschiedenen Tonabnehmersysteme verändert: Ein under-saddle Transducer nimmt das akustische Verhalten der Decke und des Korpus ohnehin kaum wahr und ist daher bereits sehr feedbackresistent. Für ihn ändert sich daher wenig. Ein Kontaktmikrofon an der Decke wird möglicherweise geringfügig anders klingen aber keine bessere Rückkopplungssicherheit haben, da die Decke nach wie vor von außen zum Schwingen angeregt werden kann.

Der Tonabnehmer, der dabei am meisten vom Einsatz eines Soundhole Covers profitiert, ist das interne Mikrofon: Durch das Abdichten des Schalllochs wird effektiv vermieden, dass Schall aus Lautsprechern direkt im Korpus der Gitarre landen kann und dort vom Mikrofon aufgenommen wird. Wichtig ist dabei vor allem, dass der Feedback Reducer das Schallloch exakt – im Idealfall luftdicht – abdichtet. So kann von außen nur noch indirekter Schall durch Anregung der Decke bzw. des Korpus am Mikrofon ankommen und gegebenenfalls Feedback anregen. Der Eigenklang der Gitarre im Inneren des Korpus wird gleichzeitig lauter, da deutlich weniger Energie den Korpus durch das Schallloch verlässt. Interpretiert man den Korpus der Gitarre als einen Raum, dann bewirkt das Schließen des Schalllochs eine Verlängerung der Nachhallzeit – eine klangliche Veränderung, die die Wenigsten stören wird. Die beiden Effekte zusammen sorgen dafür, dass der Feedback Reducer seiner Abgabe gerecht wird, weshalb sich solche Systeme im Live-Einsatz zunehmender Beliebtheit erfreuen. Der Fingerstyle Gitarrist Tommy Emmanuel verwendet praktisch immer Feedback Reducer, da er häufig Perkussion auf der Gitarre einsetzt, die nur über das Signal des internen Mikrofons gut zur Geltung kommt.

Eine abgeschwächte Version stellt ein Feedback Reducer mit Öffnungen dar, dessen Effekt im positiven wie negativen weniger stark ausgeprägt ist als bei der geschlossenen Version. Wem die Wirksamkeit eines solchen Systems ausreicht, muss weniger drastische Veränderungen des unverstärkten Klangs in Kauf nehmen.

5.4 Magnetische Tonabnehmersysteme

Magnetische Tonabnehmer kennen die meisten aus der Welt der E-Gitarren, wo sie praktisch der einzig gängige Tonabnehmer Typ sind. Sie erzeugen ein eigenes Magnetfeld und nehmen den Klang des Instrumentes darüber wahr, wie die schwingenden Saiten das Magnetfeld verändern. Voraussetzung dafür sind ferromagnetische Materialien in den Saiten, im Fall der blanken Saite Stahl, bei den tiefen Saiten ein mit Nickel umwickelter Stahlkern. Die zwei zur Wahl stehenden Varianten sind der Single-Coil-Pickup und der Humbucker, in dem sich durch das Zusammenschalten zweier Tonabnehmer mit entgegengesetztem Wicklungssinn elektromagnetische Störeinflüsse gegenseitig aufheben.

Die genauen technischen und klanglichen Besonderheiten von magnetischen Pickup Varianten werden erschöpfend in der E-Gitarren Literatur diskutiert, einen umfangreichen Überblick liefert (Lähdevaara 2012). Diese Arbeit beschränkt sich auf die Besonderheiten im Fall einer Akustikgitarre, bei der nachträglich ein magnetischer Pickup im Schallloch montiert worden ist.



Abbildung 20 Magnetischer Tonabnehmer an einer Westerngitarre, aus [11]

Eine wichtige Rolle spielt hier das Material der Saiten. Nylon ist nicht ferromagnetisch, daher können klassische Gitarren grundsätzlich nicht mit magnetischen Pickups abgenommen werden. Auch die Bronzelegierungen, die bei den umwickelten Saiten für Westerngitarren üblich sind, wirken deutlich schwächer auf das Magnetfeld ein als E-Gitarren Saiten aus

Nickel, da nur ihr Stahlkern ferromagnetisch ist. Es macht durchaus Sinn, E-Gitarren Saiten auf die Akustikgitarre aufzuziehen, wenn diese überwiegend über den magnetischen Pickup wiedergegeben wird.

Bauartbedingt stellen magnetische Tonabnehmer durch ihre Impedanz einen passiven Tiefpass-Filter mit einer Grenzfrequenz zwischen 2 und 5 kHz dar. Der Klang ist daher deutlich weicher und weniger brillant als ein natürlicher Akustikgitarren-Ton. In der Klangwelt der E-Gitarren stört das meist kaum oder ist sogar erwünscht, da ohnehin viel mit Verzerren gearbeitet wird, die neue Obertöne erzeugen. Auch bei der letztendlichen Wiedergabe der E-Gitarren über Verstärker sind meist gar keine Hochtön-Lautsprecher im Spiel und das Klangspektrum bleibt auf den Bereich bis etwa 6 kHz begrenzt. Ein Akustik Gitarrist wird den darüber liegenden Frequenzbereich allerdings eher vermissen.

Sehr vorteilhaft sind magnetische Pickups natürlich dann, wenn der Musiker gerne mit E-Gitarren Effekten arbeitet. Diese sind meist genau auf die Verwendung dieser Tonabnehmer abgestimmt und können daher problemlos eingesetzt werden, auch wenn sich der Pickup auf einer akustischen Gitarre befindet.

Ähnlich wie auch der under-saddle Transducer nimmt ein magnetischer Pickup hauptsächlich die Schwingungen der Saiten wahr und wenig vom Klang des Korpus. Ebenso ist im Gegenzug die Feedback Resistenz sehr hoch. Wer vorsichtig auf die Decke einer Gitarre schlägt und auf das leise Nachschwingen der Saiten hört, bekommt eine ungefähre Vorstellung davon, wie leise die vom Korpus zurück zur Saite übertragenen Anteile des Akustikklangs sind, verglichen mit der direkten Lautstärke einer angeschlagenen Saite.

5.5 Kombinationssysteme

Wegen der starken Unterschiede im Klang und Verhalten der verschiedenen Tonabnehmersysteme ist es heutzutage praktisch Standard, gleich mehrere Tonabnehmer gleichzeitig zu verwenden und die Signale zusammenzumischen. Dabei wird fast immer der Ansatz verfolgt, dass mindestens ein Tonabnehmer der beiden besonders feedbackresistenten Typen ausgewählt wird, dessen Signal zur klanglichen Aufwertung mit dem eines sensibleren Tonabnehmers gemischt wird, der die Schwingungen des Korpus mit abbildet. Die Grundlage bildet meistens ein piezoelektrischer Transducer unter der Stegeinlage; magnetische Tonabnehmer sind zwar ähnlich unempfindlich gegenüber Feedback, werden aber eher als abnehmbare Nachrüstooption angeboten und kaum werksseitig in Akustikgitarren verbaut.

Als zweites Signal kommt dann ein internes Mikrofon zum Einsatz, oder ein oder mehrere Beschleunigungssensoren an der Decke. Natürlich sind letztendlich beliebige Kombinationen denkbar, dieser Ansatz macht aber besonders daher Sinn, weil man praktisch stufenlos zwischen den beiden Kriterien Klang und Feedback-Sicherheit überblenden kann und damit für jede Bühnenlautstärke den besten Kompromiss findet. Üblicherweise werden Kombinationssysteme von jedem Hersteller als Set inklusive passendem Vorverstärker angeboten oder bereits werksseitig in die Gitarre integriert.

Beim Einsatz eines Kombinationssystems macht es Sinn, auch die Phasenbeziehung der zusammengeführten Signale zu beachten. Wenn eine Schallquelle an unterschiedlichen Punkten wahrgenommen wird kommt es vor, dass gleiche Frequenzen auf beiden Signalen entweder gleich- oder gegenphasig empfangen werden. Die möglichen Folgen sind im schlechtesten Fall ein gegenseitiges Auslöschen eigentlich erwünschter Frequenzen oder das Verstärken unerwünschter Frequenzen. Wenn die Möglichkeit besteht, sollte der Phase beim Einstellen des Systems ebenso Beachtung geschenkt werden wie der Position der Tonabnehmer und des Mikrofons.

6 Vorverstärker und Klangregelung

Einer der großen Vorzüge von Piezo- und Elektret-Tonabnehmern besteht darin, dass sie passive Systeme sind. Das bedeutet, dass sie nicht zwingend eine Energiequelle brauchen, um zu funktionieren und ein Signal auszugeben. Theoretisch ist es daher denkbar, einen Piezotonabnehmer direkt an die nächste DI-Box oder einen Line Eingang anzuschließen. Es gibt aber einen guten Grund, das nicht zu tun:

6.1 Die Impedanz

In einer Signalkette verhält es sich idealerweise so, dass die Signal Quelle eine niedrige Ausgangsimpedanz hat, einer Last also bei Bedarf beliebig viel Energie zuführen könnte, ohne dass das Signal dadurch beeinflusst wird. Der Empfänger hat idealerweise eine unendlich hohe Eingangsimpedanz, um die Quelle nicht zu belasten.

Die Realität sieht leider anders aus: An Mischpulten und Instrumentenverstärkern finden sich häufig auch Line Inputs mit einer typischen Eingangsimpedanz von einigen $k\Omega$, während man erst im $M\Omega$ -Bereich von einem wirklich „hochohmigen“ Eingang spricht.

