

7.7 Dämpfung der Saitenschwingung

Beim Anzupfen erhält die Saite einige mWs potentielle Energie zugeführt, die beim anschließenden Ausschwingen in Wärme umgewandelt werden. Dieser **Dissipation** liegen mehrere Mechanismen zugrunde, die ihre Ursache teils in der Saite selbst, teils in ihrer unmittelbaren Umgebung haben. Hatten Kap. 1 und 2 noch die ungedämpfte Wellenausbreitung zum Inhalt, so soll nun ausführlicher auf die einzelnen Dämpfungsmechanismen eingegangen werden. Gemäß der in Musikkreisen vorherrschender Meinung ist das **Korpusholz** die Ursache für die Saitenbedämpfung: Wünschenswert ist langes **Sustain**, d.h. langdauerndes Nachklingen einer angezupften Saite, jedoch kooperieren angeblich nicht alle Hölzer in gewünschter Weise mit dem Musiker. Ob das Holz tatsächlich die Hauptursache für die Saitenbedämpfung (und damit für einen Teil der Klangformung) darstellt, ist Thema der folgenden Kapitel.

7.7.1 Strahlungsdämpfung

Die Schwingungsenergie der Saite wird u.a. dadurch verringert, dass bei ihrer Bewegung in Luft ein Reibwiderstand zu überwinden ist – würde die Saite im Vakuum schwingen, wäre dieser Widerstand nicht vorhanden (d.h. null). Man kann diesen Wirkwiderstand als Realteil der komplexen **Strahlungsimpedanz** betrachten, und ihren Imaginärteil (eine winzige Masse) ignorieren. Der Realteil bedämpft die Saitenschwingung, weswegen auch von *Luftdämpfung* gesprochen wird. Legt man eine gedämpfte Schwingung mit exponentiell abklingender Amplitude zugrunde, lässt sich die Abklinggeschwindigkeit mit der **Zeitkonstante** τ oder dem hierzu reziproken **Abklingkoeffizient** $\delta = 1/\tau$ definieren, der einen konstanten (D_0) und einen frequenzabhängigen Term ($D_{1/2} \cdot \sqrt{f}$) enthält. Nach Stokes (Kurzfassung in [1]) erhält man:

$$D_0 = \frac{4 \cdot \rho_{air} \cdot \nu_{air}}{\rho \cdot D^2}; \quad D_{1/2} = \frac{4 \cdot \rho_{air} \cdot \sqrt{\pi \cdot \nu_{air}}}{\rho \cdot D}; \quad \delta(f) = D_0 + D_{1/2} \cdot \sqrt{f}$$

Hierbei sind ρ_{air} und ν_{air} Dichte bzw. kinematische Viskosität der Luft, ρ ist die Saitendichte, und D ist der Saitendurchmesser. Fletcher/Rossing [1] fassen beide Dämpfungsterme zu einer Formel zusammen, in der sie die Energie-Abklingzeitkonstante angeben. Weil hierbei jedoch Verwechslung droht, soll im Folgenden nur die **Abklingzeit*** $T_{30} = 3.45/\delta$ verwendet werden.

Mit der für Stahl nicht unüblichen Dichte von 7.9 g/cm^3 für Massivsaiten bzw. 7.1 g/cm^3 für umspinnene Saiten erhält man die in **Abb. 7.63** links dargestellten Frequenzabhängigkeiten der Teilton-Abklingzeiten T_{30} . Nach der o.a. Formel hängt T_{30} näherungsweise reziprok von der Wurzel aus der Frequenz und reziprok vom Saitendurchmesser ab – dickere Saitensätze haben (diesbezüglich!) längeres Sustain. Hiermit ergibt sich für den Grundton der E₂-Saite (0.046") die Abklingzeit zu ca. 80 s, die der E₄-Saite (0.009") zu 6.8 s. Diese Modell-Ergebnisse dienen im Folgenden aber lediglich als Orientierungswerte, es soll nicht näher untersucht werden, ob die Strahlungsimpedanz des oszillierenden Zylinders nicht doch zu modifizieren wäre, weil ja mit Korpus und Griffbrett Reflektoren in unmittelbarer Nachbarschaft angeordnet sind. Doch auch ohne ausufernde Theorie: Fast **unendliches Sustain**, wie einigen Wundergitarren angedichtet, ist allein schon aufgrund der Strahlungsdämpfung (die man umgangssprachlich als "Luftreibung" bezeichnen könnte) unmöglich.

* Während T_{30} nimmt der Pegel um 30 dB ab [Fleischer 2000].

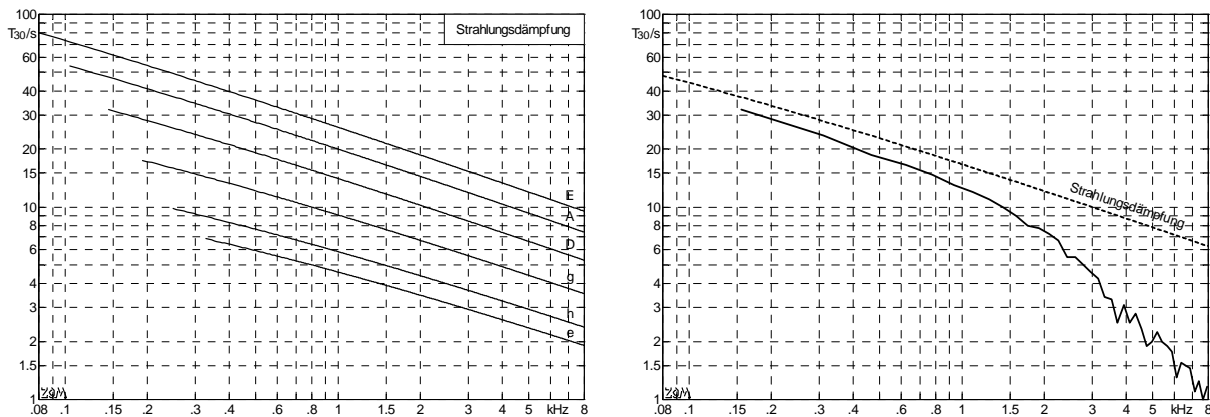


Abb. 7.63: Durch Strahlungsdämpfung (= Luftdämpfung) hervorgerufene Abklingzeit T_{30} für Gitarrensaiten (Hybrid, 9/46). Das rechte Bild zeigt die gemessene Abklingzeit einer auf einem Steintisch eingespannten Stahlsaiten ($\varnothing = 0.7$ mm), sowie die hierzu berechnete Strahlungsdämpfung. Nur das tieffrequente Abklingverhalten ist hiermit näherungsweise erklärbar.

Die Strahlungsdämpfung kann das bei Messungen (re. Bild) gefundene Abklingverhalten nur im tiefen und mittleren Frequenzbereich erklären, und da auch nur, wenn die Auflagerdämpfung sehr gering ist. Im Bereich höherer Frequenzen wirkt sich zusätzlich ein im Innern der Saite stattfindender Verlustmechanismus aus, der im nächsten Abschnitt diskutiert wird.

7.7.2 Innere Dämpfung

Beim Schwingen verändert die Saite ihre Form, d.h. ihre Krümmung und Länge, und hierfür ist Energie erforderlich. Überwiegend **Blindenergie**, die als potentielle Energie in der federnden Saite vorübergehend gespeichert wird, aber auch **Wirkenergie**, die die Saite minimal erwärmt. Die Wirkenergie ist für den Schwingungsvorgang verloren, weswegen neben dem Begriff *Dämpfungsmechanismen* auch von *Verlustmechanismen* gesprochen wird. Und da diese Verluste in der Saite stattfinden, heißen sie auch **innere Verluste**. Die Mechanik definiert Verlustbeiwerte als *imaginären* Teil der komplexen Federimpedanz (bzw. -admittanz), ganz im Gegensatz zur Elektrotechnik, die z.B. einer Induktivität einen *reellen* Verlustwiderstand zuweist. Beide Wege führen zum Ziel, denn in beiden Fällen ist Orthogonalität gewährleistet.

In Maschinenakustik und Werkstofftechnik beschreibt man innere Verluste üblicherweise mit dem **Verlustfaktor** d , der Imaginärteil E_2 und Realteil E_1 des komplexen Elastizitätsmoduls \underline{E} miteinander verbindet: $\underline{E} = E_1 + j \cdot E_2$, $d = E_2 / E_1$. Jedoch ist es sehr schwierig, belastbare Aussagen über d zu finden. Dies mag daran liegen, dass die Aufteilung von \underline{E} in nur zwei Komponenten eben nur ein sehr einfaches Modell darstellt, aber auch daran, dass z.B. Stahl in unterschiedlichen Arten vorkommt, die nicht alle mit demselben Verlustfaktor gekennzeichnet werden können. Deshalb ist der Verlustfaktor und das darauf aufbauende Dämpfungsmodell nur als erste Näherung brauchbar. Fleischer [2000] setzt $d = 0.001^{\S}$ an, mit dem zur Vorsicht gemahnenden Hinweis "tentatively estimated", und verringert diesen Wert einige Jahre später auf 0.0004 [Fleischer 2006]. Lieber^{*} spezifiziert $d = 0.00017$, Kollmann[♥] $d = 0.0001$,

[§] Bei Fleischer heißt der Verlustfaktor η , wie in der älteren Literatur üblich.

^{*} Lieber, E.: Vibration of stretched strings, acta acustica 1996 Suppl. Vol. 82, p.187.

[♥] Kollmann F. G.: Maschinenakustik, Springer 1993.

Cremer/Heckl [11] geben $0.2 - 3 \cdot 10^{-4}$ an. Cuesta/Valette* ergänzen die o.a. Formel des Abklingkoeffizienten um zwei weitere Terme und berücksichtigen damit auch Versetzungsvorgänge im kristallinen Gefüge sowie Wärmeleitung (Dehnung kühlt, Kompression erwärmt):

$$D_1 = d; \quad D_3 = \frac{\pi^3 \cdot E \cdot \rho \cdot D^2 \cdot d}{4 \cdot \sigma^2}; \quad \delta(f) = D_0 + D_{1/2} \cdot \sqrt{f} + D_1 + D_3 \cdot f^3$$

Hier steht E für den Elastizitätsmodul und σ für die Normalspannung des Saite. Setzt man in diesen Gleichungen für den Verlustfaktor $d = 0.7 \cdot 10^{-4}$, ergibt sich die in **Abb. 7.64** links dargestellte Kurve. Gemessen wurden die Teilschwingungs-Abklingzeiten T_{30} eines auf einen schweren Steintisch in zwei Stützlager gespannten Stahldrahts ($\varnothing = 0.7$ mm).

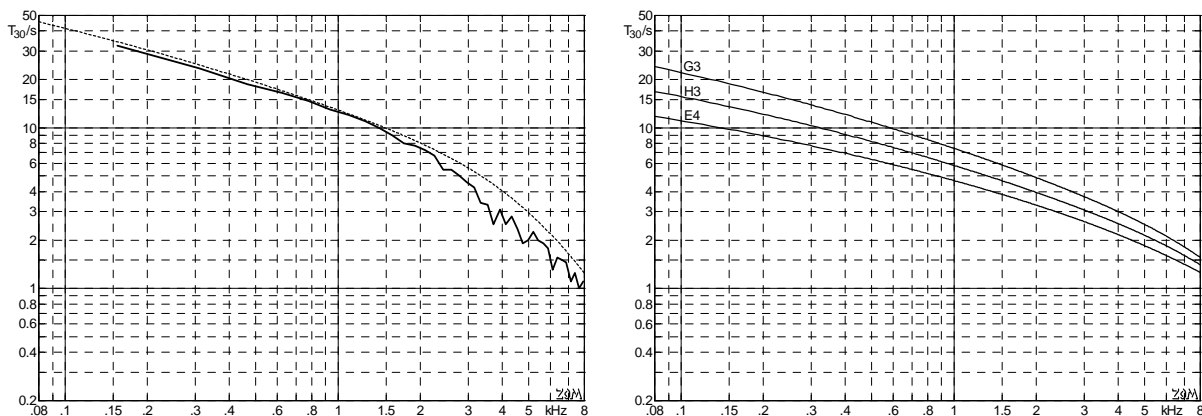


Abb. 7.64: Links: Vergleich Messung vs. Modellrechnung. Rechts: Orientierungslinien (10/13/16 plain).

