

## 1.5 Das Anzupfen

Die Gitarrensaite wird mit dem Finger (-nagel) oder mit einem Plektrum angezupft. Die folgenden Berechnungen und Messungen beschreiben die **Plektrumanregung**, weil sie bei Elektrogitarren dominiert.

### 1.5.1 Dispersions-Entfaltung

Gegenüber der Saitenschnelle ist die Plektrumgeschwindigkeit relativ langsam, das Zur-Seite-Drücken der Saite kann als quasistationär betrachtet werden. Für tieffrequente Bewegungen wirkt die Saite wie eine Feder mit einer Quersteifigkeit  $s_Q$ , die von der Mensur  $M$ , der Spannkraft  $\Psi$ , und der Distanz  $x$  zwischen Anzupfort und Steg abhängt:

$$s_Q = \frac{\Psi}{M} \cdot \frac{M/x}{1-x/M} \quad \text{Quersteifigkeit}$$

Üblicherweise liegt der Anzupfort ca. 6 – 10 cm vom Steg entfernt, damit ergibt sich eine Quersteifigkeit von ungefähr 1000 – 2000 N/m. Mit einer typischen Auslenkung von 2 mm erhält man eine potentielle **Anregungsenergie** von 2 – 4 mWs. Wesentlich größere Energien sind wegen des Abstandes Saite / Griffbrett kaum erreichbar, kleinere Energien bei schwachem Anschlag schon. Da die Quersteifigkeit aller 6 Saiten ähnlich groß ist, ist auch die Anregungsenergie aller Saiten vergleichbar.

Die Anregungsenergie wird zunächst in der Saite in Schwingungsenergie umgesetzt, die zum einen als Luftschallenergie abgestrahlt wird, zum anderen direkt in Wärme umgewandelt wird. Würde die ganze Schwingungsenergie in der Saite verbleiben, so würde sich diese beim einmaligen Anzupfen um etwa 1/1000 Grad erwärmen – nicht gerade viel. Eine gute Akustik-Gitarre wandelt einen beachtlichen Teil der Schwingungsenergie in Luftschall um, was im reflexionsarmen Raum in 1 m Abstand immerhin zu Spitzenschallpegeln von knapp 90 dB führt. Messungen an einer Martin D45V ergaben eine **Luftschallenergie** von ca. 1 mWs. Dies ist aber nur ein Orientierungswert, da Bündelung und Anschlagstärke nicht exakt bestimmt wurden – die Untersuchung akustischer Gitarren ist nicht das eigentliche Ziel.

Bei der messtechnischen Analyse einer Saitenschwingung sind mehrere Systeme zu unterscheiden: Generator, Saite, Tonabnehmer. Mit dem **Generator** wird die Saitenanregung beschrieben. Idealerweise erfolgt beim Anzupfen ein Kraftsprung, in der Realität zeigen sich je nach Plektrumbewegung Unterschiede zum idealen Sprung. Die **Saite** kann für die ersten Millisekunden gut als verlustfreie, dispersive, homogene Leitung beschrieben werden, für längere Beobachtungen muss eine zu hohen Frequenzen zunehmende Dämpfung berücksichtigt werden. Der **Tonabnehmer** wandelt die mechanischen Schwingungen in elektrische Signale um. Seine Empfindlichkeit ist von der Schwingungsebene der Wellen abhängig, und zusätzlich ist eine deutliche Frequenzabhängigkeit zu beobachten. Der Begriff Tonabnehmer ist zunächst sehr weit gefasst und beinhaltet alle Frequenzabhängigkeiten, die nicht direkt vom Anzupfen oder von der Biegebewegung kommen; u.U. ist hier eine weitere Aufspaltung in Subsysteme erforderlich.

Aufgabe der vorliegenden Untersuchungen war, das Übertragungsverhalten der o.g. Systeme zu beschreiben. Da alle drei interagieren (der Anzupfvorgang kann ohne Saite nicht analysiert

werden, der Tonabnehmer wirkt auf die Saite zurück), war eine isolierte Systemanalyse nicht möglich. Teilweise setzt auch die Schwingungs-Messtechnik Grenzen, insbesondere wenn bis 10 oder sogar 20 kHz analysiert werden soll.