Gleichzeitig hat beispielsweise die Piezokeramik als Signalquelle eine alles andere als niedrige Ausgangsimpedanz. Schließlich ist eine Keramik praktisch ein Isolator und stellt damit den denkbar größten elektrischen Widerstand dar. Ein piezoelektrischer Pickup erscheint daher elektrisch als eine Spannungsquelle in Reihe geschaltet mit einer Kapazität. Wegen der nur geringen Ladungsänderung während des Signalverlaufs ist auch die mögliche Stromentnahme sehr gering. Es ist daher absolut notwendig, dass ein passiver Tonabnehmer als erstes an einen speziellen Vorverstärker angeschlossen wird, der sich durch eine besonders hohe Eingangsimpedanz auszeichnet und an dessen Ausgang ein höheres und stärker belastbares Signal zur Weiterverarbeitung bereitgestellt wird.

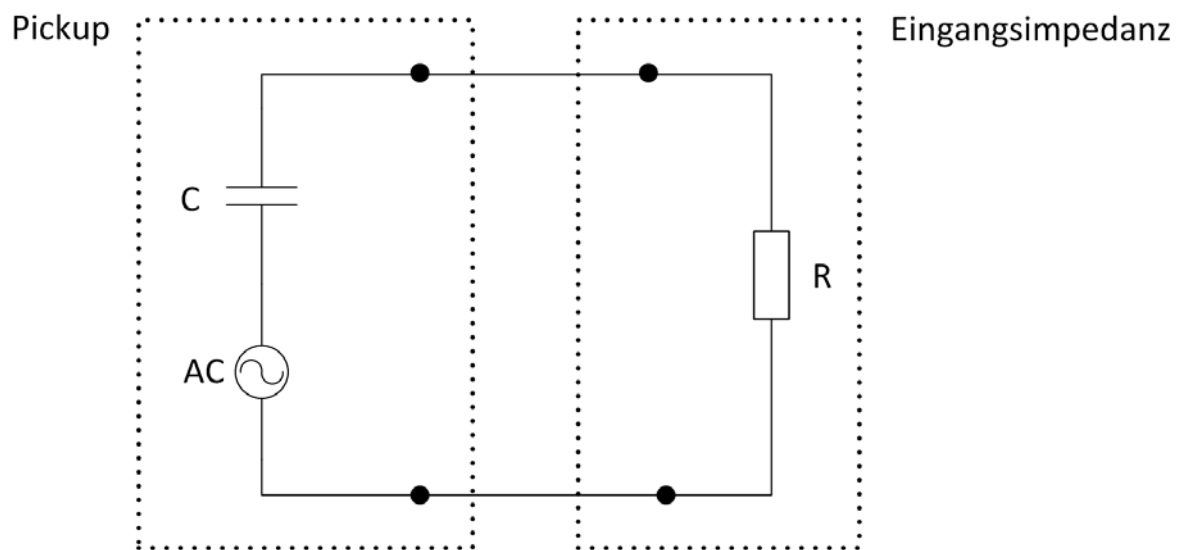


Abbildung 21 Ersatzschaltbild von Transducer und Eingangsimpedanz

Betrachten wir exemplarisch was passiert, wenn man das nicht tut, und den Pickup direkt an einen Verstärker mit einer Eingangsimpedanz von $R = 50\text{ k}\Omega$ anschließt. Nehmen wir weiterhin an, die Piezokeramik hat wie häufig eine sehr kleine Kapazität von beispielsweise $C = 15\text{ nF}$. Die untere Grenzfrequenz f_g des Systems ergibt sich nun aus folgender Gleichung:

$$f_g = \frac{1}{2\pi * R * C}$$

Setzt man die angenommenen Zahlenwerte ein kommt man auf eine Grenzfrequenz von etwa 212 Hz.

$$f_g = \frac{1}{2\pi * 50\text{ k}\Omega * 15\text{ nF}} = 212,2\text{ Hz}$$

Das System wirkt insgesamt als ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von über 200 Hz, es ist also wenig verwunderlich wenn der Klang des Tonabnehmers in der Folge als dünn wahrgenommen wird. Verwendet man stattdessen einen Verstärker mit einer hundertmal größeren Eingangsimpedanz, sinkt die Grenzfrequenz um den gleichen Faktor und ist damit außerhalb der menschlichen Wahrnehmung.

Die Impedanz spielt bei allen passiven Pickups gleichermaßen eine Rolle, unabhängig von ihrer genauen Umsetzung. Der ausschlaggebende Faktor ist letztlich, dass alle diese Systeme ihre Spannung selbst erzeugen, indem eine sehr kleine Ladungsänderung über eine kleine Kapazität eine Spannung erzeugt. Die aus einem solchen System entnehmbare Energiemenge ist daher immer sehr niedrig. Alle angeschlossenen Geräte, die den Pickup auch nur minimal elektrisch belasten, bringen ihn daher schnell an seine Leistungsgrenze und die Qualität des Signals beginnt zu leiden.

6.2 Position des Vorverstärkers

Grundsätzlich sollte der Vorverstärker so nahe wie möglich an dem Tonabnehmer selbst sein, da mit langen Kabelwegen die Signalqualität abnimmt und die Störanfälligkeit steigt. Häufig ist der Vorverstärker mit seinen Reglern daher direkt in der Gitarre integriert. Dies bringt einige Vorteile mit sich:

Zum einen können alle verschiedenen Tonabnehmer über kurze Strecken angebunden werden. Außerdem kann der Musiker selbst die Mischung der Signale nach Bedarf verändern, ohne die Hand vom Instrument nehmen zu müssen. Die Ausgabe des zusammengemischten Signals erfolgt dann meistens über eine Monoklinkenbuchse, die im unteren Gurtpin integriert ist.

Bei von Werk aus mit Elektronik ausgestatteten Gitarren ist der Vorverstärker häufig in die obere Zarge eingesetzt, aus der zu diesem Zweck ein Stück herausgefräst wurde. Klassische Gitarristen und Puristen mag ein solcher Eingriff durchaus abschrecken, andererseits lässt sich der Gesamtklang ja vor der Kaufentscheidung testen und die Steuerelemente sind an dieser Position gut lesbar. Weniger invasiv sind Vorverstärker, die innen am Schalllochrand montiert werden können. Dadurch ist kein irreversibler Eingriff in die Gitarre notwendig und die Bedienelemente sind noch näher an der Spielposition der Finger.



Abbildung 22 Typischer Vorverstärker in der Zarge mit Klangregelung, aus [12]

Andererseits lassen sich die Bedienelemente im Schalllocherand schlecht ablesen, der Musiker muss sein System entsprechend in- und auswendig kennen. Andere Systeme, die zum späteren Nachrüsten einer Gitarre gedacht sind, verlagern den Vorverstärker schlicht nach außen in ein tragbares Gehäuse. Darin können mehr Regelmöglichkeiten untergebracht werden als in der Gitarre selbst. Wer seinen Klang einfach einmal sorgfältig einstellt und während dem Spielen nicht unbedingt nachregeln können muss, ist auch damit gut bedient. Die allgemeingültige Empfehlung, möglichst kurze und hochwertige Klinkenkabel zu verwenden, gilt hier besonders.

6.3 EQ und Klangregelung

Fast jeder Vorverstärker in einer Akustikgitarre verfügt zumindest über eine einfache Klangregelung in Form eines Equalizers. Meistens sind die Frequenzbänder fest, zumindest die Mittenfrequenz lässt sich aber bei manchen Systemen einstellen. Wenn sich mit der Onboard-Klangregelung kein zufriedenstellendes Klangbild erreichen lässt, gibt es spezielle „Acoustic DI“ Boxen, die letztlich aus einer DI-Box und mehreren parametrischen EQs bestehen.

Ein Live Musiker erhält dadurch die Möglichkeit, selbst die Verantwortung für seinen Klang zu übernehmen anstatt diese bei jedem Auftritt an einen anderen Tontechniker abzugeben. Schließlich sollte im Idealfall jeder Musiker mit einem gut klingenden Instrument auftreten, sodass der Toningenieur seine Aufmerksamkeit der Beschallung und dem Monitoring widmen kann und nicht dem Problem, dass die Elektronik der Akustikgitarre schlecht klingt.

Diese als Teil des Instrumentes zu betrachten und damit in der Verantwortung des Musikers zu sehen ist durchaus legitim und bei E-Gitarren Verstärken absolut selbstverständlich. Leider sind sich die wenigsten Hobbyisten mit Akustikgitarren dieser Tatsache bewusst.

Der Tontechniker verbringt daher manchmal einen guten Teil seiner Arbeit mit Schadensbegrenzung von schlecht klingenden Akustikpickups. Die einzige allgemeine Empfehlung die man für diesen Fall geben kann, ist, dass fast alle gängigen Tonabnehmer eher mittenlastig klingen und es sich häufig lohnt, entweder einen oder mehrere schmalbandige Notch-Filter einzusetzen oder die unteren Mitten breitbandig abzusenken, und das durchaus großzügig. Fallen außerdem die Transienten unangenehm stark auf, kann dem mit einem Kompressor mit kurzen Attack und Release Zeiten entgegengewirkt werden.

6.4 Leistungsverstärker

Im Gegensatz zur E-Gitarre, wo jeder Verstärker einen eigenen Klangcharakter hat, werden bei der Verstärkung von Akustikgitarren möglichst ausgewogen und linear klingende Verstärker bevorzugt, die nicht verzerren. Während manche Herstellern spezielle Akustik-Amps mit passender Klangregelung anbieten, kann prinzipiell jede neutrale Monitorbox, über die auch Musik und Gesang gut klingt, als zur Verstärkung der Akustikgitarre auf der Bühne verwendet werden, sofern das Signal zumindest eine Vorverstärkung mit Impedanz Anpassung durchlaufen hat.

7 Mikrofonsimulation und Faltung

Mittlerweile gibt es verschiedene Hersteller auf dem Markt, die mit einem überlegenen Pickup-Klang mit Hilfe von Mikrofonsimulation werben. Bekannt sind sie unter Namen wie „Fishman Aura“ oder „Yamaha SRT“. Letzteres steht für „Studio Response Technologie“ und deutet damit schon an, in welche Richtung es geht. Neben dem Begriff „Aura“ ist beim Hersteller Fishman noch der Begriff des „Sound Imaging“ im Spiel.