Die mit dem Modell berechneten Abklingzeiten dürfen durchaus *größer* sein als die gemessenen, denn neben Strahlungsdämpfung und innerer Dämpfung verkürzen weitere Dämpfungsmechanismen die Abklingzeit (Kap. 7.7.3). Es liegt jenseits der Zielsetzung dieser Arbeit, die einzelnen Komponenten der Schwingungsdämpfung auf werkstoffspezifische Ursachen zurückzuführen. Die Materie ist komplex, wie schon aus berufenerem Munde verlautete: *Die physikalischen Vorgänge, die die innere Dämpfung von Metallen bewirken, sind sehr verwickelt und auch noch nicht ganz erforscht. Hinzu kommt noch, dass es gar nicht leicht ist, die oft sehr geringen Verlustfaktoren zu messen, und dass daher manche in der Literatur angegebenen Werte nicht die Verluste im untersuchten Material, sondern in der Messapparatur oder durch Schallabstrahlung wiedergeben [11].* Im Folgenden werden deshalb sehr pragmatisch lediglich **Orientierungslinien** angegeben (Abb. 7.64 rechts), anhand derer die an Gitarren gemessenen Abklingzeiten eingeordnet und bewertet werden können. Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass das in den Orientierungslinien angegebene Abklingverhalten überwiegend von Strahlungsdämpfung und innerer Dämpfung bestimmt wird – verbunden mit dem Angebot, diese Kurven weiter nach oben zu schieben, wenn ergänzende Erkenntnisse vorliegen. Für die **Diskantsaiten** (G-H-E₄) sind diese Orientierungslinien eine gut brauchbare Arbeitsgrundlage, bei den umspannenen **Basssaiten** (E₂-A-D) sind jedoch größere Diskrepanzen zu erwarten, weil zur Berechnung der inneren Verluste kein massiver Stahlzylinder angenommen werden darf. Stattdessen sind drei Dämpfungsmechanismen zu berücksichtigen: Dämpfung im Kerndraht (Stahl), Dämpfung in der Umspinnung (Nickel oder Stahl), und Fugendämpfung an den Kontaktflächen. Zeitvariant – natürlich.

* Cuesta C., Valette C.: Evolution temporelle der la vibration des chordes der clavecin, Acustica Vol. 66, 1988.

7.7.3 Wicklungsdämpfung

Wenn man sich Gedanken zur inneren Dämpfung einer Saite macht, muss man auch deren Aufbau berücksichtigen. Massivsaiten (häufig E4, H3, G3) bestehen immer aus Federstahldraht, die Basssaiten (E2, A2, D3) sind hingegen umwickelt (umsponnen). Die G-Saite kann massiv (plain) sein, oder umwickelt (wound). Streng genommen bezeichnet der Begriff "innere Dämpfung" nur die Dissipationsverluste *im Metall*. Innerhalb der umsponnenen Saite liegen aber auch die Berührungsflächen Kerndraht/Umspinnungsdraht, und auch hier (sowie zwischen den Windungen der Umspinnung) entsteht **Reibung**, also Dämpfung. Messungen des Abklingverhaltens neuer Saiten ergaben, dass die Teilton-Abklingzeiten der *massiven* Saiten nahe bei den Modellwerten lagen, dass aber die *umsponnenen* Saiten nicht mit der in Kap. 7.7.2 angegebenen Formel beschrieben werden können. Setzt man wie bei Massivsaiten den Außendurchmesser an, ergibt die Berechnung hochfrequent viel zu kurze Abklingzeiten, nimmt man einen verringerten "effektiven" Durchmesser, ist das Ergebnis willkürlich.

Dass es bei umsponnenen Saiten gar keine einfache Formel geben kann, zeigt der folgende Versuch: Auf einer USA-Stratocaster wurde die fabrikneuen D-Saiten zweier verschiedener Hersteller vermessen (**Abb. 7.65**). Obwohl beide Saiten nacheinander auf derselben Gitarre und in derselben Sattelkerbe analysiert wurden, differieren die Abklingzeiten ganz wesentlich, was nur damit erklärt werden kann, dass ihre Wicklungen gravierende Unterschiede aufweisen. Es liegt weit jenseits der Ziele dieser Arbeit, die werkstoff- und aufbauspezifischen Gründe für diese Unterschiede zu erforschen. Stattdessen werden in den folgenden Diagrammen empirisch gefundene **Bestcase-Messwerte** angegeben, die Orientierung und Bewertung der Ergebnisse erleichtern. Der größte Teil der gemessenen Abklingzeiten war kürzer als die angegebenen Orientierungswerte, in Einzelfällen wurden sie aber auch leicht überschritten.

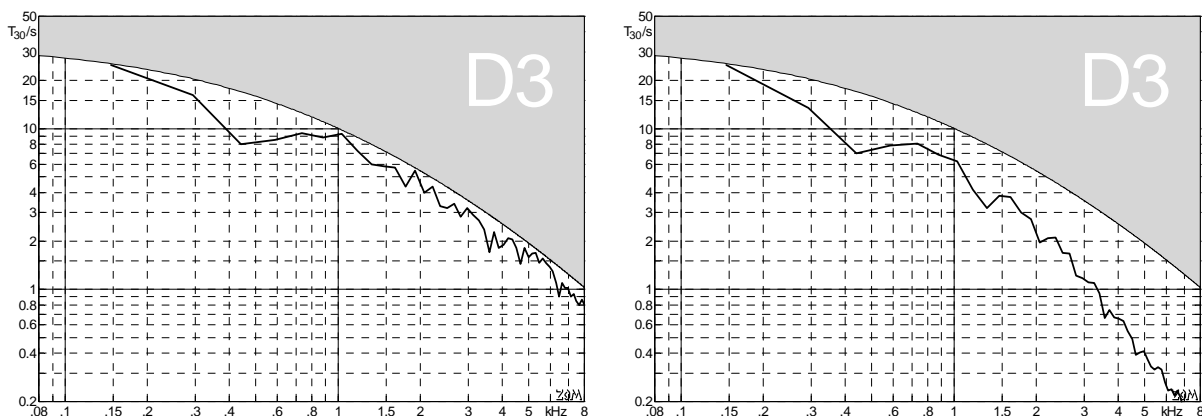


Abb. 7.65: Teilton-Abklingzeiten, Stratocaster; Vergleich zweier D-Saiten (je 0.026", umsponnen, fabrikneu).

In **Abb. 7.66** sind für alle 6 Saiten eines 10/46-Satzes (10, 13, 17, 26, 36, 46) die Teilton-Abklingzeiten der leeren Saiten angegeben. Wie in Kap. 7.7.4.1 noch zu erläutern sein wird, ist es zweckmäßig, die Schwingungsdämpfung aus der energetischen Summe der griffbrettnormalen und der griffbrettparallelen Schwingung abzuleiten – die Kurven aus Abb. 7.66 wurden auf diese Art ermittelt. Ferner wurden die selektiven Minima entfernt, deren Ursache bekannt ist – auf sie wird im Folgenden ausführlich eingegangen. Ursachen der in Abb. 7.66 dargestellten globalen Abklingvorgänge sind bei den massiven Saiten im Wesentlichen Strahlungsdämpfung und innere Dämpfung, bei den umsponnenen Saiten zusätzlich Wicklungsdämpfung. Steg-, Hals und Korpusdämpfung äußern sich in kleinen, frequenzselektiven Zacken – ihnen ist ein eigener Abschnitt gewidmet.

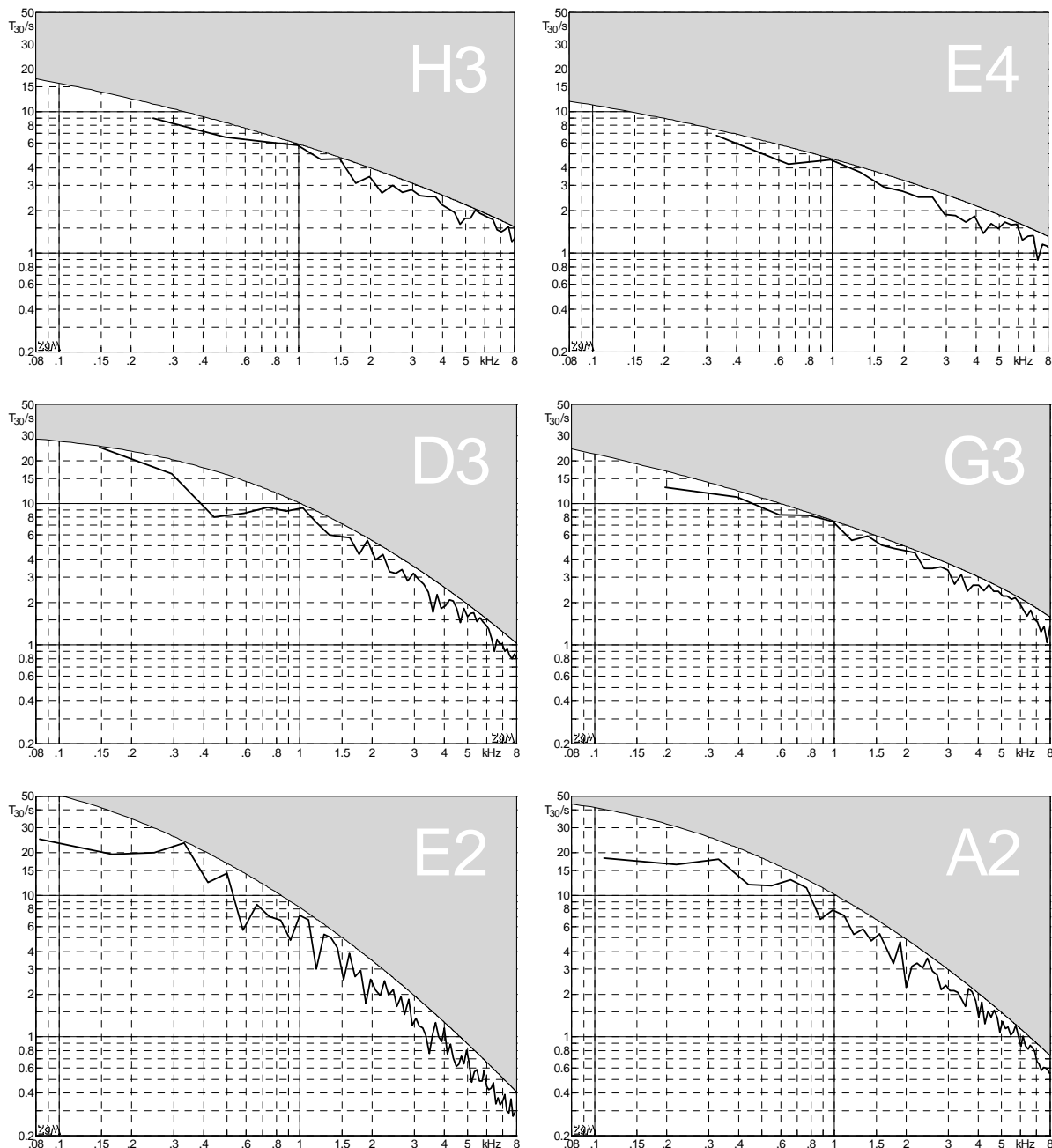


Abb. 7.66: Teilton-Abklingzeiten, USA-Stratocaster, Best-Case. Neue Saiten (10, 13, 17, 26, 36, 46). Der grau abgesetzte Bereich wurde bei Messungen so gut wie nie erreicht ("Orientierungslinie").

Um Missverständnisse zu vermeiden, sei nochmals daran erinnert, dass **Abb. 7.66** keine Spektren, sondern Abklingzeiten darstellt. Während der Abklingzeit T_{30} nimmt der Teilton-Pegel um 30 dB ab. Im Falle der tiefen E-Saite (E_2) dauert es 25 s, bis der Pegel des Grundtons (82.4 Hz) um 30 dB abnimmt. Etwa ebenso lange dauert es, bis der Pegel des 4. Teilttons (330 Hz) um 30 dB abnimmt, während es beim 12. Teilton (1 kHz) nur 7 s dauert. Wie laut diese Teiltöne sind, oder besser: mit welchen Pegel sie beginnen, sagt diese Grafik nicht aus. Der Pegel eines Teilttons lässt sich leicht durch z.B. Filter ändern, die Abklingzeit hingegen nicht – insofern ist die Abklingzeit ein viel gitarrenspezifischerer Parameter als das Spektrum. Gitarrenspezifisch, aber auch saitenspezifisch. Die globale Tendenz des schnellen Höhenabfalls ist eindeutig saitenspezifisch, nur den kleinen Schwankungen im Kurvenverlauf kann ein Bezug zu Gitarrenspezifika zugeordnet werden. Dies ist das Thema von Kap. 7.7.4.

