

7.4 Saitendynamik

An dieser Stelle steht *Dynamik* nicht im Gegensatz zu *Statik*, sondern weist im Sinne von *Dynamis* auf die an der Saite angreifenden Kräfte hin. Dieses Thema wurde schon in Kap. 1 und 2 beschrieben, aber eher theoretisch, ohne Bezug zu einer speziellen Saitenlagerung. In Kap. 7.4.1 erfolgt nun die Analyse der realen Spielsituation, wenn der Finger der Greifhand die Spielkraft F aufbringen muss, um die Saite herunterzudrücken bzw. um Bendings zu erzeugen (die Saite zu "ziehen"). Da die Saite hierbei bis zum Bund ausgelenkt werden muss, kommen zwei Themenkreise zusammen: Die Saitendynamik und die Gitarrengeometrie. In Kap. 7.4.2 folgt die Betrachtung der von der Saite auf die Lager (Steg- und Kopfsattel) übertragenen Kräfte, sowohl im statischen Zustand, als auch bei der schwingenden Saite.

7.4.1 Spielkräfte

Die Finger müssen beim Niederdrücken der Saite die quer zur Saitenrichtung verlaufende Kraft F aufbringen. Nimmt man als Beispiel an, dass eine Saite am 12. Bund in Querrichtung um die Distanz η ausgelenkt werden soll, so beträgt die hierfür aufzuwendende Querkraft F :

$$F = 4 \cdot \Psi \cdot \eta / M \qquad \Psi = \text{Spannkraft, } M = \text{Mensur}$$

Die Spannkraft Ψ ergibt sich aus der Schwingungs-Differentialgleichung zu:

$$\Psi = \pi \bar{\rho} \cdot (A \cdot M \cdot f_G)^2 \qquad A = \text{Gesamtdurchmesser, } \bar{\rho} = \text{mittlere Dichte}$$

Hieraus errechnet sich die beim Greifen am 12. Bund aufzuwendende Spielkraft zu:

$$F = 4\pi \bar{\rho} \cdot \eta \cdot M \cdot A^2 \cdot f_G^2 \qquad \text{Kraft zum Niederdrücken der Saite}$$

Die Spielkraft ist proportional zur **Mensurlänge**: Elektrogitarren mit 25,5"-Mensur (648 mm) erfordern um 6,25% höhere Kräfte als 24"-Gitarren (610 mm). Die Spielkraft ist proportional zur **Saitenlage**: Wenn der Abstand zwischen Saite und Bund um 10% vergrößert wird, so erhöht sich die Spielkraft ebenfalls um 10%. Die Spielkraft ist proportional zum Quadrat des **Saitendurchmessers**: Wenn statt einer 9-mil-E-Saite eine 10-mil-E-Saite verwendet wird, so erhöht dies die Spielkraft um 23%. Die Spielkraft ist für alle Saiten dieselbe, wenn sich der Durchmesser reziprok zur Grundfrequenz verhält. Bei den umspinnenen Saiten ist hierbei zu berücksichtigen, dass ihre effektive Dichte um ca. 10% geringer ist als die der massiven Saiten (Anhang A1). Leicht spielbare Saiten erfordern Spielkräfte zwischen 0,5 – 1,5 N, bei dicken Saitensätzen sind die Spielkräfte ungefähr doppelt so groß.

Beim **Saitenziehen** wird die Saite nicht nur gegen den Bund gedrückt, sondern zusätzlich in Querrichtung gedehnt, was zu einer deutlich wahrnehmbaren Tonerhöhung führt. Bei einer schnellen Querbewegung des greifenden Fingers kann hiermit ein Vibrato erzeugt werden, bei langsamen Bewegungen entstehen Glissandi, die häufig einen Ganzton betragen. Da die Saiten-Spannkraft Ψ proportional zum Quadrat der Frequenz verläuft, bedeutet eine Tonerhöhung um einen **Ganzton** eine Spannkraft-Zunahme um 26%. Die Spannkraft ist proportional

zur Dehnung ξ , und die hängt ab von der ganzen Saitenlänge – also auch von dem über Steg und Sattel hinausgehenden Teil. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die an Steg und Sattel auftretende Reibung gering ist. Aus der Dehnung ξ kann auf die nötige Querauslenkung η geschlossen werden, und die lässt sich in die benötigte **Querzugkraft** F_Z umrechnen:

$$F_Z = 11,4 \cdot \sqrt{\frac{\rho^3}{E}} \cdot M^3 \cdot \sqrt{1 + R/M} \cdot f_G^3 \cdot \frac{A^2}{\kappa} \quad \text{Kraft beim Saitenziehen am 12. Bund, +2 HT}$$