Letztlich handelt es sich bei allen Systemen um den Versuch, den Klang des Tonabnehmers mithilfe digitaler Filter so zu verändern, dass er dem Klang nahekommt, den die jeweilige Akustikgitarre bei einer guten Mikrofonaufnahme im Studio hätte. Neben dem Versuch eine akustische Gitarre mehr nach sich selbst klingen zu lassen, gibt es auch E-Gitarren Systeme wie die Line6 „Variax“ und das Graph Tech „Ghost“ Pickup System, die sich anschicken sogar eine elektrische Gitarre wie eine akustische klingen zu lassen. Wieso das funktionieren kann und inwieweit es das tut, wird im Folgenden genauer betrachtet.

7.1 Grundidee

Der Gedanke hinter dem Einsatz digitaler Filter zur Klangverbesserung beruht darauf, dass die Gitarre als lineares und zeitinvariantes System aufgefasst wird (LTI-System). Linear bedeutet, dass unterschiedliche starke Erregungen die gleiche Reaktion zur Folge haben, nur eben um einen linearen Faktor anders. Außerdem führen zwei verschiedene gleichzeitige Ereignisse zu einer Reaktion, die der Summe der Systemantwort auf die einzelnen Erregungen entspricht. Wenn man also eine Gitarre aufnimmt, während man mit zwei Fingern auf ihre Decke klopft, sollte sie genauso klingen wie wenn man mit beiden Fingern nacheinander klopft und die beiden Aufnahmen gleichzeitig abspielt. Außerdem sollte der Ton eines starken Klopfens gleich klingen wie der eines leichten, nur eben entsprechend lauter.

Dass die Gitarre sich zumindest annähernd linear verhält, legen die Untersuchungen von unter anderem (Romá et al. 2008) nahe. Auch die meisten anderen akustischen Instrumente können annähernd als LTI-System betrachtet werden. Kein LTI-System sind dagegen die Hammond-Orgel, die ein rotierendes und damit zeitabhängiges Element zur Tonerzeugung verwendet und so das Kriterium der Zeitinvarianz verletzt, und Instrumente mit nichtlinearen Verzerrern, die das Kriterium der Linearität verletzen.

Wenn nun der Korpus der Gitarre ein LTI-System darstellt, sollte es möglich sein dessen Klang mithilfe digitaler Filter nachzubilden und somit dem Signal eines Tonabnehmers im Steg die Resonanzen des Korpus wiederzugeben, die ihm bei der Aufnahme entgehen. Grundlagenarbeit in dieser Thematik wurde insbesondere von Prof. Matti Karjalainen, Henri Penttinen und Vesa Välimäki im Rahmen ihrer Forschung an der Helsinki University of Technology gelegt und dokumentiert, vgl. dazu (Karjalainen et al. 1999), (Penttinen et al. 2001) und die anderen Beiträge der Autoren.

7.2 Einführung zur Faltung und Impulsantwort

Die sogenannte „Impulsantwort“ beschreibt ein LTI-System vollständig. Sie entsteht am Ausgang des Systems, nachdem der Eingang mit einem Impuls angeregt worden ist. Bei diesem Impuls handelt es sich idealerweise um einen Dirac-Stoß, der unendlich kurz und unendlich stark ist, aber eine endliche Fläche bzw. Energie besitzt. Mit der Impulsantwort erhält man eine Übertragungsfunktion, die es erlaubt, das reale System mathematisch exakt zu modellieren.

Die Rechenoperation, mit der man die Antwort des Systems auf ein beliebiges Eingangssignal bestimmen kann, ist die sogenannte „Faltung“ mit der Impulsantwort. Die Faltung stellt eine Multiplikation beider Signale im Frequenzbereich dar.

Hat man zum Beispiel ein bestimmtes Eingangssignal in Form einer Tonaufnahme und eine Impulsantwort, den Nachhall eines Raumes nach impulsartiger Anregung beinhaltet, werden die Resonanzfrequenzen und deren zeitlicher Verlauf auf das ursprüngliche Signal „draufgerechnet“, so dass das ursprüngliche Klangspektrum um das des Hallraumes ergänzt wird. Durch die Faltung wird das Audiosignal praktisch in das System des Hallraums eingespeist, sodass sich als Ausgangssignal das verhallte Eingangssignal ergibt. Halleffekte, nach diesem Prinzip arbeiten, gibt es mittlerweile schon länger und werden als „Faltungshall“ bezeichnet. Eine weitere verbreitete Anwendung ist die Modellierung von E-Gitarren Verstärkern und Effekten.

Die Impulsantwort wird auch als die System- oder Frequenzübertragungsfunktion bezeichnet. Der erste Begriff impliziert, dass die Anregung bei der Messung impulsartig erfolgt ist, die anderen sind dagegen neutraler. Grundsätzlich kann relativ leicht die Frequenzübertragungsfunktion einer beliebigen Struktur berechnet werden, indem diese mit einem bekannten Signal angeregt wird. Die dabei notwendige Rechenoperation wird als invertierte Faltung oder Dekonvolution bezeichnet, da sie die Umkehrung der Faltung (englisch: „convolution“) darstellt. Aus der Übertragungsfunktion und besonders dessen Frequenzspektrum gehen sehr deutlich die Resonanzfrequenzen des Systems hervor.

Da das Wissen um das Resonanzverhalten von Strukturen in sehr vielen Bereichen von großem Interesse ist, hat sich das Fachgebiet der Modalanalyse gebildet, das sich mit ausführlichen Messungen dem Untersuchen des Schwingungsverhaltens z.B. von Fahrzeugkarosserien oder Flugzeugen widmet.

7.3 Bestimmung der Übertragungsfunktion des Gitarrenkorpus

Übertragen wir das Beispiel mit dem Faltungshall nun auf das System der akustischen Gitarre. Zuerst gilt es, eine Impulsantwort bzw. Übertragungsfunktion ihres Korpus zu bestimmen. Das Signal eines under-saddle Transducers kann daraufhin mit dieser Impulsantwort gefaltet werden, wodurch der Klang idealerweise den resonanten Charakter des Korpus zurückgewinnt. Zum Aufnehmen der Übertragungsfunktion werden vier Dinge benötigt: Ein Raum, ein Mikrofon, ein definierter Erreger und eine akustische Gitarre.

Was den Raum und das Mikrofon angeht, stellt sich die Frage, ob ein reflexionsarmer Raum und ein Messmikrofon verwendet werden sollen, oder ein Tonstudio mit einem Studiomikrofon. Ersteres ist sicherlich besser geeignet, um messtechnisch exakte Ergebnisse zu erzielen. Da aber die Zielvorstellung darin besteht, idealerweise den Klang einer Studioaufnahme zu erhalten, wird von den meisten Entwicklern wie Yamaha oder Fishman der zweite Ansatz verfolgt – das Ausprobieren verschiedener Mikrofone im Tonstudio. Die Wahl der Gitarre ist insofern einfach, als dass jede individuelle Gitarre ein einzigartiges Klangspektrum hat, und daher jede gut klingende Gitarre mit Pickup dafür in Frage kommt, ihre jeweilige Übertragungsfunktion zu bestimmen. Natürlich ist es möglich, dass ähnliche Instrumente – beispielsweise aus derselben Serie eines Herstellers – ähnlich genug klingen, um dieselbe Impulsantwort verwenden zu können. Bleibt also noch die Auswahl einer Erregermethode:

7.3.1 Shaker

Beim Aufnehmen von Impulsantworten von Hallräumen liegt ein Problem darin, einen möglichst idealen Impuls zu erzeugen. Dies kann durch Starterpistolen geschehen, durch platzende Luftballons oder durch eine laute Klappe, wie man sie von Filmproduktionen kennt. Einfacher ist es aber oftmals, einen Lautsprecher mit einem bekannten Signal zur Anregung zu verwenden, und aus der Reaktion die Übertragungsfunktion zu berechnen. Dabei wird als Signal zur Anregung oft ein logarithmischer „Sweep“ eingesetzt. Dieser besteht aus einem Sinuston, dessen Frequenz am unteren Ende des hörbaren Frequenzbereichs (20 Hz) anfängt und dann stetig durch alle Oktaven hindurch ansteigt, bis das obere Ende (20 kHz) erreicht ist. Mit einem langsamen Sweep kann eine hohe Auflösung und ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht werden. Außerdem lässt sich das nichtlineare Verhalten eines Systems erkennen und vom linearen Teil trennen. Daher sind Sweeps die bevorzugte Methode auch beim Messen der Übertragungsfunktion von Verstärkern und nichtlinearen Effekten.

Um eine akustische Gitarre mit einem Sweep anzuregen, wird ein Kontaktlautsprecher oder „Shaker“ benötigt. Dieser wird auf dem Steg oder direkt dahinter platziert. Da hier auch die Amplitude der Anregung kontrolliert werden kann, konnten (Romá et al. 2008) mit einem Shaker bei verschiedenen starken Anregungen überprüfen, dass sich der Gitarrenkorpus weitgehend linear verhält.