Die folgenden Messungen wurden an der bereits erwähnten Ovation Viper durchgeführt, die Saite wurde unter realitätsnahen Bedingungen (in situ) mit einem **Plastik-Plektrum** angezupft. In grober Näherung kommt es hierbei zu einer sprungförmigen Krafteinprägung, genauere Untersuchungen zeigen aber signifikante Abweichungen vom idealen Sprung. Die Probleme bereitet weniger der **Sprung** selbst, der natürlich nicht beliebig schnell ablaufen kann (natura non facit saltus), sondern der Kraftverlauf vor dem eigentlichen Sprung. Zunächst drückt das Plektrum relativ langsam die Saite zur Seite (sic!). Kurz vor dem Sprung beginnt zwischen Saite und Plektrum eine Relativbewegung, bei der Gleit- und Haftreibung abwechseln können (Slip-Stick). Die Kraft schwankt hierbei in schneller Folge. Wenn sich das Plektrum von der Saite getrennt hat, führt es eine gedämpfte Eigenschwingung aus, die zu einem nochmaligen kurzen Kontakt mit der Saite führen kann. Die an der Plektrumspitze übertragenen Kräfte sind kaum direkt messbar, insbesondere nicht bis 20 kHz. Das Piezosignal lässt aber Rückschlüsse auf das Anregungssignal zu.

Die gesamte Übertragungsstrecke wird zur Beschreibung in drei Subsysteme unterteilt: In ein **Plektrumfilter**, das aus einem idealen Sprung den realen Kraftverlauf formt, ein **Saitenfilter**, das die dispersive Biegewellenausbreitung nachbildet, und ein **Piezofilter**, das die Übertragungscharakteristik des Tonabnehmers (incl. angekoppelter Resonatoren) nachbildet. Wenn nicht nur die Sprungübertragung, sondern auch Reflexionen interessieren, ist eine rekursive Struktur erforderlich (Kap. 2.8).

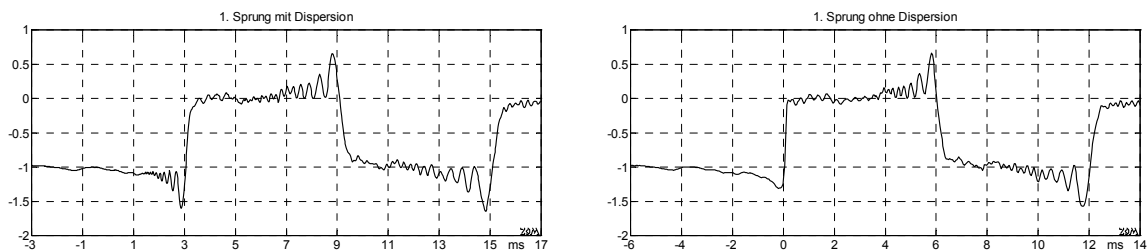
Die einzelnen Filter werden als linear angesehen, was zumindest für schwaches Anzupfen zutreffen müsste. Das Piezofilter ist darüber hinaus auch zeitinvariant. Die Saite ist's definitiv nicht, eine alte Saite zeigt eine wesentlich stärkere Höhendämpfung als eine neue. Innerhalb einer Versuchsserie kann aber bezüglich der Saite von Zeitinvarianz ausgegangen werden, sofern keine Verstimmung auftritt. Auch der schlecht reproduzierbare Anzupfvorgang ist zeitvariant; akzeptable, wenn auch nicht ideale Reproduzierbarkeit erreicht man mit mechanischen Vorrichtungen.

Das Gesamtsystem zwischen Sprunganregung und Piezosignal wird durch eine Gesamt-Übertragungsfunktion und eine Gesamt-Sprungantwort (bzw. –Impulsantwort) beschrieben. Eine exakte Auftrennung in die einzelnen Subsysteme ist ohne Zusatzwissen nicht möglich. Unter der Annahme einschränkender Bedingungen ist es aber möglich, angenäherte Übertragungseigenschaften zu bestimmen.