7.7.4 Auflagerdämpfung

In Kap. 2 wurde ausführlich dargelegt, dass die Saite modellmäßig als mechanische Leitung beschrieben werden kann, auf der Wellen entlang laufen. Der an den beiden Auflagern (Steg und Kopfsattel) stattfindende Reflexionsvorgang wird vom **Wellenwiderstand** der Saite und von der jeweiligen **Auflagerimpedanz** (bzw. -admittanz) bestimmt. Typischerweise sind die Lager unnachgiebig (besitzen also eine sehr große mechanische Impedanz), wodurch fast die gesamte Wellenenergie reflektiert wird. Ein kleiner Prozentsatz wird jedoch am Lager absorbiert, und hier kommen nun Steg- und Sattelaufbau ins Spiel, sowie die hierbei verwendeten Materialien. Danach ist des Gitarrenhalses und seiner Resonanzen zu gedenken [Fleischer], und dann, ganz am Ende, kann man sich auch noch über das Korpusholz Gedanken machen. Zunächst muss aber der Begriff "Auflagerdämpfung" präzisiert werden, denn mit einer einfachen Punktimpedanz ist es nicht getan. Vielmehr lassen sich mehrere Absorptionsvorgänge trennen, die in eigenen Unterkapiteln zu diskutieren sind.

7.7.4.1 Transversalwellenkopplung

Der in Elektrogitarren üblicherweise verwendete Magnettonabnehmer wandelt vor allem die griffbrettnormale Saitenschwingung (GBN) in eine elektrische Spannung um (Kap. 5). Es ist folglich naheliegend, bei Schwingungsmessungen die Saite griffbrettnormal anzuschlagen, und diese GBN-Komponente z.B. mit dem Laser-Vibrometer zu messen. Im einfachen Modell unterstellt man hierbei exponentielles Abklingen der Teilton-Schnelle:

$$v(t) = v_i \cdot \exp(-t/\tau)$$

$$\tau = \text{Amplituden-Zeitkonstante}$$

Da die Momentanleistung dem Quadrat der Schnelle proportional ist, muss ihr Abklingen mit einer Leistungs-Zeitkonstante beschrieben werden, die halb so groß ist wie die Amplituden-Zeitkonstante. Wenn folglich nur von "Zeitkonstante" die Rede ist, besteht Verwechslungsgefahr. Eindeutig ist hingegen die Angabe der **Abklingzeit** T_{30} , während derer der Pegel um 30 dB abnimmt; sie wird im Folgenden verwendet. Die Abklingzeit T_{30} ist das 3.45-fache der Amplituden-Zeitkonstante bzw. das 6.9-fache der Leistungs-Zeitkonstante. Allerdings zeigen nicht alle Teiltonanalysen rein exponentielles Abklingen. In **Abb. 7.67** ist das an einer Stratocaster gemessene Abklingen des 4. Teiltone einer H-Saite dargestellt. Eine über 2 s gehende Analyse zeigt eine progressiv abnehmende Kurve, der man schlecht eine einzige Steigung zuordnen kann – beiden gestrichelt eingezeichneten Näherungsgeraden haftet reichlich Willkür an. Erhellung im wahrsten Sinn brachte ein zweites Laser-Vibrometer, das den laboreigenen Aufbau zum **2D-Messplatz** erweiterte. Die energetische Summe von griffbrettnormaler und griffbrettparalleler Saitenschwingung ergänzt sich perfekt zu einem (lehrbuchhaften) exponentiellen Abfall, dessen Abklingzeit (5.7 s) wesentlich länger ist als die zunächst vermutete.

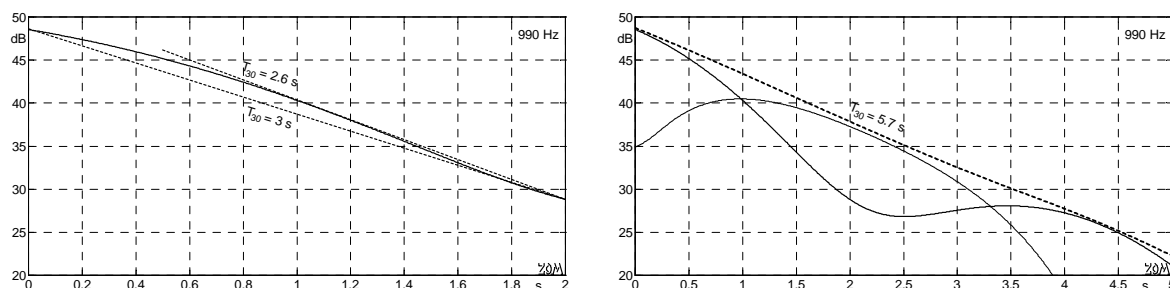


Abb. 7.67: Abklingen des 4. Teiltone einer H-Saite (Stratocaster). Im rechten Bild ist ergänzend der Pegel der griffbrettparallelen Schwingung eingezeichnet, sowie der Summenpegel (----).

Die Interpretation dieser Messergebnisse kann je nach Fragestellung sehr unterschiedlich ausfallen. Die vom Tonabnehmer abgenommene GBN-Schwingung – und nur diese ist für den Klang relevant – erreicht nach 2.5 s ein Minimum. Den damit zusammenhängenden Pegelverlust von 22 dB darf man aber nicht einem Energieverlust von 99.4% gleichsetzen, denn ein Teil der Energie ist noch nicht "verloren", sondern nur im orthogonalen Schwingungsmodus zwischengespeichert. Nach weiteren 2.5 s ist der Pegel deshalb nicht um insgesamt 44 dB, sondern nur um 26 dB abgefallen. Dem Gitarrist, der einen 2.5 s dauernden Ton spielen möchte, hilft das allerdings gar nichts, der empfindet das **Sustain** dieses speziellen Teiltones einfach nur als zu kurz. Und unterstellen wir ruhig, dass gerade dieser eine Teilton für den Sound ganz besonders wichtig ist, und halten wir fest: Die in einer Schwingungsebene gemessene Abklingzeit darf nicht unesehen in Dissipationsparameter umgerechnet werden.

Bei den Abklinganalysen der untersuchten American-Standard-**Stratocaster** fiel auf, dass gerade der H-Saite starke Teilton-Schwebungen anhafteten. Nun weiß man natürlich, dass eben diese Schwebungen, dieses 'choruslike Warble', zum spezifischen Charme dieses Instrumentes gehören, und man kennt auch die vermeintliche Ursache: Die Magnete sind's, ziehen sie doch ungebührlich an der Saite und 'behindern sie am freien Ausschwingen'. Nur den Urheber der hierfür erfundenen mäßig intelligenten Bezeichnung '**Stratitus**' kennt man nicht, doch das ist auch besser so. Kap. 4.11 hatte schon erläutert, dass Tonabnehmermagnete tatsächlich die Ausschwingcharakteristik einzelner Teiltönen ändern können, allerdings ist hiervon vor allem der Grundton betroffen. Zur Sicherheit waren vor der in Abb. 7.67 dargestellten Analyse die Tonabnehmer weit heruntergedreht worden, mit anderen Worten: **Die Magnete** sind nicht verantwortlich für diese Schwebung. **Abb. 7.68** zeigt weitere Teiltonpegel dieser H-Saite, alle sind mit unterschiedlichen Schwebungen behaftet. Hat man nicht grenzenlose Möglichkeiten zur Modalanalyse, (und man hat nicht, der Freistaat muss nach dem Hypo-Alpe-Adria-Desaster noch mehr sparen), bleiben nur einfache Lösungsansätze zur Ursachenforschung. Die gehen in diesem Fall so: Man hebt die H-Saite aus ihrem Kopfsattel, legt sie einen Millimeter daneben, stimmt neu und wiederholt die Messungen. Und siehe da: Schwebung war gestern. Wären doch alle Analysen so einfach.

Im Originalzustand (**Abb. 7.68** links) erzeugt die H-Saite der untersuchten Stratocaster hörbare Schwebungen, die man lieben oder hassen kann. Nur: Dem speziell ausgesuchten, lange gelagerten Gehölz dieses amerikanischen Traumes darf man diese Eigenschaft definitiv nicht zuschreiben, die kommen ganz banal vom **Kopfsattel**. Und sage keiner, dieser sei mit Liebe bzw. genialer Handwerkskunst genau so zugefeilt worden, dass genau diese Schwebungen entstehen, weil nur das den authentischen Stratsound gewährt. Nach erfolgter Messung durfte die H-Saite wieder in ihre angestammte Rille zurück, wurde neu gestimmt, und tatsächlich: Die Schwebungen waren wieder da. Allerdings – es waren nicht mehr genau dieselben, bei genauer Betrachtung zeigten sich Abweichungen in Schwebungsfrequenz und -stärke. Somit muss dieses Soundcharakteristikum als zufällig und fragil bezeichnet werden, als Auswirkung einer eben immer toleranzbehafteten Fertigung. Bei der untersuchten Stratocaster zeigte nur die H-Saite derart starke Schwebungen, alle anderen Saiten verhielten sich unauffällig. Es ist jedoch zu erwarten, dass unter den bisher gebauten Strats nicht wenige sind, bei denen mehr als eine Saite stärkere Schwebungen produzieren, und vielleicht sind ja gerade diese die heiligen Kühe, für die Unsummen bezahlt werden. The top nut, stupid ...

Nein, natürlich ist der Kopfsattel nicht die alleinige Ursache für ein bestimmtes Klangcharakteristikum, aber er ist wesentlich an der Klangformung beteiligt. Noch zu Beginn des 21. Jh. wird in Ehren ergrauter Damen gedacht, die Fenders erste Tonabnehmer (von Hand!!) bewickelten (Mary, Gloria, Abigail), dem Sattelschlitzer wird diese Ehre jedoch verweigert. Er hätte sie, bei Leo, auch verdient.

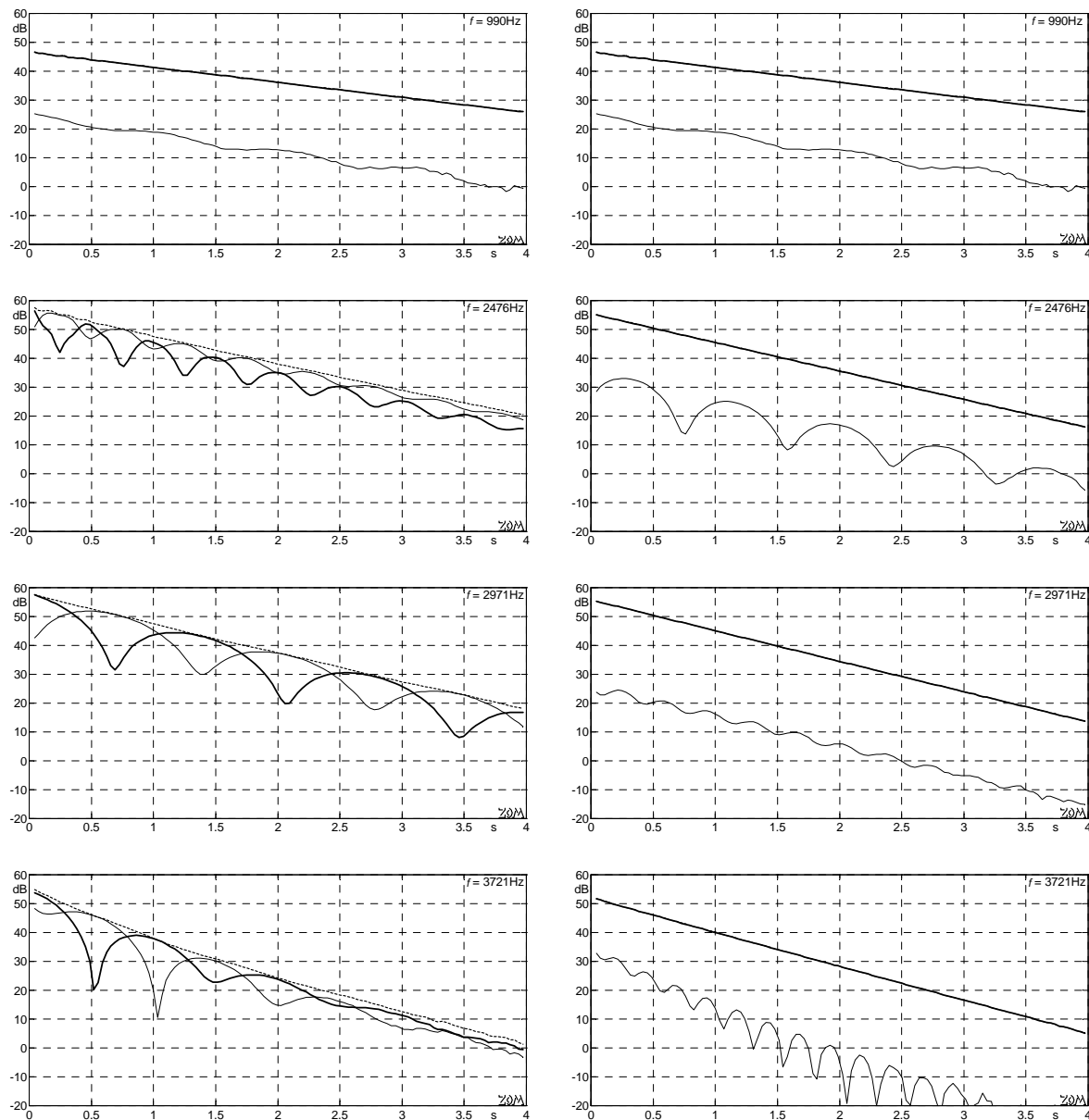


Abb. 7.68: Teiltonpegel, H-Saite, Stratocaster. Links: Saite im Kopfsattelrinne, rechts: Saite neben der Rinne. Dicke Linie: griffbrettnormale Saitenschwingung, dünn: griffbrettparallele Saitenschwingung, ---- = Summe.