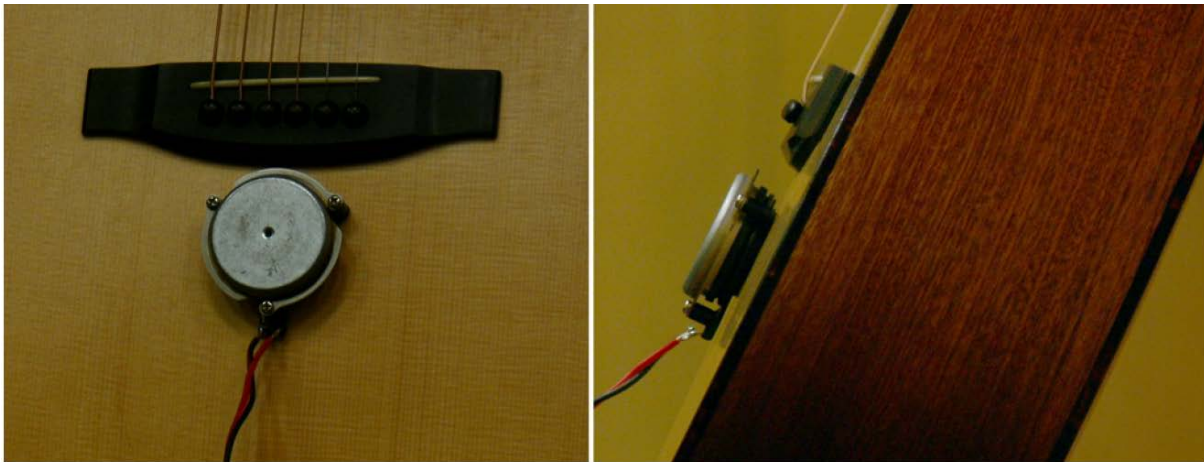


Abbildung 23 Shaker zur Anregung einer Gitarre, aus (Romá et al. 2008)

Neben dem Shaker sind in der Praxis auch einfachere Methoden der Anregung möglich:

7.3.2 Impulshammer

Ein Impulshammer unterscheidet sich von einem gewöhnlichen Hammer dadurch, dass er zum Einsatz in der Messtechnik optimiert wurde. Er verfügt daher über einen speziell instrumentierten Kopf, indem sich auch ein Sensor befindet, anhand dessen Signals sich erkennen lässt wie „gut“ ein jeweiliger Impuls war. Außerdem schwingt er selbst nicht hörbar nach, wodurch die Tonaufnahme unverfälscht den Klang des angeregten Körpers wahrnimmt.



Abbildung 24 Professioneller Impulshammer, aus [13]

Impulshämmer gibt es in vielen verschiedenen Größen, von wenigen hundert Gramm schweren Modellen zum Anschlagen dünner Holzkörper bis hin zu Vorschlagshämmern zur Anregung ganzer Schiffe oder Lokomotiven. Während speziell instrumentierte Hämmer die messtechnisch besten Ergebnisse liefern, kann man auch ohne sie Beobachtungen mit gewisser Aussagekraft machen. So klopfen beispielsweise Instrumentenbauer häufig mit dem Finger auf Holzdecken, um ihren Ton zu begutachten und auf des halbfertige Instrument, um dessen Ton durch gezielte Bearbeitung abzustimmen.

Da der reale Impuls nur begrenzt steil ist, lässt die Aussagekraft zu hohen Frequenzen hin nach. Bei einem Impulshammer mit hartem Kopf ist das Ergebnis bis etwa 5 bis 10 kHz aussagekräftig, verwendet man zum Schutz des Instrumentes einen weicheren Kopf ist das Ergebnis nur bis etwa 1 kHz nutzbar. Praktischerweise sind es gerade die tiefen Resonanzfrequenzen, die am ehesten charakteristisch für ein individuelles Instrument sind. Ab etwa 3 kHz liegen die Eigenmoden so dicht beieinander, dass sie eher diffusen und hallartigen Charakter haben und auch annähernd als Hall modelliert werden können (vgl. Pentinnen et al 2001).

Will man eine eigene Impulsantwort eines Instrumentes aufnehmen, geht man folgendermaßen vor: Die Saiten werden in Stimmung gebracht, damit das Instrument der gleichen Spannung ausgesetzt ist wie üblich. Daraufhin werden die Saiten am Hals mit losem Stoff oder Schaumstoff bedeckt, um sie abzdämpfen. Nicht zu empfehlen ist es, den Stoff zwischen Saite und Griffbrett zu klemmen, dadurch wird die Saite eher an einer Stelle terminiert und kann so schwingen. Das Mikrofon wird an einer Position platziert, aus der der ganze Korpus wahrgenommen wird, beispielsweise einen halben bis ganzen Meter vom Schallloch entfernt. Dann schlägt man mit dem Impulshammer auf den Steg und zeichnet das Signal des Mikrofons und des Hammers gleichzeitig auf. Wer keinen Zugang zu einem instrumentierten Hammer hat, kann für das Experiment stattdessen einen anderen harten, leichten Gegenstand wie einen Bohrkopf oder Schraubendreher verwenden. Mit Klebeband überall außer am Kopf kann unerwünschtes Nachklingen des Erregers reduziert werden. In diesem Fall wird direkt auf die Stegeinlage geklopft, unter der sich der Tonabnehmer befindet, und dessen Signal mit aufgezeichnet.

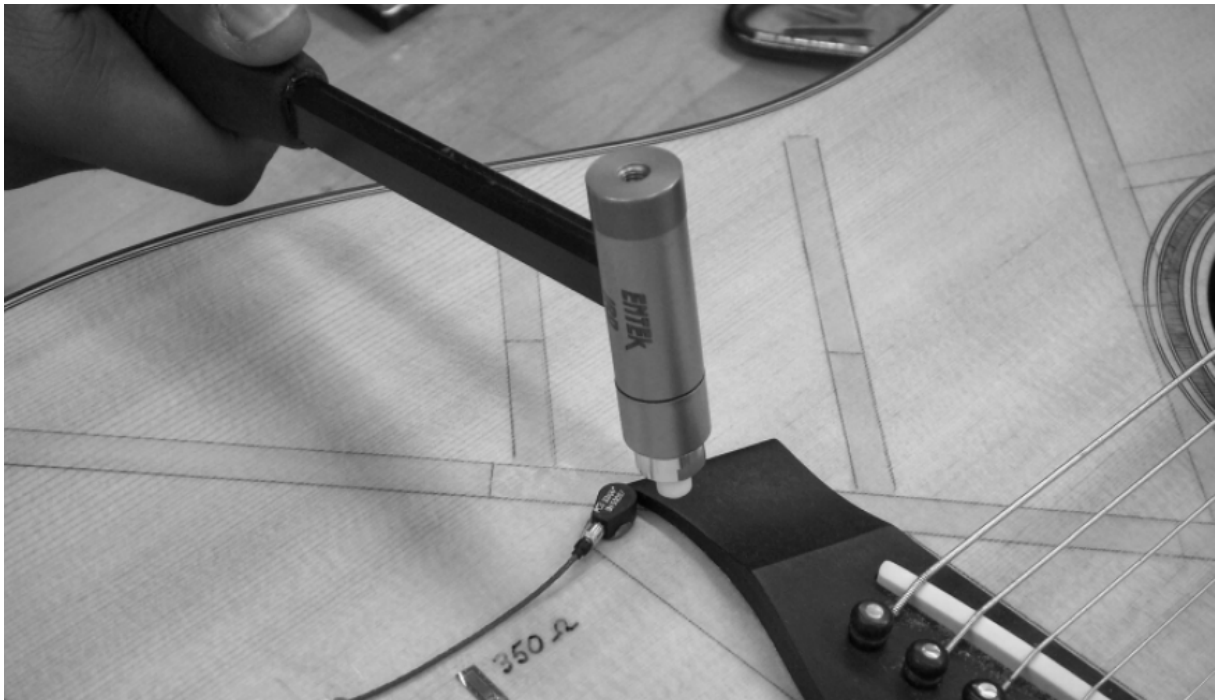


Abbildung 25 Anregung einer Gitarre mit einem Impulshammer, aus (French 2009)

Nach der Aufnahme werden anhand der Signalverläufe aus dem Hammer bzw. dem Pickup diejenigen Takes ausgewählt, bei denen der Impuls am steilsten war und auch sonst keine Störungen auftraten. Takes, bei denen ein mehrfaches Auftreffen des Hammers sichtbar ist, werden nicht verwendet. Im Grunde kann man die über das Mikrofon erhaltenen Impulsantworten nun bereits verwenden, durch Dekonvolution mit dem dazugehörigen Erregersignal werden sie aber noch exakter.

Durch eigene Versuche wurde festgestellt, dass sich die Resonanzfrequenzen bei verschiedenen Mikrofonpositionen und Takes nicht unterscheiden, ihre jeweiligen Amplituden dagegen zu gewissem Maß von der Mikrofonposition abhängen. Das deckt sich mit den bisherigen Erklärungen zur Projektion des Instrumentes.

7.3.3 Anregung durch Spielen

Die Untersuchungen von unter anderem (Karjalainen et al. 1999) legen nahe, dass die Anregung der Gitarre durch abwechslungsreiches Spielen zu besseren Ergebnissen führt als die reine Aufnahme einer Impulsantwort mit abgedämpften Saiten. Der Grund dafür liegt darin, dass hierbei das gesamte Klangspektrum der Gitarre ausgeschöpft wird und besonders bei den höheren Frequenzen oberhalb von 5 kHz aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden. Man erhält die Übertragungsfunktion in diesem Fall dadurch, dass wieder Pickup und Mikrofonsignal gleichzeitig aufgenommen werden, während die Gitarre gespielt

wird. Um sicherzugehen, dass möglichst jede Frequenz mindestens einmal mit angeregt wird, macht es Sinn, beispielsweise Akkorde in chromatischer Abfolge über das gesamte Griffbrett zu spielen.

Die Übertragungsfunktion wird dadurch gewonnen, dass mittels geeigneter Software eine Dekonvolution des Mikrofonsignals mit dem Pickupsignal durchgeführt wird. Wie bereits erwähnt ist die Dekonvolution die Umkehrung der Faltung, und entspricht daher der Division der Klangspektren im Frequenzbereich. Einfacher vorstellbar ist die Betrachtung, dass letztlich das Spektrum gesucht wird, mit dem man das des Pickup Signals multiplizieren muss, um als Ergebnis das Spektrum der Mikrofonaufnahme zu erhalten. Dies ist derselbe Grundgedanke, das in einfacher Form auch beim sogenannten EQ-Matching verwendet wird. Plugins mit dieser Funktion werden beispielsweise von iZotope, Voxengo und FabFilter angeboten und stellen automatisch eine bestimmte Zahl parametrischer Equalizer so ein, dass das Spektrum eines Signals dem eines anderen angeglichen wird.