Die 'Ziehkraft' hängt von der dritten Potenz der Mensur ab! Der Wechsel von einer 24"-Gitarre auf eine 25,5"-Gitarre vergrößert die Ziehkraft um 20%. Der **Saitenrest** R , also der Teil der Saite, der hinter Steg bzw. Sattel liegt, geht als relative Änderung in die Wurzel ein. Beispielsweise läuft die G-Saite bei der Gretsch 'Tennessean' am 0-ten Bund um 16 cm bis zum Wirbel weiter, und hinter dem Steg kommen noch 11 cm bis zum Bigsby-Vibrato dazu. Die 24,5"-Mensur ($M = 62$ cm) wird hierdurch um $R = 27$ cm auf 89 cm Gesamtlänge vergrößert, das sind 44% mehr als der reinen Mensur entspricht. Die Ziehkraft wächst dadurch um 20% an. Bei der Ziehkraft macht sich auch das Verhältnis von Kern- / Gesamtdurchmesser (κ) bemerkbar, das bei massiven Saiten 1, bei umspannenen Saiten 0,3 ... 0,6 beträgt.

Für niedere Ziehkräfte sollte die Saite möglichst nahe hinter Steg und Sattel enden. Da bei üblichen Saitensätzen die Ziehkraft der E_4 -Saite etwa 50 – 60% größer ist als die der H-Saite, wäre speziell bei der E_4 -Saite ein kurzes Reststück wünschenswert. Bei der Stratocaster ist jedoch (wie bei vielen Fender-Gitarren) die E_4 -Saite die längste von allen – Leo war halt kein Gitarrist. Wer möchte, kann aber eine Linkshändergitarre "auf rechts" umspannen, dann geht's besser. Oder eine Rechtshändergitarre "auf links", nicht wahr Jimi? Auch ein Klemmsattel bringt diesbezüglich eine Verbesserung (Floyd Rose, Schaller, Steinberger).

Typische Ziehkräfte liegen bei dünnen Saiten zwischen 5 – 10 N, wenn man am 12. Bund um einen Ganzton zieht. Da der Saitendurchmesser hierbei quadratisch eingeht, erhält man mit dickeren Saitensätzen schnell (bis zu) doppelt so große Ziehkräfte, und das erfordert schon sehr muskulöse Hände bzw. Unterarme.

Kräftechonender ist die Tonhöhenänderung über den **Vibratohebel** (Tremolo). Er greift am federbelasteten Saitenhalter an und ermöglicht über eine komfortable Hebelübersetzung die Änderung der Saitenspannung, und damit der Tonhöhe. Der Saitenhalter ist hierbei nicht fest am Korpus montiert, sondern beweglich als Rolle oder Schneidenlager ausgeführt. Die Gegenkraft zum Zug der 6 Saiten nehmen 1 – 5 Haltefedern auf. Die wirksame Federsteifigkeit für die Vibratobetätigung ergibt sich als Summe der Saiten-Federsteifigkeiten und der Haltefedersteifigkeit. Soll der Vibratohebel mit wenig Kraft spielbar sein, sind weiche Haltefedern erforderlich. Dadurch erhöhen sich aber die Kräfte für's Saitenziehen. Ein einfaches *Gedankenexperiment* verdeutlicht dies: Angenommen, die Gitarre ist festgeschraubt, und die Saitenspannung kommt durch einen Seilzug von einem Gewicht (z.B. 6 kg für die G-Saite). Wenn **(a)** diese G-Saite gezogen wird, kommt es trotz Kraftaufwendung zu keiner Tonerhöhung, weil die Gewichtskraft ja unverändert bleibt (Lagersteifigkeit = 0). Wenn **(b)** alle 6 Saiten durch ein gemeinsames Gewicht gespannt werden (z.B. 60 kg beim 9er-Satz), ergibt sich die Lagersteifigkeit der G-Saite als Summensteifigkeit der restlichen 5 Saiten. Wenn **(c)** die Spannkraft nicht vom Gewicht, sondern von der Haltefeder kommt, ist die Lager-Federsteifigkeit der G-Saite die Summe aus 5x Saiten- und Haltefedersteifigkeit. Wenn **(d)** der Saitenhalter am Gitarrenkorpus angeschraubt ist, dann ist die Lager-Federsteifigkeit unendlich. Und nur dieser Fall ermöglicht bestmögliches Saitenziehen.