Die ersten Überlegungen gelten der dispersiven Wellenausbreitung. Die Frequenzabhängigkeit der Gruppenlaufzeit konnte durch Kurzzeitspektroskopie bereits dargestellt werden, die Übereinstimmung zwischen physikalischer Erklärung (Biegebalken) und Messung ist gut. Messungen des zeitlichen Teiltonpegelverlaufs zeigen während der ersten Millisekunden nur sehr wenig Dämpfung, so dass die Annahme eines verlustfreien Allpasses gerechtfertigt ist.

Die folgenden Betrachtungen betreffen eine tiefe E-Saite, die in der Mitte mit einem Plektrum angezupft wird. Während der Sprung von der Saitenmitte zum Steg läuft, ändern sich zwar nicht die Teiltonpegel, aber die Phasen werden verdreht, so dass der Sprung auseinandergezogen wird (Abb. 1.16). Dreht man nun mit einem **inversen Filter** alle Phasen zurück, so

erscheint der Sprung wieder – allerdings verfälscht durch das Piezofilter, und nach kurzer Zeit überlagert von der Sattelreflexion (**Abb. 1.25**). Das Zurückdrehen der Phase entspricht einem **Entfalten** mit der Allpass-Impulsantwort, bzw. einer Multiplikation mit der inversen Allpass-Übertragungsfunktion. Zu beachten ist, dass nur für *eine* Leitungslänge (z.B.  $L/2$ ) entfaltet werden kann; deshalb zeigen die in Abb. 1.25 später folgenden Sprünge immer noch Allpassverzerrungen. Durch die Entfaltung wird der auf den Zeitbereich 1 – 3 ms gedehnte Sprung auf den Zeitnullpunkt konzentriert. Das davor liegende Signal ist die Plektrum-Anregung, gefaltet mit der Impulsantwort des Piezofilters. Und hier wird's schwierig: Plektrumfilter und Piezofilter lassen sich ohne Annahmen nicht trennen. Es gibt unendlich viele Möglichkeiten, ein Produkt in zwei Faktoren zu zerlegen.

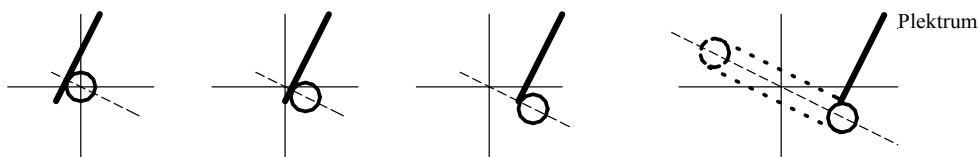


**Abb. 1.25:** Original-Piezosignal (links), entfaltetes Piezosignal (rechts); tiefe E-Saite, in der Mitte angezupft.

Für das prinzipielle Verständnis des Anzupfvorganges ist die genaue Systemtrennung aber gar nicht nötig, man erhält eine gute Näherung, wenn man den Signalverlauf vor dem 1. Sprung als Plektrumanregung definiert. Für genauere Analysen sind Messungen mit dem Laser-Vibrometer in Vorbereitung.

Bereits die einfache Auswertung vieler Anzupfvorgänge offenbarte verschiedene Mechanismen zur Schwingungsbeeinflussung:

- Der Abstand zwischen Anzupfort und Steg ist für charakteristische Kammfilter verantwortlich; dies wird später noch ausführlich diskutiert.
- Form und Härte des Plektrums beeinflussen die Höhenwiedergabe.
- Der Anstellwinkel des Plektrums beeinflusst die Tiefenwiedergabe.
- Prellen und Slip-Stick führen zu Kammfilterungen.



**Abb. 1.26:** Saitenbewegung bei reibungsfreier Plektrumanregung; Gitarrendecke horizontal (Schnittbild).

In **Abb. 1.26** sind von links nach rechts vier aufeinanderfolgende Zeitpunkte aus einem Anzupfvorgang dargestellt. Die Gitarrendecke liegt horizontal, das Plektrum wird hierzu parallel geführt. Im linken Bild berührt das Plektrum die Saite ohne Kraftübertragung. Im zweiten Bild wird die Saite längs einer Linie ausgelenkt, die durch den Saitennullpunkt geht und senkrecht zum Plektrum steht. Im dritten Bild ist die Auslenkung weiter fortgeschritten, und im vierten Bild beginnt die Saite gerade, das Plektrum zu verlassen und längs der gestrichelten Bahn zu schwingen. Für den ganzen Vorgang ist Reibungsfreiheit angenommen.