Abbildung 26 zeigt eine EQ Kurve, die zur Angleichung eines magnetischen Pickup-Signals einer Westerngitarre an das Spektrum ihrer gleichzeitigen Mikrofonaufnahme verwendet wurde. Sie bietet daher eine ungefähre Orientierung, in welche Richtung ein typischer EQ für dieses Szenario gehen kann.



Abbildung 26 Beispiel für eine Match EQ Kurve, aus [14]

Die Dekonvolution geht allerdings noch deutlich weiter. Zum einen unterteilt sie das Spektrum in teils mehrere tausend individuell betrachtete Frequenzbänder, zum anderen berücksichtigt sie auch die Informationen aus dem Zeitbereich, also die Phasenbeziehungen der Signalanteile und das Decay-Verhalten jeder Resonanzfrequenz.

Das Problem bei dieser Rechenoperation ist, dass Frequenzbänder, die im Pickup kaum zur Geltung kommen, einen sehr hohen Verstärkungsfaktor bekommen, um dies auszugleichen. Dadurch wird aber auch das Rauschen des Tonabnehmers bei diesen Frequenzen verstärkt, wenn sonst keine klangliche Information vorliegt, die an das Mikrofon angeglichen werden könnte. Betroffen sind hier besonders wieder die sehr hohen Frequenzen ab 6 – 10 kHz und darüber. In diesem Teil des Spektrums stellt der Direktschall der Saiten einen nennenswerten Teil des Klangs dar, der auch im Tonabnehmer direkt unter der Stegeinlage nicht voll zur Geltung kommt. Die gewonnene Übertragungsfunktion muss daher so manipuliert werden, dass extreme Verstärkungsfaktoren in Frequenzbändern, deren Verstärkung nur zu mehr Rauschen führen würde, teils drastisch abgesenkt werden.

Neben dieser Manipulation kann natürlich auch manuelles Fine-Tuning der Übertragungsfunktion durch erfahrene Tonmeister und Entwickler erfolgen, wodurch der subjektiv wahrgenommene Klang weiter verbessert wird. Das Ergebnis ist eine durchaus brauchbare Übertragungsfunktion, die das von tiefen Frequenzen dominierte Resonanzverhalten der Gitarre gut modellieren kann, im sehr hohen Frequenzbereich aber an ihre Grenzen stößt.

Mit einem ähnlichen Verfahren ist es auch möglich, eine Übertragungsfunktion zu gewinnen, die eine E-Gitarre wie eine Akustikgitarre klingen lässt. Zur Einmessung der Akustikgitarre wird dabei ein magnetischer Tonabnehmer verwendet, bei der Wiedergabe über eine E-Gitarre wird der Pickup ausgewählt, der von der Position her am besten mit der beim Messvorgang übereinstimmt und dessen Signal mit der Übertragungsfunktion gefaltet. Untersuchungen dazu wurden von (Karjalainen et al. 2000a) durchgeführt. Die Line 6 „Variax“ bietet eine solche Modelling-Funktionalität, verwendet allerdings dazu individuelle piezoelektrische Tonabnehmer an jeder Saite. Dabei erleichtert die Trennung der Signale für die einzelnen Saiten die Umsetzung und erweitert die Möglichkeiten des Instruments auf samplebasierte Klänge.

7.4 Stand der Technik

Die Verbreitung solcher Systeme mit Mikrofonsimulation nimmt seit ihren Anfängen zu Beginn des Jahrtausends weiter zu. Zum einen gibt es werkseitig in die Gitarre integrierte Pickup Systeme, die ein dazu Blenden einer oder verschiedener Mikrofonsimulationen erlauben. Die bekanntesten dieser Technologien sind das Fishman Aura und das Yamaha SRT System. Die bereits erwähnte Yamaha „Silent Guitar“ ist übrigens auch mit dieser Technik ausgestattet, sodass hier das Pickup Signal um einen Resonanzkorpus ergänzt wird, den die Gitarre eigentlich gar nicht hat. Auch das ist mit einer gut ausgewählten Übertragungsfunktion von einer realen Akustikgitarre technisch kein Problem.

Außerdem gibt es externe Geräte wie die D-Tar „Mama Bear“ und die Fishman „Aura Spektrum DI-Box“, die es erlauben, jede Gitarre anzuschließen und aus einer Auswahl vorinstallierter oder online verfügbarer „Images“ diejenigen auszuwählen, die gut zum jeweiligen Instrument und Anwendungsfall passen. Dabei sind auch Images für andere Zupfinstrumente wie Mandoline und Resonator Gitarre oder Banjo möglich. Zum Erhalten eines wirklich individuellen Images für das eigene Instrument muss dieses allerdings beim Hersteller eingeschickt werden, das selbstständige Aufnehmen eines kompatiblen Images im (Home-)Studio ist nicht möglich. Es existieren aber aus der E-Gitarren Szene einige Effektgeräte, die eine Faltung mit beliebigen Impulsantworten bis zu einer gewissen Länge vornehmen können. Diese findet man unter dem Begriff „Hardware Impulse Response Loader“. Für das Falten mit einer Übertragungsfunktion innerhalb einer DAW kann ansonsten ein beliebiges Plugin verwendet werden, das das Arbeiten mit Impulsantworten zulässt. Passende Impulsantworten können entweder mit den obigen Techniken selbst erstellt werden und werden in Form von kurzen Audiofiles von Entwicklern wie 3 Sigma Audio zum Kauf angeboten.

Es ist anzunehmen, dass alle diese Systeme heutzutage die Echtzeitanwendung der Faltung mit Hilfe der „schnellen Faltung“ implementieren. Dabei wird das Eingangssignal per schnelle Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert und dort mit der gespeicherten FFT der Impulsantwort multipliziert. Anschließend wird das entstandene Spektrum per inverser FFT zurück in den Zeitbereich transformiert und wieder ausgegeben. Zur Ein- und Ausgabe ist folglich auch immer eine Wandlung vom Analogen ins Digitale und wieder zurück notwendig.

Die Rezeption dieser Systeme bei Musikern und auch von Fachhändlern ist überwiegend gut, nicht selten sprechen Musiker auch begeistert von einem Meilenstein in ihrer Suche nach einem „gut“ klingenden Tonabnehmer. Die externen Lösungen sind allerdings eher ein Nischenprodukt, da der Akustikgitarrenmarkt von Amateuren und Hobbyisten dominiert wird,

von denen die allerwenigsten bei ihrer Suche nach dem guten Ton soweit gehen wie die Überlegungen in dieser Arbeit und der genannten Hersteller. Es ist daher eher abzusehen, dass die Mikrofonsimulation in Zukunft weiter Einzug in die werksseitigen Onboard-Elektroniken der Gitarren erhält und dort bei einfacher Bedienbarkeit überzeugende Ergebnisse liefert, als dass die Zielgruppe für die externen Geräte plötzlich zunimmt.

Die Pickup Hersteller K&K und LR-Baggs gaben auf Nachfrage des Autors übrigens beide sinngemäß zu verstehen, dass die digitale Signalbearbeitung und die Faltung mit einer nicht-individuellen Übertragungsfunktion ihrer Philosophie widerspricht, den natürlichen Klang des jeweiligen Instrumentes wiederzugeben und setzten weiterhin auf entsprechende Kombinationssysteme mit Deckensensoren oder Mikrofonen.

Als weitere Begründung dafür wird von ihnen angeführt, dass die allermeisten Akustikgitaristen ohnehin nicht in derart lauten Umgebungen auftreten, dass sie auf den Klang des under-saddle Transducers limitiert sind. Während erstere Begründung über das Schlechte und Unpersönliche der Digitaltechnik eher eine Frage der Philosophie ist, bei der auch die Einstellungen der Kunden stark auseinandergehen können, ist der zweite Punkt ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Schließlich haben auch die besten digitalen Modelle ihre Schwachstellen:

7.5 Abweichungen von Modellen und Realität

Natürlich gibt es bei jeder Form der Modellierung und Signalbearbeitung Fehler und Abweichungen zum Ideal. So gibt es auch im hier betrachteten Fall einige Unstimmigkeiten:

- Fehler im Zeitbereich durch die zweifache FFT bei der Echtzeit Implementierung
- Messfehler beim Bestimmen der Impulsantwort bzw. der Übertragungsfunktion
- Fehler durch die begrenzte Länge der implementierten Impulsantwort (~100 ms)
- Nichtlinearität des under-saddle Transducers selbst, da sich dessen eigener Frequenzgang mit der Stärke der Anregung verändert (vgl. Tikander 2006)
- Weitere Nichtlinearität des Transducers, wenn dieser unterschiedlich sensibel auf die verschiedenen Saiten anspricht
- Vernachlässigung von unregelmäßigem Decay-Verhalten durch Schwebungen und gegenseitige Kopplung von Korpus und Saiten

Diese Kritikpunkte mögen alle durchaus berechtigt sein, müssen aber nicht zwingend so deutlich zu Tage treten, dass sie hörbar sind. Ein anderer Punkt dagegen ist deutlich wahrnehmbar und lässt sich leider auch kaum durch Verbesserungen am Modell kompensieren: Das Fehlen hochfrequenter Spektralanteile oberhalb von 10 kHz durch den Direktschall der Saite selbst.