Der erste Fall (a) ist für's Saitenziehen unbrauchbar: Trotz Zugkraft keine Spannkraftänderung. Der letzte Fall (d) ist ideal: Wegen des unnachgiebigen Saitenhalters wird die ganze Zugkraft (über das Kräfte-Parallelogramm) zur Spannkraftänderung verwendet. Dazwischen liegt die Vibrato-Situation: Je steifer (härter) die Vibratofedern, desto besser für's Ziehen. Manche Gitarristen entscheiden sich deshalb für die härteste aller Varianten, und blockieren das Vibrato mit einem Holzblock.

Die meisten Vibrato-Systeme arbeiten nach einem einfachen Prinzip: Wenn der Vibratohebel gedrückt wird, erniedrigt sich die Tonhöhe, wenn er angehoben wird, erhöht sie sich. Dass sich hierbei nicht alle Saiten in gleicher Weise verstimmen, und somit ein Akkord beim Vibrato-Einsatz verstimmt wird, ist die Regel.

Beim **Bigby-Vibrato** ist der Saitenhalter ein Metallzylinder, um den die Saiten geführt werden. Drückt man auf den Vibrato-Hebel, so dreht sich der Zylinder, und alle Saiten werden um dieselbe Strecke verkürzt. Für gleiche Verstimmung müsste sich aber nicht die absolute Dehnung ξ , sondern die relative Dehnung $\Delta\xi/\xi$ um denselben Wert ändern. Da die für korrekte Stimmung benötigten Dehnungen z.B. 1,2 mm (E_2) bzw. 4,8 mm (E_4) betragen, ergibt eine absolut konstante Dehnungsänderung bei der E_2 -Saite die vierfache Verstimmung gegenüber der E_4 -Saite!

Bei der **Stratocaster** ist die Situation geringfügig besser: Die Steg/Saitenhalter-Konstruktion kippt als Ganzes um eine Linie, die – durch zwei Ankerschrauben definiert – kurz vor den Saitenlagerpunkten liegt. Da der Lagerpunkt der E_2 -Saite aber zurückversetzt ist (Kap. 7.2), wirkt die Hebelbewegung auf diese Saite etwas schwächer; sie verstimmt sich deshalb auch weniger als beim Bigby-Vibrato. Groß ist der Gewinn aber nicht: Statt dem Vierfachen verstimmt sich die E_2 -Saite gegenüber der E_4 -Saite nur um das Dreifache. Wenn sich beim Drücken des Vibratohebels alle Saiten um das gleiche Intervall verstimmen sollen, muss für jede Saite eine individuelle Hebelübersetzung wirken, die von den Saitendaten (κ) abhängt. Die Gitarrenbauer sahen hierfür anscheinend keine Notwendigkeit, die Gitarristen auch nicht.

Als typisches Beispiel wurde die **Kraft** gemessen, die am Vibratohebel einer Stratocaster aufgewendet werden muss, um die Tonhöhe um einen Viertelton (2,93%) zu ändern: E_2 : 2,9 N, A: 4,9 N, D: 5,2 N, G: 3,3 N, H: 3,9 N, E_4 : 8,5 N; (9er-Saitensatz, 3 Federn). Die Gitarre war mit allen 6 Saiten bespannt, der Vibratohebel wurde so weit gedrückt, bis bei der betrachteten Saite eine Verstimmung um $\frac{1}{4}$ -Ton erreicht war. Eine grobe Abschätzung zeigt, dass der Hauptanteil der Federsteifigkeit von den Saiten kommt; das Vibrato-System ist nur zu etwa $\frac{1}{3}$ beteiligt, also relativ weich. Der Gitarrist, der eine größere Vibrato-Steifigkeit wünscht, kann aber die Federanzahl von 3 auf 5 erhöhen; der Hersteller hat in der Gitarre hierfür extra Platz gelassen.

Ein Vibrato-System wirkt sich **nachteilig** auf den Stimmprozess aus: Wenn eine Saite auf die richtige Tonhöhe gestimmt ist und die nächste Saite wird gespannt, gibt der federnde Steg nach, und die bereits richtig gestimmte Saite verstimmt sich wieder. Korrektes Stimmen aller 6 Saiten ist somit ein Iterationsprozess. Reißt beim Spielen eine Saite, erhöht sich die Tonhöhe der restlichen Saiten, weil der Zug der gerissenen Saite wegfällt. Nicht zuletzt ist die verringerte **Stimmstabilität** zu nennen: Wegen unvermeidbarer Lagerreibung tritt Hysterese auf. Je nach dem, ob der Vibratohebel aus Druck- oder Zugposition entspannt wird, stellt sich eine unterschiedliche Stimmung ein. Nur bei hochwertigen Systemen sind diese Frequenzabweichungen unhörbar. Auch der **Klang** der Gitarre kann beeinflusst werden: Die federnde Lagerung der Stegmasse führt zu tieffrequenten Resonanzen, und die Federschwingungen können vom Magnetonabnehmer in elektrische Spannung umgewandelt werden.