Für konstante horizontale Plektrumgeschwindigkeit ergibt sich eine sägezahnförmige Saitenauslenkung. Ein im Steg eingebauter Piezotonabnehmer reagiert (wie auch übliche Spulentonabnehmer) hauptsächlich auf deckennormale Bewegungen, deshalb ist nur die vertikale Schwingung von Bedeutung. Für die langsame Plektrumbewegung wirkt die Saite federnd, die Vertikalkraft ist proportional zur Vertikalauslenkung, beide nehmen zeitproportional bis zum Maximalwert zu, danach bricht die Anregungskraft spontan auf null zusammen.

In der Realität wird sich das Plektrum nicht genau horizontal bewegen, sondern durch die Kontaktkräfte nach oben abgelenkt werden. Auch wird sich sein Anstellwinkel ändern, und bei dünnen Plektren kommt es außerdem zur Verbiegung. Die Gleitreibung zwischen Saite und Plektrum erlaubt auch kleine Abweichungen von der gestrichelten Linie, wobei es zu stochastischen **Slip-Stick**-Bewegungen kommen kann. Ursache hierfür ist der Unterschied zwischen Gleit- und Haftreibung: Wenn die plektrumparallele Saitenkraft größer wird als die Haftreibungskraft, setzt zwischen Plektrum und Saite eine Relativbewegung längs des Plektrums ein. Da die kleinere Haltekraft der Gleitreibung nun deutlich überschritten ist, kann die Saite über eine kleine Distanz verrutschen, bevor sie von der (größeren) Haftreibungskraft wieder eingefangen wird.

In Abb. 1.26 ist das Plektrum unter einem Winkel von ca.  $63^\circ$  gegen die Decke geneigt, aber parallel zur Saitenlängsachse. Je kleiner dieser Anstellwinkel wird, desto leichter kann die Saite kontinuierlich nach unten rutschen. Vergrößert man diesen Winkel aber auf  $90^\circ$ , stellt also das Plektrum senkrecht zur Gitarrendecke, so wird die Saite zunächst nur horizontal zur Seite geschoben, ohne Vertikalbewegung. Irgendwann muss das Plektrum nachgeben – entweder es weicht nach oben aus, oder es verbiegt sich bzw. ändert seinen Winkel, so dass die Saite nach unten ausweichen kann. Der hierzu gehörende vertikale Anregungsimpuls dauert kürzer als bei schräg gestelltem Plektrum, das Ausweichen klappt sozusagen erst in der letzten Millisekunde.

Wenn das Plektrum nicht genau parallel zur Saitenlängsachse gehalten wird, sondern leicht schräg dazu, so ändert sich die Reibung, weil nun die Saite nicht mehr an der Plektrumfläche entlang gleitet, sondern den Plektrumrand entlang rutscht. Dieser Rand ist zumeist aufgeraut, was den stochastischen Anteil bei der Anregung erhöht; bei umsponnenen Saiten wird dieser Effekt noch vergrößert.

Ein Gitarrist hat somit viele Möglichkeiten, den Anregungsimpuls und somit den Klang der Gitarre zu verändern. Dies beginnt bei der Auswahl des Plektrums, seiner freien Länge, seinem Winkel gegenüber der Gitarrendecke, und seinem Winkel gegenüber der Saitenlängsachse. Zusätzlich zum Plektrum kann beim Anzupfen die Fingerkuppe in Kontakt mit der Saite kommen (auch Zähne werden gerne genommen ...), dann kann noch der Anzupf-ort variiert werden, und natürlich die Anzupf-Stärke.

Für die systemtheoretische Beschreibung der Saite ist eine einfache, sprungförmige Anregung zweckmäßig. Da auch die Bewertung der Reproduziergenauigkeit mit dieser Anregung relativ leicht gelingt, war sie die Grundlage vieler Messungen. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die ideale Sprunganregung auch für den Gitarrist ein erstrebenswertes Ziel darstellt.