Ehe man überlegt, wie das Korpusholz die Saitenschwingung beeinflussen könnte, sollte man die Teile berücksichtigen, die direkten Kontakt zur Saite haben. Und das sind nun einmal Kopfsattel und Stegböckchen, und nicht Esche- oder Erlebreiter. Liegt die Saite nicht auf einer zur Längsachse rechtwinkligen Linie auf, kann eine Verkopplung der Schwingungsebenen entstehen. Gleiches kann passieren, wenn die Nachgiebigkeit der Unterlage richtungsabhängig ist. Die am Saitenaufleger verursachte Kopplung der Transversalschwingungen ist in **Abb. 7.69** als **Orbit-Diagramm** (Abszisse = griffbrettparallele Schwingung, Ordinate = griffbrettnormale Schwingung) dargestellt. Im linken oberen Bild sieht man, wie die Saite in Bildmitte zunächst vertikal anschwingt, aber danach zuerst nach links und dann nach rechts die Schwingungsebene dreht. Nach ca. 370 ms ist die Vertikalschwingung fast auf null abgeklungen, und die Schwingungsenergie zum überwiegenden Teil an die Orthogonalkomponente übergeben. Ganz anders bei der *neben* der Kopfsattelrinne gelagerten H-Saite: Sie behält ihre Schwingungsebene weitgehend bei, weil die Kopplung zwischen den beiden Schwingungsmoden viel geringer ist (untere Bildzeile).

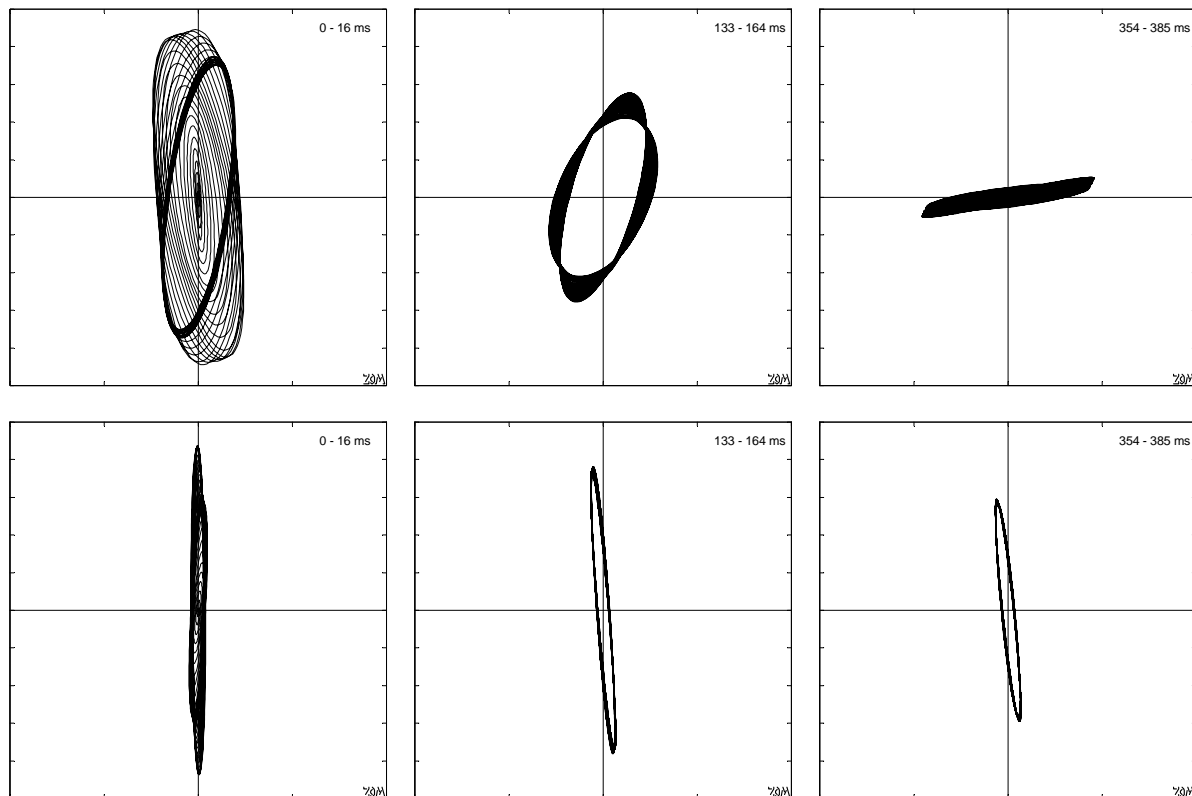


Abb. 7.69: Orbit-Diagramme (Vertikal- gegen Horizontalbewegung). H-Saite, Lagerung im Kopfsattel (oben), Lagerung neben dem Kopfsattel (unten). Stratocaster, 10. Teilschwingung der H-Saite (2476 Hz). Die Analysen wurde an Signalen durchgeführt, die ähnlich, aber nicht identisch mit Abb. 7.68 waren.

Untersucht man Dissipationsprozesse, muss man beide Schwingungsebenen analysieren, will man wissen, welche Spannung am Tonabnehmer entsteht, ist nur die griffbrettnormale Komponente maßgeblich. Dass übliche Magnettonabnehmer nicht nur Transversal-, sondern auch Longitudinalschwingungen abnehmen können, wird in Kap. A.2.3 erläutert, ihre Richtcharakteristik in Kap. 5.11.

Die in diesem Beispiel gefundenen Modenkopplungen am *Kopfsattel* der H-Saite sind natürlich nur von Bedeutung, solange die leere Saite gespielt wird. Sobald ein Finger die Saite auf das Griffbrett drückt, übernimmt der danebenliegende Bund die Auflagerfunktion. Genauso gut können entsprechende Kopplungen aber auch am *Stegsattel* stattfinden, und die wirken sich auch bei gegriffenen Saiten aus. Die **Steg-Konstruktionen** der meisten Elektrogitarren legen die Vermutung nahe, dass sich die Konstrukteure keinerlei Gedanken zur Modenkopplung machten, sondern vor allem die Verstellbarkeit der Saitenlage als Aufgabe sahen. Und möglichst geringe Produktionskosten. Leo Fender führte bei der (als Top-Model geplanten) Jazzmaster die Saiten am Steg in Schrauben-Gewindegängen – aber nicht etwa in Schrauben mit sechs unterschiedlichen Gewindesteigungen, nein, drei Steigungen mussten reichen. Dass die Saiten bekanntermaßen sechs unterschiedliche Durchmesser aufweisen, und die Passungen somit sehr unterschiedlich ausfallen, äh, Passungen? Gibson führt bei der Tune-O-Matic-Bridge die Saiten über Reiter, die verdächtig gleichartig aussehen – alle sechs! Rickenbacker legt die Saiten in kleine Rollen, und hoffte vermutlich, die Fugendämpfung möge nicht allzu groß werden. Und natürlich: Sechs identische Rollen! Die schwingungstechnische Funktion eines Steges war offensichtlich nicht allen E-Gitarrenbauern in gleichem Maße bekannt.

Mehr Details zu den einzelnen Stegkonstruktionen sind in Kap. 7.10 zusammengestellt.

7.7.4.2 Dehnwellendämpfung

Kap. 7.7.4.1 hatte gezeigt, dass an Steg- und Kopfsattel eine Kopplung der transversalen Saitenschwingungen stattfindet. Zusätzlich tauschen aber auch Transversal- und Longitudinal-Schwingungen einen Teil ihrer Schwingungsenergie aus (Kap. 1.4 und Kap. 7.5.2). Die hierdurch angeregten Dehnwellen zeigten bei Abklingmessungen hohe Verlustfaktoren, wodurch einzelne Teiltöne schnell abklingen, d.h. kleine Abklingzeiten aufweisen. Für die folgenden Schwingungsmessungen wurde eine **Fender USA-Standard-Stratocaster** verwendet, deren Tremolo (aka. Vibrato) genretypisch schwebend (*floating*) eingestellt war. Die untersuchte Saite wurde am Kopfende griffbrettnormal angeschlagen, am stegseitigen Ende erfolgte eine Schwingungsanalyse mit dem Laser-Vibrometer.

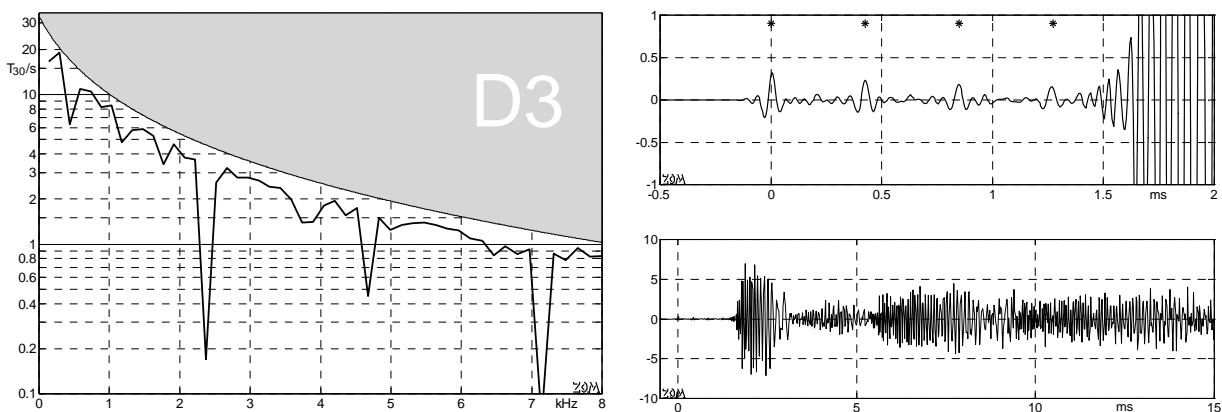


Abb. 7.70: Abklingzeit (links), sowie Zeitfunktionen der GBN-Saitenschnelle. Dehnwellenperiode = 0.42 ms.

Das linke Bild der **Abb. 7.70** zeigt die D_3 -Teiltonabklingzeiten der griffbrettnormalen (GBN) Schnelle. Bei 2.36, 4.7 und 7.1 kHz sind Dämpfungsmaxima (d.h. T_{30} -Minima) zu erkennen, als deren Ursache **Dehnwellenresonanzen** zu vermuten sind. In der Zeitfunktion sieht man, dass (noch ehe die Transversalwelle am Messpunkt eintrifft) kleine Impulse mit einer Periode von 0.42 ms auftreten. Zwar kann das für Saitenquerschwingungen sensible Laser-Vibrometer die Dehnwelle selbst nicht detektieren, wohl aber deren Sekundärwellen (Kap. 1.4). In der umspannenen D-Saite werden Dehnwellen offenbar effizient absorbiert, sodass bei 2.36 kHz (und Vielfachen) eine selektive Dämpfung entsteht.