7.4.2 Auflagekräfte am Sattel

Der mittlere, frei schwingende Teil der Saite wird durch zwei "Auflageleisten" begrenzt. Die obere (kopfseitige) Auflageleiste wird einheitlich **Sattel** (engl. NUT oder TOP NUT) genannt, die untere heißt entweder auch Sattel bzw. **Stegsattel**, oder wird ihrer Form entsprechend bezeichnet (z.B. Rolle, Zylinder, Reiter o.ä.). Für die im Folgenden besprochenen Auflagekräfte wird nicht zwischen den beiden Auflagepunkten unterschieden, und als Oberbegriff nur vom Sattel gesprochen.

Bei der klassischen Gitarrenbauart erfährt die Saite am Sattel einen Knick; sie ändert hier ihre Richtung um den Knickwinkel α (**Abb. 7.10**). Dieses Lagerprinzip haben auch die meisten E-Gitarren übernommen. Als Alternative gibt es den Klemmsattel, der hier nicht betrachtet wird. Die Richtungsänderung führt zu einer räumlichen (vektoriellen) Kraftzerlegung: Außer der Saitenspannkraft Ψ wirkt auch noch die Sattelfkraft F_S , die mit größer werdendem Knickwinkel zunimmt. Für die ersten Betrachtungen wird angenommen, dass die Saite **reibungsfrei** über den Sattel gleiten kann; dann sind die auf beiden Seiten des Sattels auftretenden Spannkraften gleich groß. Die Sattelfkraft berechnet sich hierfür zu:

$$F_S = 2 \cdot \Psi \cdot \sin(\alpha/2) \approx \Psi \cdot \alpha / 57^\circ \quad \text{Sattel-Auflagekraft}$$

Für 850 N Spannkraft (13er-Satz, alle 6 Saiten) erhält man mit 10° Knickwinkel eine Sattelfkraft von 148 N; dies entspricht der Gewichtskraft eines 15-kg-Gewichts. Zu Zeiten, als Gitarren noch keine elektrischen Tonabnehmer hatten, musste zur Erreichung hoher Lautstärke die Gitarrendecke aus möglichst dünnem, schwingfähigem Holz gefertigt sein; der Stegsattel konnte folglich keine hohen Kräfte aufnehmen, der Knickwinkel musste klein sein. Im o.a. Beispiel verläuft für kleine Knickwinkel die Sattelfkraft proportional zum Knickwinkel: Halbiert man α auf 5° , so wird auch die Sattelfkraft auf 74 N halbiert. Eine hohe Sattelfkraft ist wünschenswert, damit die Saite fest auf dem Sattel aufliegt, und keine energieverzehrenden Eigenbewegungen ausführt. Bei Gitarren mit dünner Decke muss hierbei ein Kompromiss zwischen Stabilität und Klang gefunden werden: Ein großer Knickwinkel garantiert zwar eine sichere Auflage, führt aber zu hohen mechanischen Decken-Belastungen und u.U. zum Bruch. Bei massiven E-Gitarren ist dieses Problem nicht vorhanden, hier sind beliebige Knickwinkel möglich. Jedoch muss bei großen Knickwinkeln zunehmend die Reibung berücksichtigt werden: Ändert sich die Saitenspannkraft auf einer Seite des Sattels, so rutscht die Saite in Längsrichtung über den Sattel. Treten hierbei wesentliche Reibungskräfte auf, ist die Saite u.U. verstimmt. Die Festlegung des Saiten-Knickwinkels ist folglich ein wichtiger Schritt bei der Gitarrenkonstruktion.

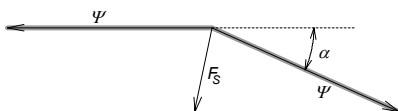


Abb. 7.10: Kraftzerlegung am Sattel.
 Ψ = Saitenspannkraft, F_S = Auflagekraft.