Die Erklärung dafür ist, dass der under-saddle Transducer selbst nur wenig empfindlich für Klanganteile über 10 kHz ist. Versucht man diese spektralen Anteile mit einer entsprechend aggressiven Übertragungsfunktion zu kompensieren, tritt vor allem das Eigenrauschen des Tonabnehmers zu Tage. Was bereits bei der Aufnahme verloren geht, kann so leicht eben nicht wiederhergestellt werden. Und auch beim Aufnehmen einer Impulsantwort mithilfe eines Impulshammers ist zwischen 5 und 10 kHz Schluss, da erstens der reale Impuls nur begrenzt steil ist und zweitens diese hohen Resonanzfrequenzen nicht so ausgeprägt vom Korpus abgestrahlt werden, dass sie bei idealer Anregung so viel besser zur Geltung kämen. Ein positiver Nebeneffekt dieses Makels ist, dass auch störende Saitengeräusche wie beispielsweise das Rutschen mit der linken Hand nicht sehr deutlich übertragen werden.

Außerdem darf nicht vergessen werden, dass Perkussion auf dem Korpus nach wie vor nicht von einem under-saddle Transducer wahrgenommen werden kann – egal ob mit oder ohne Mikrofonsimulation. Wer also solche Elemente in seiner Spieltechnik einsetzt, wird um ein internes Mikrofon oder zumindest einen oder mehrere Deckensensoren daher nicht herumkommen.

7.6 Fazit

Trotz den obigen Punkten kann festgehalten werden, dass mithilfe von Impulsantworten und Faltung bzw. digitaler Filter eine deutliche Verbesserung erzielt werden kann, die weit über das hinausgeht, was mit den früheren Techniken möglich war. Jahrzehnte lang mussten Toningenieure bei der Live-Abnahme von Akustikgitarren überwiegend Schadensbegrenzung betreiben mit dem Ziel, das der Pickup zumindest nicht mehr nach „Quack“ klingt. Mit einer gut abgestimmten Impulsantwort lässt sich heute nun darüber hinaus auch erreichen, dass das Pickup-Signal tatsächlich nach einer akustischen Gitarre mit Resonanzkörper klingt, und das ohne ein höheres Risiko für Feedback in Kauf nehmen zu müssen.

In der E-Gitarren Welt spielt das Problem von fehlenden hohen Frequenzen im Übrigen keine so große Rolle: Da diese ohnehin eine mittige Klangästhetik haben und der Direktschall der Saiten nicht hörbar ist, steht hier dem authentischen Modellieren von Verstärkern und Effekten nichts im Weg. Entsprechend verbreitet und beliebt ist digitales Modellieren hier bereits.

7.7 Transfer auf andere Anwendungen

Grundsätzlich kommt das Verfahren der Mikrofonsimulation auch für ganz andere Lebensbereiche in Betracht, bei denen aufgrund der hohen Umgebungslautstärke auf Kontaktmikrofone oder andere Transducer zurückgegriffen werden muss, um ein leises Signal abzunehmen. In den Ranglisten der lautesten Ereignisse wird abgesehen von Schüssen und anderen Explosionen häufig das Düsentriebwerk als das lauteste genannt. Das laute Rockkonzert folgt mit nur wenig Abstand. Entsprechend groß ist die Herausforderung, die Sprache eines Jet Piloten für den Funkverkehr abzunehmen, ohne dass das Übersprechen des Triebwerks in unmittelbarer Nähe das Signal dominiert. Dazu werden oftmals Kehlkopfmikrofone eingesetzt, also Kontaktmikrofone, die die Sprache direkt am Hals des Piloten abnehmen. Sie sind meist direkt in den Helm bzw. die Sauerstoffmaske integriert.

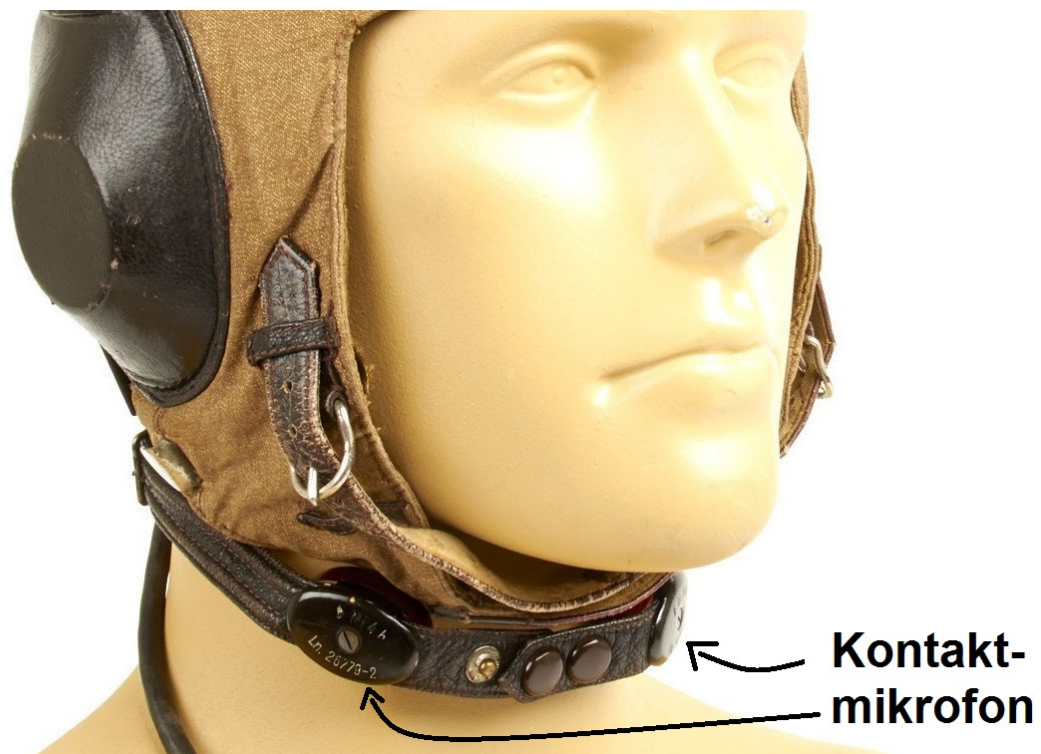


Abbildung 27 Beispiel für ein Kehlkopfmikrofon aus dem 2. Weltkrieg, aus [15]

Dass der Klang der Sprache dabei anders gefärbt ist als bei einer Mikrofonaufnahme, ist einleuchtend. Womöglich ließe sich eine Verbesserung erzielen, wenn man in kontrollierter Umgebung versucht, die Übertragungsfunktion zwischen Kontaktmikrofon und einem Studiomikrofon zu bestimmen. Die Grenzen, an die dieses Verfahren stoßen würde, wären die Wiedergabe von hochfrequenten „S“- und Zischlauten und anderer Transienten bei Konsonanten, deren Klang direkt im Mund gebildet und an die Umgebung abgestrahlt wird. Da diese Signalanteile dem Kontaktmikrofon bei der Aufnahme schon entgehen, lassen sie sich auch nicht rekonstruieren, ein Anheben der entsprechenden Frequenzbänder bringt wieder nur mehr Rauschen hervor.

Dieses Beispiel lässt sehr viele Parallelen zum Fall der Mikrofonsimulation bei Akustikgitarren erkennen, was dafür spricht, dass die angestellten Betrachtungen für deutlich mehr Systeme Gültigkeit besitzen als nur für das eine Musikinstrument. Glücklicherweise ist im Fall des Militär- und Flugfunks eine Sprachqualität auf Studioniveau weder notwendig noch die nachgefragte Klangästhetik, sofern das Signal zur Sprachverständlichkeit einmal ausreicht.

8 Tonabnahme im Studio

Im Tonstudio befindet man sich in einer kontrollierten Umgebung, in der Feedback kein Problem darstellt. Es können daher getrost empfindliche Mikrofone, weite Richtcharakteristiken und große Abstände eingesetzt werden, um die Gitarre als Ganzes aufzunehmen.

8.1 Allgemeines zur Mikrofonierung

Das grundsätzliche Wissen über das Abstrahlverhalten der Gitarre in den verschiedenen Frequenzbereichen aus den vorherigen Kapiteln kann als Orientierung beim Suchen geeigneter Mikrofonpositionen dienen. Eine oftmals gut funktionierende Ausgangsposition liegt auf der Höhe des Hals-Korpus-Übergangs in einer Entfernung zwischen 40 – 100 cm. Darüber hinaus ist der Experimentierfreude keine Grenzen gesetzt. So zeigten beispielsweise die Untersuchungen von (Bartlett 1981), dass eine Mikrofonposition von oben senkrecht über der Decke auf Höhe des Stegs hinab in einem Abstand von 15cm zufällig zu einem sehr ausgewogenen Klang führen kann.

Ist wird eine Mikrofonierung in Stereo angestrebt, gibt es keine einheitliche Empfehlung. Es muss auch betont werden, dass es sich bei der Verwendung zweier Mikrofone an verschiedenen Positionen der Gitarre strenggenommen mehr um eine Multimikrofonierung handelt, da die Gitarre kein definiertes Stereopanorama besitzt sondern schlicht Abschnitte mit unterschiedlichem spektralen Projektionsverhalten. Ein Klavier bietet mit seiner breitflächigen Anordnung der Saiten eine recht klare Vorlage für ein Stereopanorama, die Gitarre mit ihren eng beieinander liegenden Saiten dagegen weniger. Der gewünschte Effekt eines breiteren, räumlichen Klangbildes wird sich natürlich dennoch einstellen, wenn zwei verschiedene Mikrofonpositionen eingesetzt werden, die entweder beide für sich ausgewogen klingen oder sich gegenseitig gut ergänzen. Auch zusätzlich extern angebrachte Kontaktmikrofone in Mono oder Stereoanordnung können interessante Signale liefern.