Diese Dehnwellendämpfung kann stark oder schwach ausgeprägt sein, je nachdem, wie gut Dehnwellen-Resonanzfrequenz und Teiltonfrequenz übereinstimmen. Die bisher durchgeführten Messungen lassen vermuten, dass vor allem die GBN-Schwingung ihre Energie auf die Dehnwelle übertragen kann; Ursache könnte die Saitenkrümmung am Auflager sein (Kap. 7.5.2). In **Abb. 7.71** sind Teiltonpegelabfälle der D-Saite dargestellt: Bei 2364 Hz nimmt die GBN-Schwingung sehr schnell ab, während die GBP-Schwingung eine Abklingzeit wie bei den Nachbartönen aufweist.

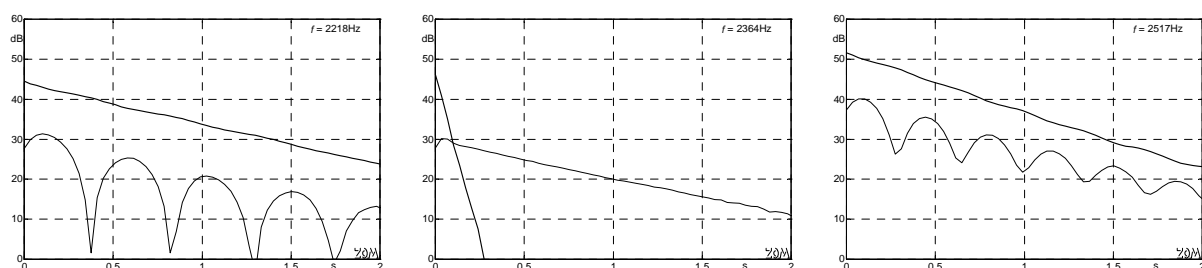


Abb. 7.71: Teiltonpegelabfall; dicke Linie = griffbrettnormal (GBN), dünn = griffbrettparallel (GBP).

7.7.4.3 Residualdämpfung

In aller Regel endet die Saite nicht am Steg- bzw. Kopfsattel, sondern läuft über diesen hinweg bis zum eigentlichen Befestigungspunkt. Diese jenseits des Saitenhauptstückes liegenden **Restsaiten** (Residualsaiten) stellen u.U. wirksame Absorber dar, die der Hauptsaiten Schwingungsenergie entziehen können. Dies wird als Residualdämpfung bezeichnet.

Würde die Saite eine reine Transversalbewegung ausführen, sie könnte keine Energie über das unbewegliche Stützlager hinweg auf die Residualsaite übertragen. Wie aber schon in Kap. 2.7 erläutert, findet in der Saite auch eine **Biegebeanspruchung** statt, und das damit zusammenhängende Biegemoment wirkt über das Lager hinweg und erregt die Residualsaite. Auch die in der Saite auftretenden Längskräfte (\rightarrow Dehnwelle) können zumindest teilweise über das Lager hinweg wirken, weil – insbesondere bei kleinem Knickwinkel – die Saite relativ leicht in Längsrichtung über die Auflagefläche rutschen kann.

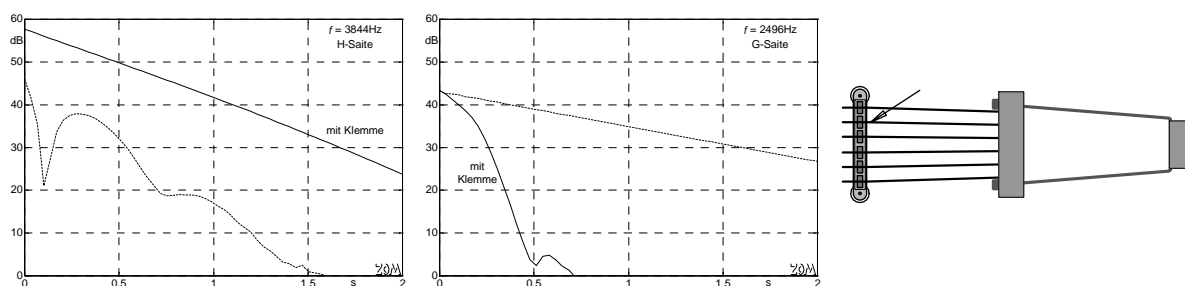


Abb. 7.72: Änderung des Teilton-Abklingens durch Massebelastung der Steg-Restsaiten; Gibson ES-335 TD.

Um die Auswirkungen dieser Residualdämpfung an zwei Beispielen zu quantifizieren, wurde eine Saite einer ES-335 nahe des Kopfsattels griffbrettnormal angeschlagen; nahe des Stegsattels erfolgte die Messung der GBN-Schnelle mit dem Laser-Vibrometer. Als Modifikation wurde nahe des Steges eine kleine Klemme auf die Restsaite aufgesteckt (**Abb. 7.72**, Pfeil). Die Messungen erfolgten an der H- und G-Saite (wobei immer die angeschlagene Saite gemessen und modifiziert wurde). Bei vielen Teiltönen ergab sich kein nennenswerter Effekt, in einigen Fällen wurde aber das Abklingen beeinflusst. Und zwar auf unterschiedliche Art: Bei dem im linken Bild dargestellten Teiltonpegel der H-Saite verbessert die Zusatzmasse Sustain und Pegel, beim anderen Beispiel wird die Schwingung durch die Zusatzmasse rapide abgewürgt*.

Es ist schwierig, diese Dämpfungsmechanismen analytisch zu formulieren, weil zwei Transversalmoden und eine Dehnwelle zusammen auftreten – und zwar auf beiden Seiten des Stegsattels! Die Beispiele dienen deshalb nur als Nachweis, dass die Wirkung der Restsaiten nicht generell vernachlässigt werden darf. Da sich jedoch nur wenige Teiltöne im Ausschwingverhalten ändern, bleiben die klanglichen Auswirkungen eher gering. Bei der untersuchten ES-335 konnte beim "elektrischen Klang" kein hörbarer Unterschied festgestellt werden, wenn während des Spielens die Restsaiten mit dem Handballen bedämpft wurden.

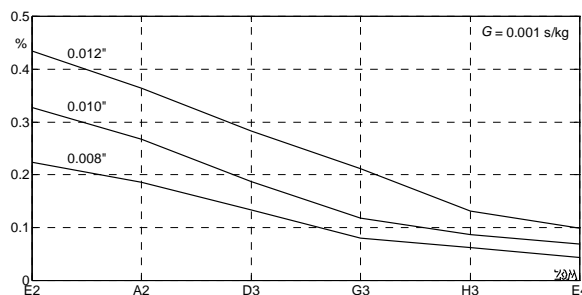
Es ist offensichtlich, dass ein derartiger Dämpfungsmechanismus bei Messungen am leeren Stegsattel (Sattel ohne Saite) nicht gefunden werden kann. Andererseits lässt sich die Sattelkonduktanz (Kap. 7.7.4.4) nur ohne Saite ermitteln, denn der Platz für die Saitenlagerung ist nur einmal zu vergeben. Das wussten schon die alten Philosophen: Wo schon etwas ist, kann nichts anderes mehr sein.

* Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass auch zwischen den einzelnen Saiten und deren Teiltöne Kopplungen und damit Dämpfungen auftreten können – dieser Effekt wird hier nicht weiter untersucht.

7.7.4.4 Auflager-Konduktanz

Alle bisher betrachteten Dämpfungsmechanismen hatten ihre Ursachen in der Saite oder in der umgebenden Luft – die Gitarre und insbesondere ihr edles Klangholz waren bis jetzt an der Klangformung unbeteiligt. Aber natürlich beeinflussen auch sie die Saitenschwingung, und deshalb erfolgt nun eine genauere Analyse der mechanischen Eigenschaften der beiden Saitenlager. Die Betrachtung der Saite als Wellenleiter (Kap. 2) zeigt Reflexionsvorgänge, die sich näherungsweise durch den Wellenwiderstand der Saite und die Lagerimpedanz beschreiben lassen. Der **Wellenwiderstand** ist eine saitenspezifische Größe (Kap. A.5), die Lagerimpedanz wird von Kopf- und Stegsattel gebildet. Jedoch nicht alleine davon, sondern in Kombination mit deren Unterbauten, also Steg, Hals, Korpus. Die **Lagerimpedanz** ist der mechanische Widerstand $Z = F/v$, den eine die Saite entlang laufende Welle am Lager vorfindet. Bei einem unbeweglichen Lager ist dessen Schnelle $v = 0$, und deshalb ist die Lagerimpedanz des idealen Lagers unendlich. Ein derartiges Lager würde perfekt, d.h. verlustfrei reflektieren, doch das geht nur im idealen Modell. Jedes reale Lager absorbiert einen kleinen Teil der ankommenden Wellenenergie (z.B. 1%), sodass nur z.B. 99% reflektiert werden. Je öfter diese Absorption pro Sekunde passiert, desto schneller klingt die Saitenschwingung ab. Nimmt man bei einer mit 100 Hz schwingenden Saite für jedes Lager 1% Energieverlust an, so hat eine Welle, die in einer Sekunde 200 mal an einem Lager reflektiert wurde, nur noch $0.99^{200} = 13\%$ ihrer anfänglichen Energie; ihr Pegel hätte um 8.7 dB abgenommen. Bei einer mit 200 Hz schwingenden Saite wäre nach 1 s die Energie auf 1.8% abgefallen (um 17.4 dB).

Eine Größe zur Beschreibung der Lagerabsorption ist die **Lager-Konduktanz** G , das ist der Realteil der **Lager-Admittanz** (Admittanz = $1 / \text{Impedanz}$, genauer in Kap. 7.5.3). Je größer die Konduktanz, desto mehr absorbiert das Lager, desto kürzer ist das "Sustain". Der Leistungsabsorptionsgrad eines Lagers ist einerseits proportional zum Saiten-Wellenwiderstand, und andererseits proportional zur Lager-Konduktanz. Und da der Wellenwiderstand jeder Saite proportional zu ihrem quadrierten Durchmesser ist, folgt: Je dicker eine Saite, desto mehr wirkt sich die Lagerdämpfung auf die Saitenschwingung aus. In **Abb. 7.73** ist für drei Saitensätze der prozentuale **Leistungs-Absorptionsgrad** für $G = 0.001 \text{ s/kg}$ angegeben.



$$W = D^2 \cdot \rho \cdot M \cdot f_1 \cdot \pi / 2$$

$$a^2 \approx 4 \cdot W \cdot G$$

W = Wellenwiderstand

D = Saitendurchmesser

ρ = Stahldichte

f_1 = Saiten-Grundfrequenz

a^2 = Leistungs-Absorptionsgrad

Abb. 7.73: Leistungs-Absorptionsgrad a^2 für drei verschiedene Saitensätze.

Eine die E₂-Saite entlang laufende Transversalwelle verliert an einem Lager, dessen Konduktanz 0.001 s/kg beträgt, je nach Saitendicke 0.22% – 0.44% ihrer Leistung, ein E₄-Saite hingegen nur 0.04% – 0.1%. Zum Vergleich: Beim E-Bass ergäbe sich unter diesen Bedingungen für die E₁-Saite ein Leistungsverlust von ca. 1%! Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit mit abnehmender Frequenz ebenfalls abnimmt – auf der E₁-Saite eines Elektro-Basses erreicht die Transversalwelle wesentlich seltener das absorbierende Lager als auf der E₄-Saite einer Elektrogitarre. Die Frequenzabhängigkeit der Abklingzeit wird deshalb von zwei gegenläufigen Prozessen dominiert: Der von den Bass- zu den Diskantsaiten abnehmenden Absorption, und der zunehmenden Absorptionshäufigkeit.

Im einfachen Modell ist die durch eine konstante Konduktanz (z.B. $G = 0.001 \text{ s/kg}$) hervorgerufene Lagerabsorption für alle Teiltöne einer Saite gleich groß: Sowohl der Wellenwiderstand als auch die Konduktanz sind hierbei konstant. Und da sich im einfachen Modell (d.h. bei Vernachlässigung der Dispersion) alle Teilschwingungen einer Saite mit derselben Wellen-Geschwindigkeit ausbreiten, zeigt auch die hiervon verursachte Abklingzeit keine Frequenzabhängigkeit. Bei Gesamtbetrachtung mehrerer Absorptionsmechanismen wird die für konstantes G definierte frequenzunabhängige Lagerabsorption also vor allem in den Frequenzbereichen wirken, in denen die anderen Absorptionsmechanismen schwach ausgeprägt sind – d.h. im tieffrequenten Bereich, und auf den tiefen Saiten. Bei realen Saitenlagern ist die Konduktanz nicht konstant, sondern frequenzabhängig. **Abb. 7.74** zeigt hierzu Messwerte, die am Kopfsattel einer **Les Paul** (ohne E_4 -Saite) in der Sattelrinne gemessen wurden. Nur an den durch Punkten markierten Stellen sind Eigenschwingungen der leeren Saite möglich, und nur die dort gemessenen Konduktanzwerte sind für die ausschwingende E_4 -Saite maßgeblich.