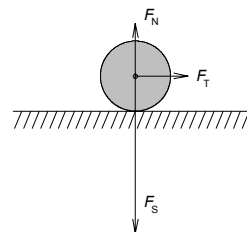


Abb. 7.11: Statische und dynamische Sattelfkräfte.
 F_T = Tangentialkraft, F_N = Normalkraft.

In Ruhe wirken auf die Saite zwei statische Kräfte ein: Die Spannkraft, und die Sattelfkraft. Sobald aber die Saite angezupft wird, kommt eine **dynamische*** Belastung hinzu. Im allgemeinen Fall schwingt die Saite als Kombination einer griffbrettparallelen und einer griffbrettnormalen Schwingung; die **Normalkraft** F_N , die griffbrettnormal und sattelnormal ist, verändert die Auflagekraft (**Abb. 7.11**). Wenn die Normalkraft größer als die Sattelfkraft wird, hebt die Saite vom Sattel ab – dies ist unbedingt zu vermeiden. Aber selbst wenn die Normalkraft noch nicht ganz so groß ist wie die Sattelfkraft, kann es zu unerwünschten Saitenbewegungen kommen: Die griffbrettparallele **Tangentialkraft** F_T wirkt gegen die Haftreibungskraft F_R . Sobald F_T größer wird als F_R , sind bei zu breiten Sattelkerben Querbewegungen der Saite möglich. Hierbei wird Schwingungsenergie irreversibel in Wärme umgewandelt, und die Schwingungsdauer verkürzt. Zusätzlich können Störgeräusche hörbar werden.

Als **Beispiel** sei die H-Saite eines 10er-Satzes (13-mil) betrachtet. Ihre Spannkraft \mathcal{P} beträgt 70 N, bei 10° Knickwinkel ergibt sich die Sattel-Auflagekraft zu 12,3 N. Weiter sei angenommen, dass die Saite 9 cm vom Steg entfernt mit einer von 0 auf 5 N ansteigenden Querkraft **vom Griffbrett wegbewegt** wird. Während die Anzupfkraft auf 5 N ansteigt, erniedrigt sich gleichzeitig die Stegsattel-Auflagekraft um 4,3 N von 12,3 N auf 8 N (**Abb. 7.12**). Sobald die Anzupfkraft auf null zurückspringt, beginnen Wellenbewegungen: Die Sattelfkraft springt im dispersionsfreien Modell zwischen 8 und 13 N hin und her, mit Dispersion entstehen zusätzliche Oszillationen (Kap. 1.1.3). Eine negative Stegsattel-Auflagekraft ergibt sich in diesem Beispiel aber nicht, der Kraftschluss wird nicht unterbrochen. Rechnet man allerdings mit nur 4° Knickwinkel, wie dies beispielsweise bei der *Gretsch Tennesseean* der Fall ist, so beträgt die statische Sattel-Auflagekraft nur noch 4,9 N; jetzt wird eine 5-N-Anzupfkraft schon zum kurzzeitigen Abheben der Saite führen, was einen unsaubereren, schnarrenden Ton bewirkt.

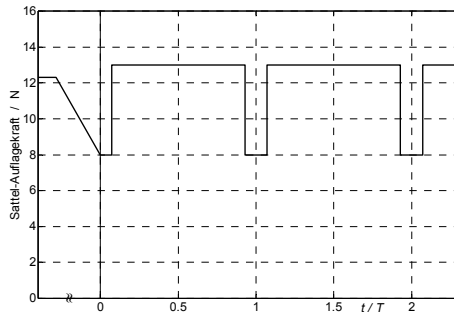


Abb. 7.12: Zeitfunktion der Sattel-Auflagekraft (Modell). Während $t < 0$ wird die Saite von der Gitarre weggezogen, die Sattelfkraft verringert sich auf 8 N. Bei $t = 0$ springt die Zugkraft auf 0; bis diese Änderung (als Welle) den Sattel erreicht, vergeht $1/14$ Periode (9cm / 126cm).

Wenn die Anzupfkraft nicht griffbrettnormal, sondern griffbrettparallel einwirkt, kann es zu seitlichen Verschiebungen der Saite kommen. Bei Kantenlagerung (**Abb. 7.11**) entsteht eine Tangentialbewegung, sobald die Haftreibungskraft überwunden wird. Der Haftreibungskoeffizient ist im Einzelfall von der speziellen Werkstoffpaarung abhängig – für eine überschlägige Berechnung kann man $\mu = 0,1 \dots 0,5$ annehmen. Ideal wäre eine geringe Reibung in Saitenlängsrichtung, und eine große Reibung quer dazu – das geht aber nur mit einer Rillenföhrung. Wählt man $\mu = 0,1$ und die im o.a. Beispiel berechneten Auflagekraft von 12,3 N, so folgt: Schon eine entlang der Sattelfkante angreifende Tangentialkraft von nur $0,1 \cdot 12,3 \text{ N} = 1,2 \text{ N}$ kann u.U. die Saite auf dem Sattel hin- und herschieben. Eine präzise gefertigte V-Föhrung verhindert dieses Hin- und Herrutschen – aber nicht jede Saitenlagerung wirkt als V-Föhrung!