Wie bei allen Zupfinstrumenten profitiert auch der Klang der Gitarre von Hall, weswegen sich bei guter Akustik zusätzlich auch weiter entfernte Raummikrofone anbieten. Dabei sollte tatsächlich auf das Eigenrauschen der eingesetzten Mikrofone geachtet werden. Das äquivalente Eigenrauschen hochwertiger Studiomikrofone entspricht zwar in aller Regel höchstens einem mehr oder weniger leisen Flüstern, eine klassische Gitarre in einigen Metern Entfernung bei einer pianissimo Stelle allerdings auch!

8.2 Spezielle Aspekte

8.2.1 Saiten

Es sollte nicht notwendig sein, dass der Tontechniker die Musiker daran erinnert, rechtzeitig vor einer Studioaufnahme frische Saiten auf ihr Instrument aufzuziehen. Gerade bei Hobbyisten wird dieser Punkt allerdings immer wieder vernachlässigt. Dabei ist der Effekt enorm: Frische Saiten und ihr brillanter Klang sind fast immer ein Aha-Erlebniss nach dem Wechseln der alten, stumpf klingenden Saiten. Dass dieser Effekt je nach Spieler und Spieldauer schon nach wenigen Tagen oder Wochen wieder abnimmt, liegt keineswegs daran, dass man sich an den guten Klang gewöhnt hat. Es hat schlicht damit zu tun, dass sich schon wieder Schmutz in die Rillen der umwickelten Basssaiten setzt, wodurch ihr Schwingverhalten bei den höheren Obertönen gedämpft wird, und der Klang dumpfer wird. Ab einem gewissen Punkt sprechen manche auch davon, dass die Saiten „tot“ klingen.

Einen längeren Schutz gegen diesen Alterungseffekt bieten beschichtete Saiten, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Am effektivsten sind Saiten, bei denen die

ganze Saite beschichtet ist und nicht nur beispielsweise der Wickeldraht. Lange Zeit hatte der Vorreiter Elixir das alleinige Patent auf dieses Verfahren und hat es damit zum Marktführer bei beschichteten Saiten gebracht. Da dieses Jahr die ersten Patente auslaufen, darf man gespannt sein, wie sich der Markt der beschichteten Gitarrensaiten in Zukunft entwickelt.

8.2.2 Stimmen

Die Tonhöhe einer laut gespielten Saite verändert sich im ersten Moment nach dem Anschlagen. Sie beginnt etwas überhöht und fällt dann schnell auf die eigentliche Tonhöhe ab, die daraufhin stabil bleibt. Es ist daher wichtig, dass man nach dem Anspielen immer einen kurzen Moment wartet, bis man die Stimmung korrigiert, insbesondere wenn man sich nur auf die optische Anzeige eines Stimmgerätes verlässt. Außerdem sollte in diesem Fall für alle Instrumente einer Gruppe dasselbe Stimmgerät verwendet werden, um kleine Abweichungen der Stimmgeräte untereinander auszuschließen. Bei klassischen Gitarren Ensembles wird häufig so vorgegangen, dass nur eine Gitarre nach externer Referenz gestimmt wird, und alle anderen Gitarren daraufhin nach Gehör an dieses Instrument angeglichen werden, um eine möglichst konsistente Stimmung zu erreichen.

8.2.3 Die Blindsaite

Als Blindsaite bezeichnet man den Teil der Saite, der mit dem Finger der linken Hand abgeklemmt wird. Auch er kann versehentlich zum Mitschwingen angeregt werden, diese Schwingungen werden aber nicht auf den Korpus übertragen. Trotzdem kann hier die Ursache für Störgeräusche wie beispielsweise Schnarren liegen, wenn die Saitenlage der Gitarre nicht gut eingestellt ist.

Außerdem tritt die Blindsaite recht deutlich zu tage, wenn in großem Stil „Tapping“ Techniken angewendet werden, bei denen mit dem Finger der linken Hand so stark auf die Saite aufgeschlagen wird, dass sie hörbar schwingt ohne mit der rechten Hand gespielt werden zu müssen. In diesem Fall wird auch die Blindsaite stark angeregt und das mit einer Frequenz, die meist nicht Teil der Tonleiter ist. Stört man sich in der Aufnahme daran, kann man beispielsweise die Ausrichtung des Mikrofons entsprechend ändern, oder tatsächlich auf das interne Mikrofon oder gar einen Pickup zurückgreifen, der diesen Teil der Saite wegen seiner Position nicht wahrnehmen kann.

9 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die verfügbare Technik bei richtigem Einsatz durchaus fähig ist, die gegensätzlich scheinenden Anforderungen von natürlichem Klang und hoher Sicherheit gegen Übersprechen und Feedback im Live Einsatz zu realisieren. Bei moderater Bühnenlautstärke liegt die Lösung in der Verwendung eines hochwertigen Kombinationssystems, gegebenenfalls mit einem geschlossenen Feedback Reducer im Schallloch. Bei sehr hohen Lautstärken können Akustikgitarren mit under-saddle Transducer und Mikrofonsimulation eingesetzt werden, sofern man auf Perkussion zu verzichten bereit ist.

Im Studio steht einer guten Mikrofonaufnahme ohnehin nichts im Wege, hier kann das Wissen um das Projektionsverhalten der Akustikgitarre die Auswahl geeigneter Abnahmeverfahren erleichtern. Dass eine Mikrofonabnahme hier auch der besten Mikrofonsimulation überlegen ist, zeigt sich mindestens an dem Punkt des hochfrequenten Direktschalls der Saiten und der Wiedergabe der Transienten beim Anschlagvorgang. Diese Details können letztendlich den Unterschied ausmachen, ob der Zuhörer bei der Wiedergabe das Gefühl hat, eine gute Aufnahme einer Akustikgitarre zu hören oder das Gefühl, dass plötzlich ein Gitarrist im Raum ist.

Zu guter Letzt folgt noch die übliche Bemerkung, dass keine einheitliche Definition eines „guten Klanges“ existiert sondern dieser an die Vorstellung und Erwartung des Zuhörers geknüpft ist. Das einzig „richtige“ Tonabnahme Verfahren hängt daher auch immer zu großen Teilen vom Musikstil, der Rolle der Gitarre in der Gruppe und von der Beschallungslautstärke ab. Wir sind in diesem Thema heute an einem Punkt angelangt, wo viele technische Möglichkeiten weit genug ausgereift sind, so dass sich in fast allen Szenarien gute Ergebnisse erzielen lassen, wenn man weiß was man tut.

Für die zukünftige Entwicklung ist es wahrscheinlich, dass die Verbreitung von Abnahmesysteme mit under-saddle Transducern und Mikrofonsimulation weiter zunehmen wird, die anderen Tonabnehmersysteme aber niemals überflüssig machen kann, da nur diese in der Lage sind live Perkussion wiederzugeben. Und wenn hier bemängelt wird, dass man bei extremer Beschallungslautstärke im Einzelfall auch mal auf die naturgetreue Wiedergabe des leisen und hochfrequenten Direktschalls der Saiten verzichten muss, dann ist das sprichwörtlich Jammern auf hohem Niveau.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Benennung der Grundbestandteile einer akustischen Gitarre, aus [1].....	7
Abbildung 2	Rechte Hand eines klassischen Gitarristen, aus [2]	12
Abbildung 3	Handhaltung beim Jazzkontrabass, aus [3]	14
Abbildung 4	Ausbreitung einer Wanderwelle auf einer Saite, aus (French 2009).....	15
Abbildung 5	Aufbau einer umwickelten Gitarrensaite, aus (French 2009).....	17
Abbildung 6	Modell der Gitarre und ihrer Schallabstrahlung	18
Abbildung 7	Stehende Wellen einer Saite, aus (French 2009).....	19
Abbildung 8	Die ersten vier Eigenmoden der klassischen Gitarre, aus (French 2009).....	21
Abbildung 9	Grafischer EQ, aus [4]	24
Abbildung 10	Frequenzabhängige Richtcharakteristik eines Mikrofons, aus [5].....	26
Abbildung 11	Typische Mikrofonposition bei kurzer Entfernung, aus [6]	28
Abbildung 12	Position eines under-saddle Transducers, aus [7].....	30
Abbildung 13	Grundstruktur von ETMF, aus (Backman 1990).....	35
Abbildung 14	Struktur eines koaxialen Transducers, aus (Fishman 2004).....	36
Abbildung 15	Querschnitt des Stegs mit ovalem Transducer, aus (French 2009).....	37
Abbildung 16	Yamaha „Silent Guitar“, aus [8].....	40
Abbildung 17	Gängige Position für ein Kontaktmikrofon, aus [9]	42
Abbildung 18	Beispiel für ein MEMS, aus (O'Reilly et al. 2009).....	44
Abbildung 19	Einsetzen eines Feedback Reducers, aus [10]	46
Abbildung 20	Magnetischer Tonabnehmer an einer Westerngitarre, aus [11].....	48
Abbildung 21	Ersatzschaltbild von Transducer und Eingangsimpedanz	51
Abbildung 22	Typischer Vorverstärker in der Zarge mit Klangregelung, aus [12].....	53
Abbildung 23	Shaker zur Anregung einer Gitarre, aus (Romá et al. 2008)	58
Abbildung 24	Professioneller Impulshammer, aus [13].....	58
Abbildung 25	Anregung einer Gitarre mit einem Impulshammer, aus (French 2009).....	60
Abbildung 26	Beispiel für eine Match EQ Kurve, aus [14].....	61
Abbildung 27	Beispiel für ein Kehlkopfmikrofon aus dem 2. Weltkrieg, aus [15]	66