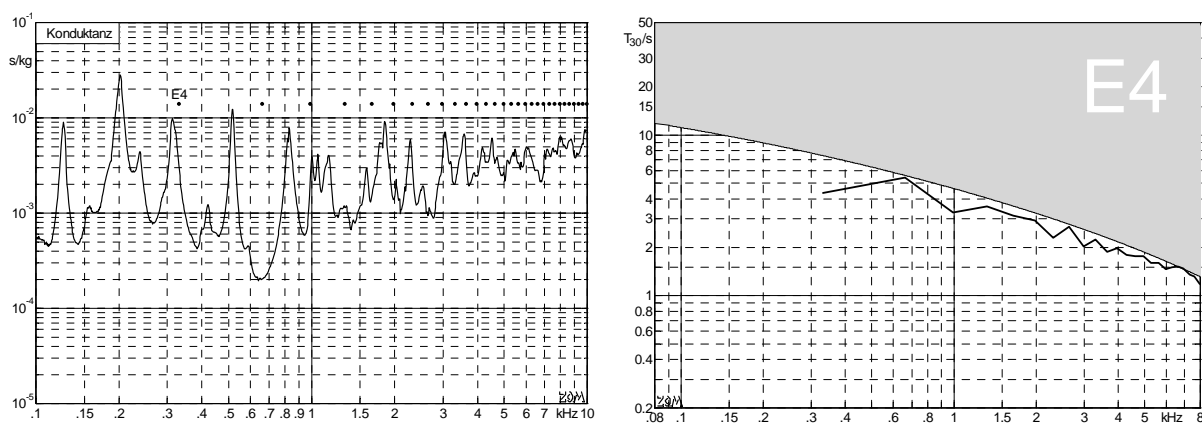


Abb. 7.74: Les Paul Historic, E_4 -Saite: Konduktanz am Kopfsattel (links), berechnete Abklingzeiten (rechts).

Das rechte Bild zeigt berechnete Abklingzeiten für die Teiltöne der E_4 -Saite, unter Berücksichtigung der Strahlungsdämpfung, der inneren Dämpfung, und der Lager-Konduktanz. Nur *einer* Lager-Konduktanz, denn noch ist der Stegsattel nicht berücksichtigt. Der grundsätzliche Verlauf dieser berechneten Kurve hält dem Vergleich mit Messkurven durchaus stand, was nicht weiter verwundert – schließlich wird T_{30} zum überwiegenden Teil von Strahlungsdämpfung und innerer Dämpfung bestimmt. Nur wenn ein Konduktanz-Maximum nahe bei einer Teiltonfrequenz zu liegen kommt, dominiert die Lagerdämpfung, und dann entsteht ein selektives Dämpfungsmaximum, d.h. ein selektives T_{30} -Minimum. Beim Grundton der E_4 -Saite (330 Hz) ist dieser Fall fast erreicht: Würde man die E_4 -Saite nur um ca. einen Halbton tiefer stimmen, die Grundton-Abklingzeit wäre auf die Hälfte (2.2 s) reduziert. Andererseits kann man die Grundton-Abklingzeit auch auf über 7 s verlängern, wenn man z.B. die Gitarre zur Konduktanzmessung anders auf den Messtisch legt (Abb. 7.75). Hierdurch wird aber nur die Grundton-Dämpfung verändert, alle anderen T_{30} -Minima bleiben praktisch gleich.

Fleischer [8] hat für mehrere Gitarren eine Vielzahl verschiedenartiger Impedanzgebirge veröffentlicht, wobei nicht nur am Sattel, sondern auch an jedem Bund gemessen wurde. Diese, sowie weitergehende Untersuchungen [Fleischer 2001, 2006], weisen als Ursache der tiefrequenten Lagerabsorptionen Biege- und Torsionsschwingungen des Gitarrenhalses nach. Lagerung der Saite in einem Hals-Schwingungsknoten ergibt kleine Konduktanz und langes Sustain, Lagerung in einem Schwingungsbauch gibt hohe Konduktanz und "dead Spots". Und wieder einmal ist gezeigt, dass "fühlbares Resonieren" des Gitarrenhalses zwar den Tastsinn erfreuen mag, langdauerndem Ausklingen aber abträglich ist.

Abb. 7.75 zeigt, wie die Kopfsattel-Konduktanz verändert werden kann, ohne der Gitarre bleibende Schäden zuzufügen. Für beide im linken Bild dargestellten Messungen wurde die Gitarre auf einem **Steintisch** gelagert, und unterhalb des Hals/Korpus-Überganges durch ein weiches **Mousepad** unterstützt. Die andere Lagerstelle (Korpuskante am hinteren Gurtpin) wurde für die eine Messung direkt auf den Steintisch aufgelegt, für die andere Messung über ein weiteres Mousepad bedämpft. Unterhalb von 400 Hz kommt es dadurch zu deutlichen Resonanzverschiebungen, im darüber liegenden Frequenzbereich ändert sich praktisch nichts. Dies weist einerseits auf gute Reproduziergenauigkeit hin, andererseits zeigt sich, dass niedrige Halsmoden von der Gitarrenlagerung abhängen – für einen Schwingungstechniker nicht direkt unerwartet.

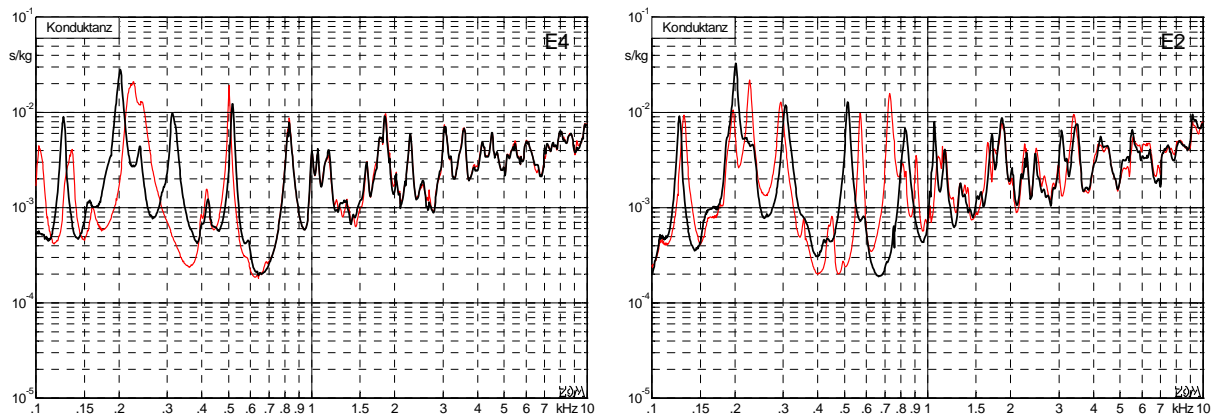


Abb. 7.75: Les Paul Historic, Kopfsattel-Konduktanz: E4 (links), E2 (rechts). Mechanische Modifikationen.

Die im rechten Bild dargestellten Unterschiede rühren von einer **Schraubzwinge** her, die an der Kopfplatte befestigt wurde. Dies ist nun eine Maßnahme, die in unmittelbarer Nähe der Saitenlagerung angreift, und deshalb sind die Auswirkungen größer als beim linken Bild. Beide Maßnahmen können weder als Verbesserung, noch als Verschlechterung interpretiert werden, denn beide haben Auswirkungen auf alle Saiten. Auch wenn sich in Abb. 7.75 die Abklingzeit eines Teiltones verlängert, ist zu befürchten, dass sich gleichzeitig die Abklingzeit eines anderen Teiltones verkürzt.

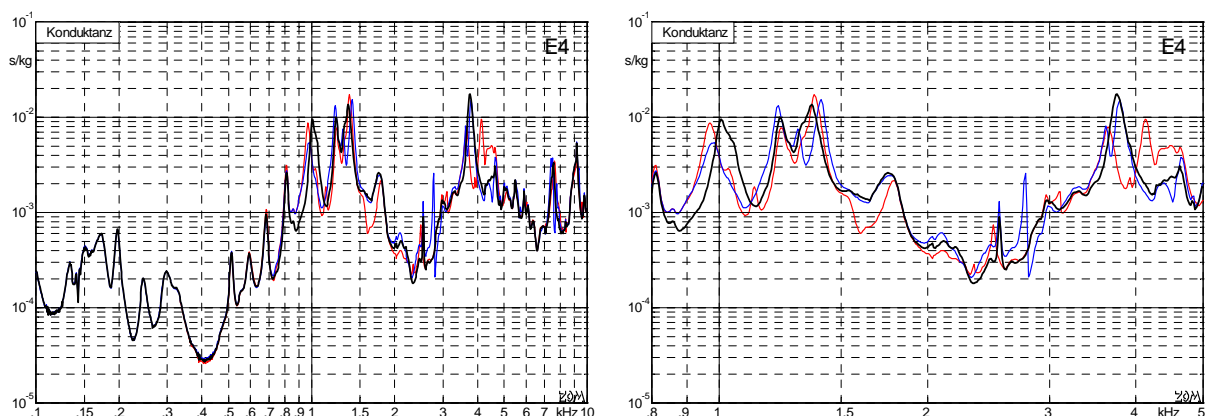


Abb. 7.76: Les Paul Historic, Stegsattel-Konduktanz, E4. Modifikationen = Klemme am Steg montiert.

Die **Stegsattel-Konduktanz** der Les Paul, gemessen am E₄-Böckchen, ist in **Abb. 7.76** dargestellt. Fleischer kommt bei seinen Schwingungsmessungen zu dem Schluss, dass der Hals einer Massiv-Gitarre relativ nachgiebig ist, während der Steg ziemlich unbeweglich bleibt.

Eigene Messungen bestätigen dies für den von Fleischer untersuchten Frequenzbereich bis 700 Hz. Bei mittleren und höheren Frequenzen kann aber – je nach Bauart – der Steg einer Massiv-Gitarre durchaus veritable Eigenschwingungen ausführen und zum effizienten Absorber werden. In **Abb. 7.76** sind drei Messkurven übereinander gezeichnet: Einmal für die Gitarre im Originalzustand, und zweimal für einen durch eine aufgesteckte Klammer modifizierten Steg. Gerade die für die Saitendämpfung wichtigen Konduktanz-Maxima reagieren auf diese Modifikationen, was zu dem Schluss führt, dass diese Maxima **Stegresonanzen** sind! Diese Hypothese ließ sich mit einem Laser-Vibrometer untermauern, das bei den kritischen Frequenzbereichen deutliche Stegsvchwingungen offenbarte. Tieffrequent ist der Steg fast unbeweglich, da stört es auch nicht, wenn man an ihm eine **Zusatzmasse** befestigt. Zwischen 1 und 1.5 kHz sowie um 4 kHz liegen jedoch ausgeprägte Stegresonanzen, und die verstimmen sich beim Anbringen einer Zusatzmasse.

Ergänzende Erkenntnisse zur Wirkung der Steg-Konstruktion auf das Abklingen der Saitenteilschwingungen erbrachten Messungen an einer **Non-Trem-Strat**. Als Stegsattel sind zwei Varianten gebräuchlich: Bei den frühen Strats wurde die Saite durch ein S-förmig gebogenes Blech (das **Vintage-Böckchen**) geführt, das mit drei Stellschrauben justiert werden konnte. Erst Ende 1971 erfolgte der Wechsel zum massiven, auch heute noch üblichen Spritzguss-Böckchen [Duchossoir]. Für beide Böckchen wurde das Abklingen der Teiltöne einer 0.013" H-Saite analysiert und als Abklingzeit dargestellt (**Abb. 7.77**, linkes Bild). Lässt man die kleineren Kurvenschwankungen zunächst beiseite, findet man bei der im Spritzguss-Böckchen gelagerten Saite (durchgezogene Linie) einen Kurvenverlauf, der sich gut der durch Strahlungsdämpfung und innerer Dämpfung vorgegebenen Orientierungslinie nähert, wohingegen die Abklingzeit der im Vintage-Böckchen gelagerten Saite hochfrequent nur etwa halb so groß ist. Und die Erklärung liegt auf der Hand: Die Blechböckchen lassen sich leichter verbiegen, und deshalb absorbieren sie stärker als die massiven. Also: Bild ins Internet – und wieder ein unausrottbares Gerücht mehr.