* Dynamisch wird hier als Gegensatz zu statisch, und nicht im Sinne von Dynamis = Kraft benutzt.

Im **V-Lager** (**Abb. 7.13**) liegt die Saite definiert an zwei Stellen auf. Hiermit wird das Hin- und Herrutschen unterbunden, die Haftreibung (in Saitenlängsrichtung) ist aber gegenüber der Kantenlagerung ca. doppelt so groß. Die bei alten Fender-Gitarren anzutreffende Lagerung in einem **Gewindengang** kann zwei verschiedene Zustände ergeben, je nach dem, ob der Saitenradius kleiner oder größer als der Verrundungsradius des Gewindegrundes ist. Die Lagerung in einem Schlitz ist entweder klemmend oder mit Spiel – spezielle Passungen gibt es nicht. Das mit der Rundfeile produzierte Rundlager ähnelt dem Gewindelager mit Grundkontakt, kann bei zu großem Saitendurchmesser aber auch klemmen.

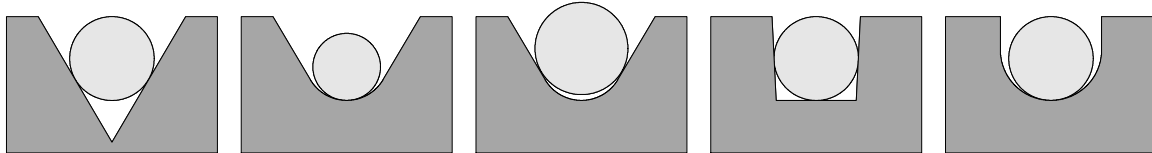


Abb. 7.13: Saitenlagerung: V-Lager, Gewindelager mit dünner bzw. dicker Saite, Schlitzlager, Rundlager.

Die ideale Lagerung sollte verhindern, dass die Saite hin- und herrutscht, gleichzeitig aber in Saitenlängsrichtung möglichst wenig Reibung aufweisen, damit sich eine eindeutige Spannkraft einstellen kann. Die Spannkraft ändert sich besonders stark beim Stimmen und beim Saitenziehen. Falls ein Vibratosystem montiert ist, bewirkt seine Betätigung ebenfalls eine Spannkraftänderung. Um die Auswirkungen der (in Saitenlängsrichtung auftretenden) Lagerreibung zu veranschaulichen, wird eine Saite mit zwei festen Lagern und einem Sattel untersucht (**Abb. 7.14**); der Saiten-Hauptteil hat die Mensurlänge M .

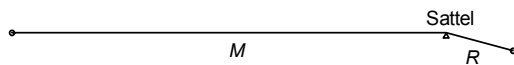


Abb. 7.14: Saite mit Mensur M und Reststück R .

Die maximale Kraft F , die am Sattel in horizontaler Richtung* aufgebracht werden kann, ist die **Haftreibungskraft** F_R (= Lagerreibung). Wird dieser Grenzwert überschritten, gleitet die Saite über den Sattel. Unter der Annahme, dass gerade noch kein Gleiten zustande kommt, wirkt F_R auf zwei parallel liegende Federsteifigkeiten: Die Längssteifigkeit des im Bild links gezeichneten Saitenhauptteils (Länge M), und des Reststücks R . Für nicht allzu große Knickwinkel erhält man (mit S = Querschnittsfläche) die wirksame Gesamtsteifigkeit s :

$$s \approx S \cdot E \cdot (1/M + 1/R) \quad \text{wirksame Längssteifigkeit}$$

Die Längenänderung des Saitenhauptteils aufgrund dieser Reibungskraft beträgt: $\Delta x = s \cdot F_R$. Schiebt man im Bild den Sattel so weit nach rechts, dass gerade noch kein Gleiten auftritt, wird der Saitenhauptteil gedehnt (höhere Schwingfrequenz), schiebt man den Sattel entsprechend nach links, erniedrigt sich die Frequenz. Die relative Frequenzänderung hängt aber nicht von der relativen Längenänderung ab, sondern von der relativen *Dehnungsänderung*. Eine Saite der Länge M muss um x gedehnt werden, um die Frequenz f_G zu produzieren. Beispielsweise beträgt die Dehnung für eine H-Saite (247 Hz) 2,6 mm. Da die Frequenz zur Wurzel aus der Dehnung proportional ist, entspricht die relative Frequenzänderung der halben relativen Dehnungsänderung (Differential bei kleinen Änderungen).