Literaturverzeichnis

- Alan Hofer, George J. Sebesta, Abraham B. Cohen. „New Ceramic Inertial Pickup for String Instruments with Mass-Controlled Frequency Response Adjustments.“ *Presented at the 52nd AES Convention*. 1975.
- Axel Nackaerts, Bart De Moor, Rudy Lauwereins. „Measurement of Guitar String Coupling.“ *Submitted to the International Computer Music Conference (ICMC)*. 2002.
- Backman, Juha. „Audio Applications of Electrothermomechanical Film (ETMF).“ *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 38, No. 5, Mai 1990.
- Balázs Bank, Giovanni De Poli, László Sujbert. „A Multi-Rate Approach to Instrument Body Modeling for Real-Time Sound Synthesis Applications.“ *Presented at the 112th AES Convention*. 2002.
- Bartlett, Bruce A. „Tonal Effects of Close Microphone Placement.“ *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 29, No. 10, 1981.
- Cumhur Erkut, Vesa Välimäki, Matti Karjalainen, Mikael Laurson. „Extraction of Physical and Expressive Parameters for Model-Based Sound Synthesis of the Classical Guitar.“ *Presented at the 108th AES Convention*. 2000.
- Damiano, Paul J. Feedback Reducer for an Acoustic Electric Guitar. Patent US 4,394,830. 1983.
- Dickreiter, Michael, Volker Dittel, Wolfgang Hoeg, und Martin Wöhr. *Handbuch der Tonstudiotechnik*. Bd. 1. 2 Bde. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2014.
- Fishman, Lawrence R. Coaxial Musical Instrument Transducer. Patent US 6,677,514 B2. 2004.
- Fraden, Jacob. *Handbook of Modern Sensors*. Springer-Verlag, 2004.
- French, Richard Mark. *Engineering the Guitar - Theory and Practice*. Springer Science+Business Media, 2009.
- Görne, Thomas. *Tontechnik*. Carl Hanser Verlag München, 2011.
- Henri Penttinen, Matti Karjalainen, Tuomas paatero, Hanna Järveläinen. „New Techniques to Model Reverberant Instrument Body Responses.“ 2001.

- Hiroyuki Naono, Toshiyuki Gotoh, Michio Matsumoto, Sauoru Ibaraki. „Design of an Electro-Acoustic Transducer Using Piezoelectric Polymer Film.“ *Presented at the 58th AES Convention*. 1977.
- J.C.S. Lai, M.A. Burgess. „Radiation efficiency of acoustic guitars.“ *J. Acoust. Soc. Am.* 88 (3), September 1990.
- Klapholz, Jesse. „High Polymer Piezo Film in Electroacoustical Transducer Applications.“ *Presented at the 79th AES Convention*. 1985.
- Lähdevaara, Jarmo. *The Science of Electric Guitars and Guitar Electronics*. 2012.
- Lazarus, Arnie. „The Use of the FRAP (Flat Response Audio Pickup) in Professional Recording.“ *Presented at the 48th AES Convention*. 1974.
- Leo Guadagnin, Bertrand Lihoreau, Pierrick Lotton, Emmanuel Brasseur. „Analytical Modeling and Experimental Characterization of a Magnetic Pickup for Electric Guitar.“ *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 65, No. 9, 2017.
- Matti Karjalainen, Henri Penttinen, Vesa Välimäki. „Acoustic Sound from the Electric Guitar Using DSP Techniques.“ 2000.
- Matti Karjalainen, Henri Penttinen, Vesa Välimäki. „More Acoustic Sounding Timbre from Guitar Pickups.“ 1999.
- Matti Karjalainen, Vesa Välimäki, Henri Penttinen. „DSP Equalization of Electret Film Pickup for the Acoustic Guitar.“ *Presented at the 106th AES Convention*. 2000.
- Matti Karjalainen, Vesa Välimäki, Zoltán Jánosy. „Towards High-Quality Sound Synthesis of the Guitar and String Instruments.“ *International Computer Music Conference*. 1993.
- Miguel Romá, Luis Gonzáles, Francisco Briones. „Software Based Acoustic Guitar Simulation by Means of its Impulse Response.“ *10th Meeting on Audio Engineering of the AES Portugal*. 2008.
- Miikka Tikander, Henri Penttinen. „Sound Quality Differences between Electret Film (EMFIT) and Piezoelectric Under-Saddle Guitar Pickups.“ *Presented at the 120th AES Convention*. 2006.
- Mika Paajanen, Jukka Lehtala, Kari Kirjavainen. „ElectroMechanical Film (EMFi) - a New Multipurpose Electret Material.“ *Elsevier Sensors and Actuators 84*, 2000.

- Mikael Laurson, Vesa Välimäki, Cumhur Erkut. „Production of Virtual Acoustic Guitar Music.“ *AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio*. 2002.
- Nourney, C. Ernst. „Strain-Gauge Sensors Eliminate Acoustic Feedback in Amplified Acoustic Stringed Instruments.“ *J. Audio Eng. Soc. Vol. 30, No. 3*, März 1982.
- Perry R. Cook, Dan Trueman. „A Database of Measured Musical Instrument Body Radiation Impulse Responses, and Computer Applications for Exploring and Utilizing the Measured Filter Functions.“ 2014.
- Räisänen, Heikki Eero. Transducer and Method for Forming a Transducer. Patent US 6,689,948 B2. 2004.
- Rob O'Reilly, Alex Khenkin, Kieran Harney. „Sonic Nirvana: Using MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments.“ *Analog Dialogue 43-02*, Februar 2009.
- Rogers, Wayne A. Triad Pickup. Patent US 7,015,390 B1 . 2006.
- S. Kärki, T. Salpavaara, J. Lekkala. „EMFi in Wearable Audio Applications .“ *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks* , 2007.
- Satu Rajala, Jukka Lekkala. „PVDF and EMFi Sensor Materials – A Comparative Study.“ *Elsevier Procedia Engineering 5*. 2010.
- Sessler, G. M. „New Acoustic Sensors.“ *Presented at the 94th AES Convention*. 1993.
- Teja Gerken, Michael Simmons, Frank Ford, Richard Johnston. *Akustische Gitarren: Alles über Konstruktion und Historie*. 2013.
- Veit, I. „The Piezoelectric PVDF-Film - It's Properties and Application in Electroacoustic Transducers.“ *Presented at the 84th AES Convention*. 1988.
- Vesa Välimäki, Jyri Huopaniemi, Matti Karjalainen, Zoltán Jánosy. „Physical Modeling of Plucked String Instruments with Application to Real-Time Sound Synthesis.“ *Presentet at the 98th AES Convention*. 1995.
- Vesa Välimäki, Tero Tolonen. „Development and Calibration of a Guitar Synthesizer.“ *Presented at the 103rd AES Convention* . 1997.
- Williams, Sandy. *Live Sound for Guitar*. Cengage Learning, 2015.

Internetquellen

- [1] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Acoustic_guitar-de.svg
- [2] <http://www.jasonwerkema.com/resources/classical-guitar/>
- [3] <https://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/kontrabass-kaufberater.html>
- [4] <https://www.music-town.de/KLARK-TEKNIK-DN-370-High-End-Grafik-Equalizer::21867.html>
- [5] <http://digitalsoundandmusic.com/1-5-setting-up-your-work-environment/>
- [6] <http://www.samash.com/slg200n-nylon-string-silent-guitar--yslg200nx-p>
- [7] <https://www.amazon.com/AP-1-Portable-Pickup-Acoustic-Instruments/dp/B01DK7SZOW>
- [8] <http://www.dpamicrophones.com/DPA/media/DPA-Manual/dvote-4099-Instrument-Microphones-Users-Manual.pdf?ext=.pdf>
- [9] <https://www.gear4music.be/de/Gitarre-and-Bass/Fishman-AGX-094-passiven-dunne-Undersaddle-Tonabnehmer-klassische-12-String/O95>
- [10] <https://www.stringsandbeyond.com/plwaschaguso.html>
- [11] <https://www.stringsandbeyond.com/lr-m1-active.html>
- [12] http://www.bluestarmusic.com/B-Band-A5T-22R-Guitar-PreampEQ-wPickup-Tuner-Notch_p_169.html
- [13] <http://www.sensoren.de/pdf/Hammerauswahlhilfe.pdf>
- [14] <https://ask.audio/articles/mixing-tips-how-to-improve-your-di-acoustic-guitar-recordings/>
- [15] <https://www.ima-usa.com/products/original-wwii-1937-german-luftwaffe-lkp-s101-summer-pilot-flying-helmet-with-throat-microphone-and-earphones?variant=26168665669>

Sämtliche Internetquellen wurden zuletzt abgerufen am 20.12.2017.

Anhang 1

Messung der Unterschiede in der Balance der einzelnen Saiten zueinander bei der Tonabnahme über einen piezokeramischen under-saddle Transducer gegenüber einem Mikrofon an fester Position.

Für die Messung wurde jede Saite mehrfach bei unterschiedlichen Lautstärken angeschlagen, während die anderen Saiten abgedämpft sind. Daraufhin wird aus den Audiofiles jeder Saite der Effektivwert (RMS nach AES-17) jeweils von Piezosignal und Mikrofonsignal bestimmt und deren Differenz gebildet. Die rechte Zeile zeigt diese Differenz normalisiert, so dass die schwächste Saite 0 dB entspricht.

Saite	RMS Piezo (dBFS)	RMS Mic (dBFS)	Differenz (dB)	Normalisiert (dB)
e	-39.00	-43.05	4,05	0
h	-44.15	-52,54	8,39	4,34
G	-43,29	-49,94	6,65	2,61
D	-47,18	-57,90	10,72	6,67
A	-47,95	-53,92	5,97	1,92
E	-47,81	-54,33	6,52	2,47

Es zeigt sich, dass die D-Saite über 6 dB lauter ist als die leiseste Saite, die hohe e-Saite und die Balance der anderen Saiten recht willkürlich dazwischen schwankt.

Dieses Ergebnis ist rein individuell auf die untersuchte Gitarre zu beziehen und bedeutet nicht, dass das Problem bei jedem Exemplar zu Tage treten muss. Es zeigt lediglich, dass es existiert.