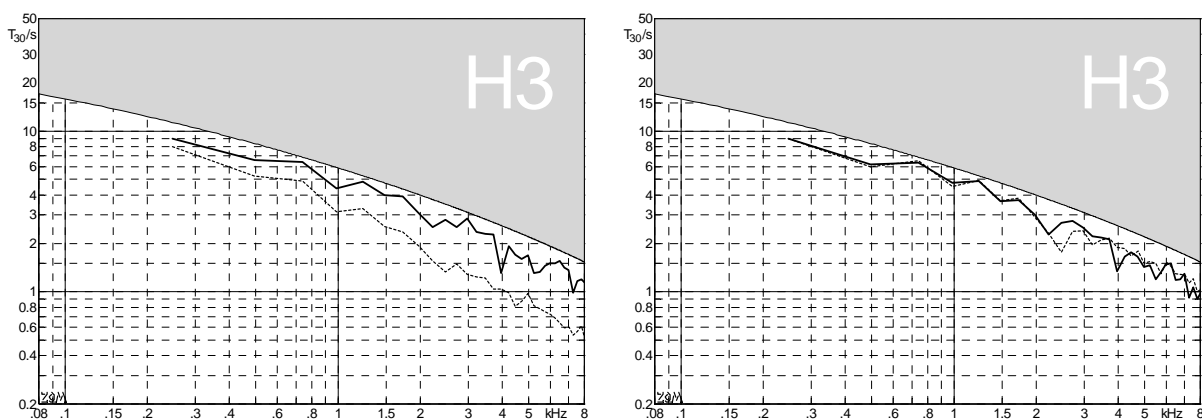


Abb. 7.77: Teilton-Abklingzeiten der H3-Saite einer Non-Trem-Stratocaster. Links: Massivböckchen (—) bzw. Vintage-Böckchen (---). Rechts: Massivböckchen (—), anderes Vintage-Böckchen (---).

Zur Kontrolle wurde nochmals das Massivböckchen montiert, die Messkurve (rechtes Bild) ist durchaus vergleichbar. Dann kam nochmals ein Blechböckchen, diesmal aber nicht mehr dasselbe, sondern ein anderes – und schon erhält man andere Ergebnisse. **Abb. 7.77** dokumentiert unmissverständlich, dass das Stegböckchen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Ausschwingen der Saite ausübt, und damit an der Klangformung wesentlich beteiligt ist. Ganz offensichtlich gibt es bei diesen Böckchen eine nicht unerhebliche **Fertigungsstreuung**, was bei einem genauen Blick auf die spezielle Konstruktion auch nicht verwundert: Schreibt doch Kollmann [1993] sehr überzeugend, dass *die Fugendämpfung der*

wichtigste Dämpfungsmechanismus der Maschinenakustik ist. Fugen gibt's beim Stratocaster-Steg reichlich, wie z.B. zwischen dem Steg-Böckchen und seinen drei Schrauben, zwischen diesen und der Trägerplatte, und natürlich zwischen der Saite und dem Böckchen. Die ganze Konstruktion erweckt nicht den Eindruck, als sei sie von einem Experten bezüglich ihrer Dämpfungseigenschaften optimiert worden, und deshalb ist fast schon zu erwarten, dass jeder Steg sein individuelles Eigenleben bzw. seine individuellen Dämpfungen entwickelt.

Um es nochmals zu präzisieren: Bei derart hohen interindividuellen Streuungen kann eben nicht mehr behauptet werden, dass das Vintage-Böckchen signifikant anders absorbiert als das Massiv-Böckchen. Stattdessen kann nur gefolgert werden, dass sich auch bauartgleich Böckchen in ihren Dämpfungseigenschaften unterscheiden können.

Die bisher vorgestellten Dämpfungsvorgänge sollen nun in einem Beispiel zusammengefasst werden. Die Messungen erfolgten an einer **Gibson ES-335**, die vorher mit neuen Saiten (9/46) ausgestattet worden war. Die A₂-Saite wurde nahe des Kopfsattels griffbrettnormal angeschlagen, ihre Schwingungen wurden nahe des Stegsattels zweidimensional mit zwei Laser-Vibrometern aufgenommen. **Abb. 7.78** zeigt im linken Bild eine Auswertung der Teilton-Abklingzeiten. Bis ca. 1 kHz sind die Minima Halsresonanzen zuzuordnen, die beiden Einbrüche zwischen 1.5 – 2 kHz sind auf Dehnwellen- bzw. Stegresonanzen zurückzuführen.

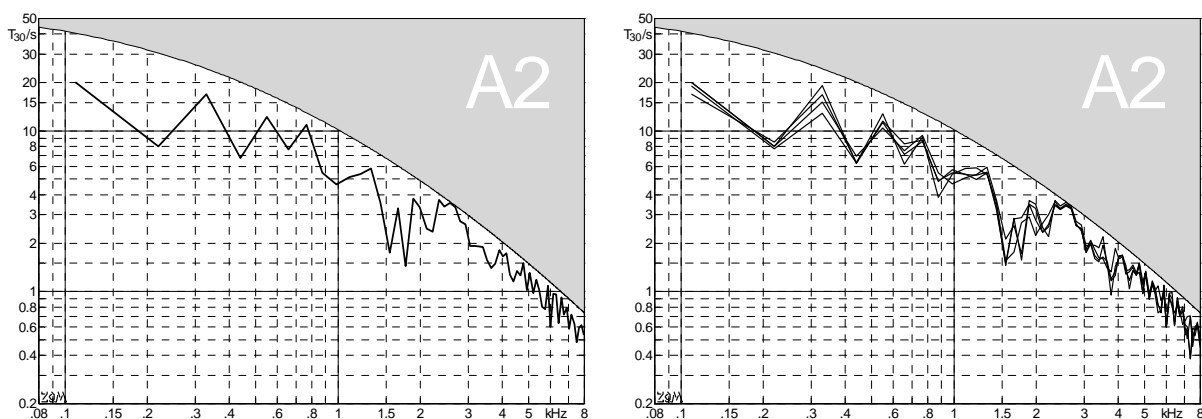


Abb. 7.78: Teilton-Abklingzeiten der leeren A₂-Saite einer Gibson ES-335; unterschiedliche Stegpositionen.

Der **Steg der ES-335** ist die berühmte "Tune-O-Matic-Bridge". Aber wie so oft bei Berühmtheiten: Mit unübersehbarer Tendenz zur Labilität. Der Steg ist nämlich höhenverstellbar, und weil hierfür reichlich Spiel vorgesehen wurde, auch seitlich verschiebbar. Das rechte Bild in **Abb. 7.78** zeigt eine Kurvenschar, die entsteht, wenn man den Steg seitlich verschiebt. Die grobe Tendenz bleibt erhalten, im Detail zeigen sich jedoch Unterschiede. Bei einer Les Paul (**Abb. 7.76**) wurde schon demonstriert, wie durch das Aufsetzen einer kleinen Klammer die vom Steg verursachte Saitendämpfung modifiziert werden kann, ergänzend zeigt **Abb. 7.79** einen weiteren Nachweis: Im linken Bild ist die Abklingzeit der A₂-Saite dargestellt, einmal für die Gitarre im Originalzustand, einmal modifiziert (Klammer auf der Steg-Restsaiten). Vor allem um 1 kHz ändert sich das Teilton-Abklingen, was die Kombination Steg/Restsaite als mögliche Dämpfungsursache nahe legt. Im rechten Bild ist ein Schnelle-Spektrum dargestellt, aufgenommen mit einem Laser-Vibrometer, dessen Strahl direkt neben dem A₂-Böckchen auf den darunter liegenden Steg gerichtet war. Zur Messung wurde die A₂-Saite nahe des Kopfsattels griffbrettnormal angeschlagen. Zwischen 1.5 und 2 kHz zeigt sich ein Schwingungsmaximum, weil hier offenbar eine Stegresonanz vorliegt. Und wieder einmal ist bestätigt, was in Gitarren-Zeitschriften nicht geglaubt wird: Stegsschwingung = Saitendämpfung.

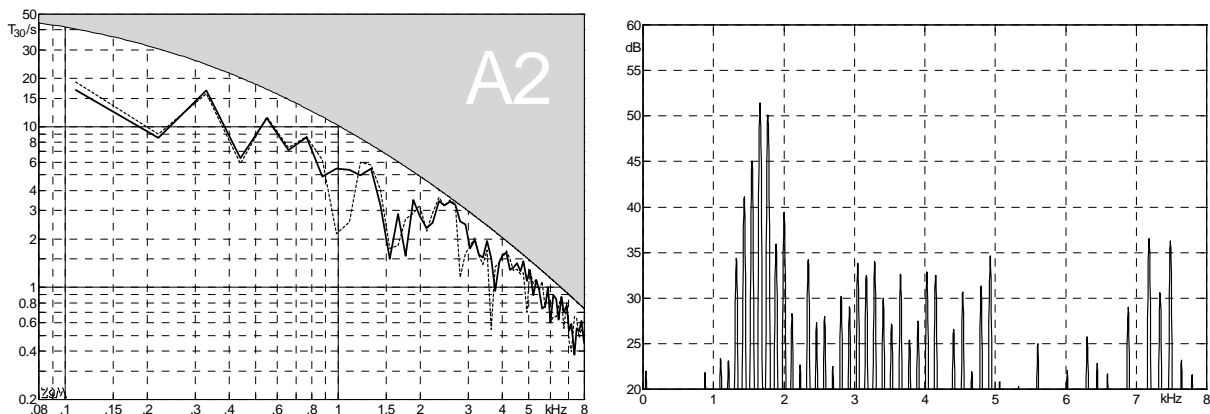


Abb. 7.79: Teilton-Abklingzeiten der leeren A₂-Saite einer Gibson ES-335. Links: Originalzustand (—), kleine Klammer auf der Steg-Restsaiten (---). Rechts: Schnelle-Spektrum des Steges, neben dem A₂-Böckchen.

Bei 1.8 kHz liegt die Grundfrequenz der A₂-Dehnwellenresonanzen, und auch diese können zur Dämpfung beitragen (3.6 kHz). Gegenüber der grau abgesetzten Fläche, die den globalen Verlauf der Saitendämpfung markiert, zeigt die Abklingzeit bei der ES-335 charakteristische Abweichungen. Die noch etwas markanter werden, wenn man die Saitenschwingung nicht zweidimensional auswertet, sondern (wie auch der Tonabnehmer) nur die griffbrettnormale Saitenschwingung analysiert. Deren Abklingzeit ist in **Abb. 7.80** dargestellt. Dass sich zwischen den beiden Analysearten Unterschiede ergeben, ist auf nichtexponentielles Ausschwingen zurückzuführen (Kap. 7.6.3), Schwebungen bzw. Knickkurven führen zu Mehrdeutigkeiten. Die Unterschiede zwischen der in Abb. 7.80 analysierten ES-335 und der Stratocaster sind bezüglich zweier Schwerpunkte zu diskutieren: Bis ca. 1 kHz bestimmen Halsresonanzen die Saitenbedämpfung, im darüber liegenden Frequenzbereich sind es vor allem steg- und saitenspezifische Prozesse. Das 1.5–2-kHz-Loch der ES-335 hat seine Ursache eindeutig in einer Stegresonanz, u.U. verstärkt durch eine Dehnwellenresonanz. Die Minima bei 3.7 und 5.4 kHz sind mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls auf Dehnwellenresonanzen zurückzuführen. Abstrahiert man hiervon, bleiben im Bereich über 1 kHz nur mehr kleine Unterschiede übrig, die ihren Detailreichtum auch noch verändern, wenn man kleinere Verschiebungen am Stegböckchen vornimmt. Daraus folgt: Obwohl sich diese beiden Gitarren in ihrem Aufbau ganz wesentlich unterscheiden (Strat = Massivgitarre, ES-335 = Halbresonanzgitarre), wird der Höhenbereich nur von der Saite und deren Lager, aber praktisch nicht vom Holz bestimmt. Unterhalb von ca. 1 kHz bestimmen Halsresonanzen die Saitendämpfung, und nur hier hat das Holz Auswirkungen. **Das Holz des Halses!** Der Korpus als Halswiderlager ist zwar auch beteiligt, maßgeblich sind jedoch die Biege- und Torsionsresonanzen des Halses.