* parallel zur Saitenlängsachse.

Mit Dehnung x , Elastizitätsmodul E , Mensurlänge M und Dichte ρ ist die Grundfrequenz f_G :

$$f_G = \sqrt{\frac{x \cdot E}{4\rho \cdot M^3}}; \quad \frac{df_G}{f_G} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dx}{x} \quad \text{Abhängigkeit der Grundfrequenz von der Dehnung}$$

Die Dehnungsänderung Δx wird durch die Reibungskraft* bewirkt, die ihrerseits über den Reibungskoeffizient μ von der Spannkraft Ψ abhängt. Die relativen Änderungen ergeben sich zu:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\mu}{1 + M/R}; \quad \frac{\Delta f_G}{f_G} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu}{1 + M/R} \quad \text{relative Änderungen}$$

Um beim Beispiel der H-Saite zu bleiben: Mit $M = 64$ cm, $R = 12$ cm und $\mu = 0,15$ ergibt sich eine **relative Verstimmung** von $\pm 1,2$ %, entsprechend ± 21 cent. Beim reibungsbehafteten Sattel ist die tatsächliche Saiten-Grundfrequenz also unbestimmt, mit $\pm \Delta f_G$ als Frequenzunsicherheit. Um diese Unsicherheit zu verringern, gibt es drei Wege: Entweder macht man die Reibung so groß, dass Spannkraftänderungen immer kleiner als die Reibungskraft bleiben; dies ergibt den **Klemmsattel**, in dem die Saite unverrückbar festgeschraubt wird. Oder man verringert die Reibung so gut es geht durch reibungsarme Sattelmateriale und/oder kleine Saitenknickwinkel, wobei aber mit abnehmendem Knickwinkel die Gefahr für Relativbewegungen zwischen Saite und Sattel steigt. Oder man verkürzt den Saitenrest zwischen Sattel und Saitenhalter auf wenige Zentimeter (z.B. Les Paul, Stud Tailpiece) und vergrößert damit die Längssteifigkeit. Daneben hat es Versuche gegeben, den Sattel bzw. den ganzen Steg beweglich zu lagern: Fenders Jazzmaster und Jaguar sind hierfür Beispiele – wenig erfolgreiche Beispiele, ungeliebt und nur als Kultobjekt wiederauferstanden. Weitere Daten siehe Tab. 7.1.

An dieser Stelle muss jedoch wieder an ein Grundgesetz der Klangerzeugung erinnert werden: *Individualität ist Imperfektion*. Ob ein Steg die Saitenschwingung wenig dämpft (langes Sustain), oder viel (perkussiver Klang), ist letztlich Geschmacksache. Als besonders prägnantes Beispiel möge der für Telecasters nachrüstbare **Sitar-Steg** dienen: Bei ihm erzeugt eine spezielle Saitenlagerung ganz bewusst 'Störgeräusche', die im Rockinger-Katalog sehr schön als 'schnaseln' bezeichnet werden. Aber nicht mit "schnackseln" verwechselt werden dürfen, nicht wahr, Frau Thurn?

	Knickwinkel am Kopfsattel	Knickwinkel am Stegsattel
Stratocaster	7° – 9°	Bis 90°
Telecaster	7° – 9°	9° (top loading), 34° (through body)
Jazzmaster	7° – 9°	6° – 7°
Gretsch Tennessean	5° – 15°	4°
Rickenbacker 335	7° – 12°	4,5°
Gibson ES 335	15°	9° – 10°
Les Paul '59 reissue	17°	19° – 26°
Taylor PS-54-CE	13°	12° / 27°
Ovation SMT	11°	25° – 30°
Ovation EA68	11°	33°
Martin D45V	15°	25° – 30°

Tabelle 7.1: Typische Saitenknickwinkel

* Für präzisere Berechnung bietet sich die Formel der Umschlingungsreibung an: $\exp(\mu\alpha)$