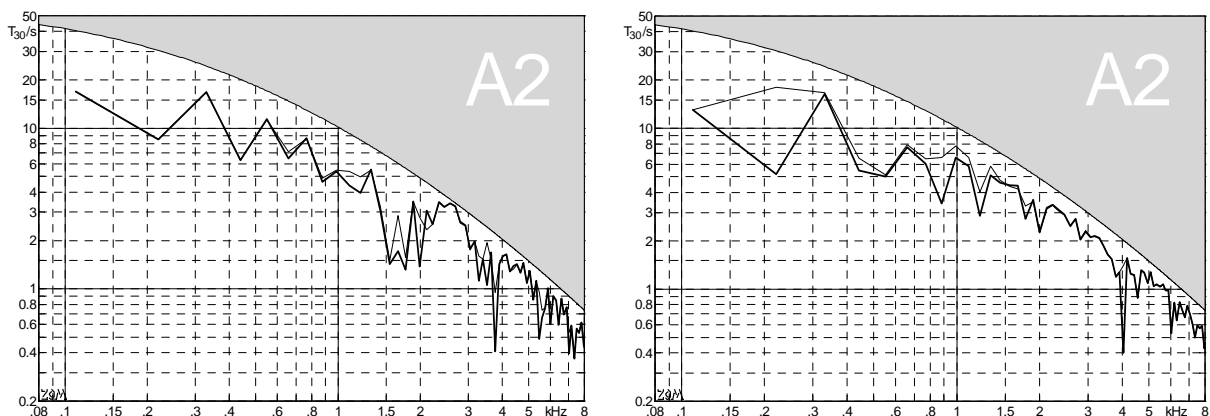


Abb. 7.80: Teilton-Abklingzeiten einer Gibson ES-335 (links), bzw. einer Fender Stratocaster (rechts). Die dicke Linie gehört zur griffbrettnormalen Saitenschwingung, die dünne zur zweidimensionalen Analyse.

Abb. 7.81 zeigt einen ähnlichen Vergleich, nun aber für die E₄-Saite. Bei der 2D-Analyse ergeben sich nur kleine Unterschiede, die z.T. auch darin begründet sein mögen, dass die Saitendurchmesser unterschiedlich waren. Bei der Stratocaster klingen einige Teiltöne schwebend ab, was zu den bereits erläuterten Diskrepanzen führt. Die im direkten Vergleich gerade eben hörbar werden, ihre Ursache aber weder in den (für diese Messung ganz herunter gedrehten) Tonabnehmermagneten haben, noch im Korpusholz, sondern alleine in den Saitenlagern. Auf den abgestrahlten **Luftschall** hat der Korpus durchaus einen erheblichen Einfluss, für die vom Tonabnehmer erzeugte Spannung ist er aber unwesentlich, solange typische Konstruktionsregeln nicht gröblichst verletzt werden.

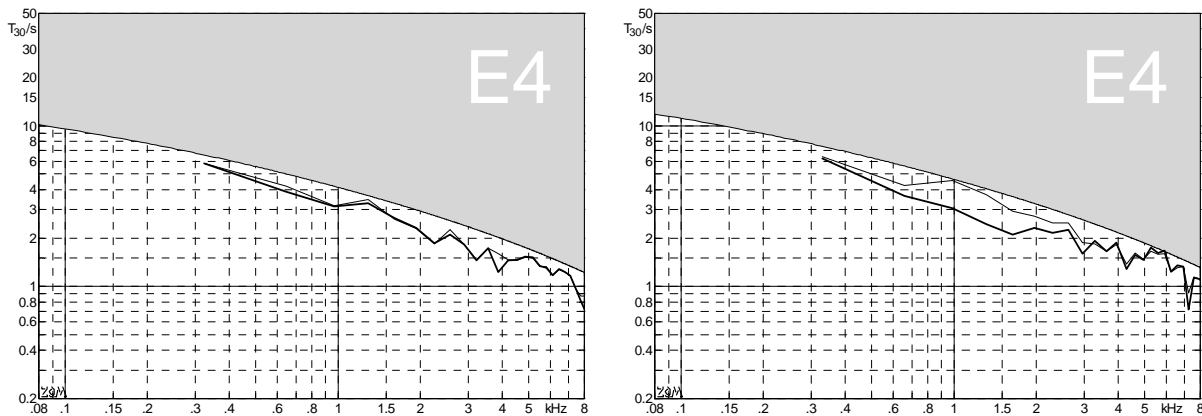


Abb. 7.81: Teilton-Abklingzeiten einer ES-335 (E₄, 0.009", links), bzw. einer Stratocaster (E₄, 0.010", rechts). Die dicke Linie gehört zur griffbrettnormalen Saitenschwingung, die dünne zur zweidimensionalen Analyse.

Die bisher gefundenen T_{30} -Unterschiede sollen nochmals mit Berücksichtigung musikalischer Anforderungen diskutiert werden. Wie relevant ist der Unterschied zwischen z.B. $T_{30} = 3.0$ s und 2.5 s? Für 0.5 s Tondauer (Viertel bei 120 Bpm) erfolgt bei $T_{30} = 3.0$ s ein Pegelabfall um 5.0 dB, bei $T_{30} = 2.5$ s sind's 6.0 dB. Demgegenüber kann sich ein Teiltonpegel um 10 dB (oder noch um viel mehr) ändern, wenn die Saite ein paar Zentimeter näher am Steg angezupft wird! Das soll nicht heißen, dass eine kurze Abklingzeit generell mit einem höheren Pegel kompensiert werden kann. Nein, zunächst sind das voneinander unabhängige Größen, die aber durch das **Gehör** ihre spezielle Bewertung erfahren. Definiert man als "**Attack**" die ersten ca. 100 ms des Gitarrentones, so wählt man damit eine Zeitspanne, die der Integrationsdauer des Gehörs entspricht [12]. Während dieser Zeit ist tatsächlich ein psychoakustisches "Trading" zwischen Anfangspegel und Abklingzeit möglich. Die Veränderung des Ortes, an dem die Saite angezupft wird, hat aber wesentlich größere klangliche Auswirkungen als z.B. in Abb. 7.81 dargestellten Unterschiede, wie Hörversuche beweisen: Man hört praktisch immer Unterschiede, die aber in den weitaus meisten Fällen auf leicht variierenden Anzupfort oder leicht unterschiedliche Plektrumhaltung zurückzuführen sind. Dass zwischen $T_{30} = 1.5$ s und $T_{30} = 0.4$ s (Abb. 7.80) wesentliche physikalische Unterschiede bestehen, soll gar nicht in Abrede gestellt werden – wenn diese Unterschiede bei 4 kHz auftreten, ist ihre auditive Relevanz aber nur sehr gering. Das Gehör fasst in der zugehörigen Frequenzgruppe nämlich ca. 7 Teiltöne zur gemeinsamen Verarbeitung zusammen, da spielt der Pegelabfall eines einzelnen Teiltones nicht die große Rolle. Und dann darf nicht vergessen werden, dass die bisher dargestellten Abklingzeiten alle an fabrikneuen Saiten gemessen wurden – schon wenige Minuten mehr oder weniger virtuoseres Spiel sorgt bei den umspannten Saiten für Haut- und Fettablagerungen, wodurch die Abklingdauer ganz erheblich abnimmt, und sich noch weniger von den Korpusparametern beeinflussen lässt. Also: **Die Finger sind's**, in jeder Beziehung.

7.7.5 Finger-, Hand- und Kapodaster-Dämpfung

Legt man die Gitarre zum Messen auf einen schweren Steintisch, ist i.d.R. eine gute Reproduzierbarkeit gewährleistet, weil keine zitternde Hand das Untersuchungsobjekt bewegt. Sehr praxisnah ist eine derartige Lagerung aber nicht, denn natürlich werden die Saiten beim Spielen "gegriffen": Dabei liegt die Greifhand an der Rückseite des Gitarrenhalses an, und ein Finger drückt die Saite gegen den Bund. Aus Sicht der Schwingungstechnik ist der Gitarrenhals ein Biege- / Torsionsbalken, ein zwar steifes Gebilde, das aber dennoch gebogen und verdreht werden kann. Nicht viel, aber wesentlich. Der Kontakt zu Hand und/oder Finger verändert die mechanischen Schwingungsparameter des Halses, und nimmt Einfluss auf Resonanzfrequenzen und deren Dämpfungen. Der biege- und drehbare Gitarrenhals schwingt mit, sobald eine Saite schwingt, und leitet Schwingungsenergie in die Hand bzw. den/die Finger. Je mehr Schwingungsenergie Hand oder Finger aufnehmen, desto stärker wird die Saite bedämpft. Auf die genauen Unterschiede zwischen Wirk- und Blindenergie soll nicht näher eingegangen werden, die Messergebnisse sind selbsterklärend.

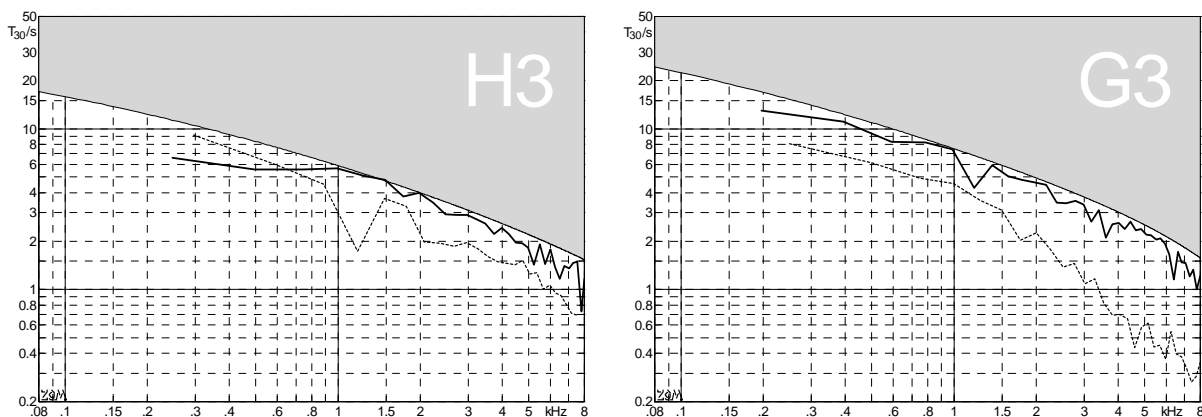


Abb. 7.82: Teilton-Abklingzeiten, Stratocaster. Die gestrichelten Kurven wurden mit Kapodaster gemessen, der auf der H-Saite am 5. Bund, auf der G-Saite am 4. Bund aufgesetzt war.

Im Interesse möglichst ruhiger Gitarrenlage wurde als Ersatz für die Greifhand ein Shubb-**Kapodaster** an den Hals einer Stratocaster montiert (Abb. 7.82). Wie bei den anderen Analysen wurde die zu messende Saite neben dem Kapodaster griffbrettnormal angeschlagen, die Messung der Saitenschnelle erfolgte zweidimensional in Stegnähe. Vermutlich spielen die genaue Kapodaster-Position und seine Anpresskraft eine Rolle, ausführliche Untersuchungen waren an dieser Stelle aber nicht geplant. Stattdessen sollte die prinzipielle Auswirkung demonstriert werden, was mit **Abb. 7.82** gut gelingt: Der Kapodaster wirkt vor allem als zusätzlicher Dämpfer, er verringert die Abklingzeit insbesondere im hochfrequenten Bereich. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich bei Versuchen mit einer von hinten an den Gitarrenhals gelegten Hand, die hiervon verursachten Dämpfungen wirken u.U. noch stärker als die vom Kapodaster erzeugten. Da sich beim Anlegen des Kapodasters Saitentonhöhe und Auflagestelle ändern, ergeben sich andere Paarungen zwischen Teiltonfrequenzen und Halsresonanzen, als deren Folge selektive Resonanzeinbrüche auftreten können. Angesichts dieser gravierenden Effekte erscheint es nicht sinnvoll, über kleine Zacken der T_{30} -Kurve nachzudenken, denn die durch Spielhand (Plektrum) und Greifhand hervorgerufenen Klangänderungen dominieren gegenüber den meisten auflagerbedingten Dämpfungsmechanismen. Nur wenige Steg-, Hals- oder Saiten-Resonanzen sind in der Lage, die Abklingzeit einzelner Teiltöne erheblich zu verkürzen – Hörversuche hierzu sind in einem eigenen Abschnitt zusammengefasst.