7.5 Reflexion und Absorption am Sattel

Steg- und Kopfsattel begrenzen als Saitenlager den schwingenden Teil der Gitarrensaite. Ihre Wirkung auf die Tonerzeugung kann in zwei Bereichen diskutiert werden: Bezüglich der Reflexion einer sich längs der Saite ausbreitenden Welle (zeitliche Betrachtung), und für den eingeschwungenen Zustand (spektrale Betrachtung) – in beiden Fällen jedoch nur näherungsweise, da die tatsächlichen Vorgänge beliebig kompliziert sind. Der Sattel ist die Trennstelle zwischen einem leichten, schwingfreudigen Medium (Saite), und einem schweren, nahezu unbewegten Korpus. Während im zweiten Kapitel hauptsächlich die Schwingungsvorgänge der Saite dargestellt wurden, folgt nun eine genauere Betrachtung der Saitenlager und ihrer Wirkung auf den Reflexionsvorgang.

Die technisch/mathematische Analyse des Reflexionsvorgangs zeigt, dass der Reflexionsgrad fast 100% beträgt – ganz im Gegensatz zu populärwissenschaftlichen Darstellungen, die nahezu Anpassung vermuten: *"Der größte Teil der Saitenschwingungen soll an den Korpus weitergeleitet werden. Wird selbiger nämlich mit ungehemmter Schwingungsenergie versorgt, entwickelt sich ein Maximum an Ton und Sustain [G&B 12/05]."* Diese Vermutung betrifft nicht etwa die Akustikgitarre, sondern E-Gitarren. Wenn aber tatsächlich der größte Teil der am Sattel ankommenden Schwingungsenergie an den Korpus weitergeleitet werden würde, d.h. absorbiert würde, könnte ja nur mehr der kleinere Teil reflektiert werden: Damit ist aber eine langdauernde Saitenschwingung (ein Maximum an Sustain) unmöglich. Dieser auf dem Energiesatz aufbauenden Argumentation wird gerne entgegengehalten, dass das Saitenlager ja "re-implizierend" sei. Will sagen: Die Energie, die in den Korpus hineingeht, kommt ja wieder zur Saite zurück. Das ist nun nicht komplett falsch, aber für einen Schwingungstechniker eine eher ungewohnte Wortwahl. Naheliegender ist da die Unterteilung in Wirkenergie und Blindenergie: Die Reaktanzen, also Massen und Federn, nehmen Blindenergie auf, die sie ohne Verluste (d.h. zu 100%) wieder abgeben können: Um eine Feder zusammenzudrücken, wird Energie benötigt; sobald die Feder sich wieder entspannt, wird diese Energie wieder frei, die Feder wirkt als ein Speicher potentieller Energie. Alle Reibwiderstände nehmen hingegen Wirkenergie auf, die sofort irreversibel (unumkehrbar) in Wärme umgewandelt wird. Und selbst dann nicht mehr in Schwingungsenergie zurückzuwandeln wäre, wenn man die Gitarre erwärmen würde. Federn* sind aber in der Realität immer mit Reibwiderständen in Kontakt, und deshalb bedeutet jede Materialverformung Verlust an Schwingungsenergie. Jeder Korpus, der sich verformt (populärwissenschaftlich: der "resoniert"), wandelt Schwingungsenergie in Wärme um – keine gute Basis für ein langes Sustain.

Wenn ein langes Nachschwingen einer angeschlagenen Saite gewünscht wird, darf eben nicht der größte Teil der Schwingungsenergie in den Korpus geleitet werden. Weder als Wirkenergie, die ja sofort in Wärmeenergie umgewandelt würde, noch als Blindenergie. Denn diese Blindenergie würde zwangsläufig zur Verformung federnder Elemente führen, und da diese niemals verlustlos sein können, zumindest teilweise zu Wirkenergie werden. Eine andere Frage ist, ob wirklich für alle Teiltöne einer Saitenschwingung möglichst langes Nachschwingen wünschenswert ist. Da ja nicht alle Gitarren gleich klingen sollen, müssen Unterschiede in den Teiltonspektren vorhanden sein, und das bedeutet sowohl gitarrenspezifische Teiltonamplituden, als auch gitarrenspezifische Abklingzeitkonstanten. Im Folgenden wird zunächst der Reflexionsvorgang beschrieben, danach erfolgt die Analyse des Teiltonabklingens.

* Es ist sinnvoll, zwischen der idealen (verlustfreien) und der realen (verlustbehafteten) Feder zu unterscheiden: Nur die ideale Feder gibt 100% der gespeicherten Energie zurück, bei der realen Feder ist's weniger.