

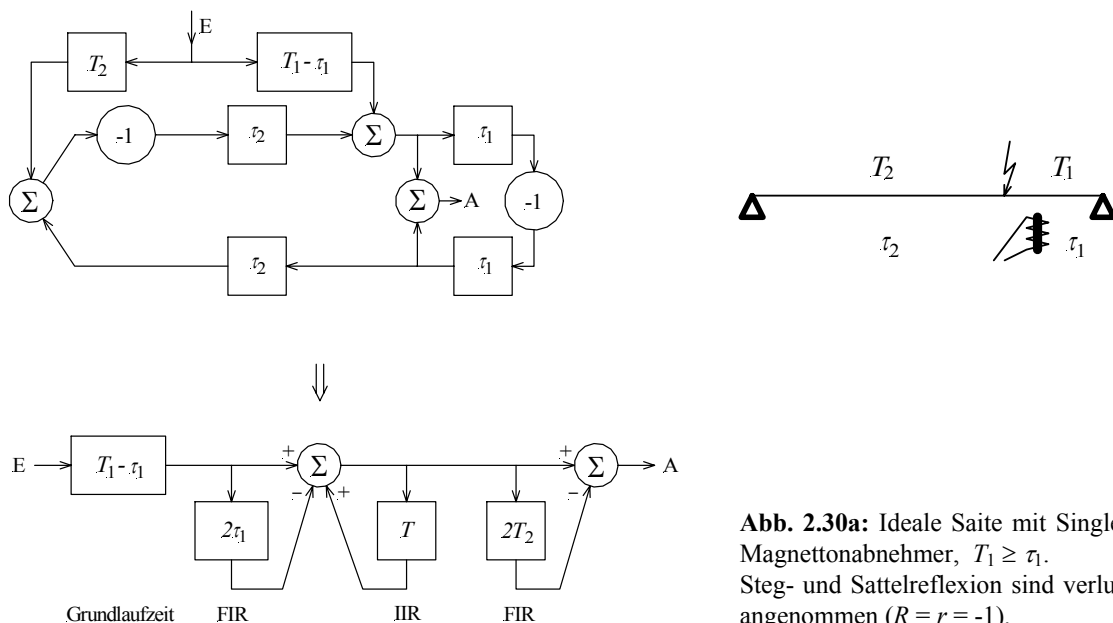
### 2.8.2 Saite mit Singlecoil-Tonabnehmer

Das in Abb. 2.26 angegebene SFD wird jetzt um einen Magnettonabnehmer-Ausgang erweitert. Hierbei wird angenommen, dass der Tonabnehmer die Saitenschwingung nicht beeinflusst. Diese Annahme ist nicht grundsätzlich gerechtfertigt, denn zum einen verändert die Anziehungskraft des Permanentmagneten die Saitenschwingungen, zum anderen fordert der Energiesatz, dass die entstehende elektrische Energie von der Saite geliefert wird. Während der zweite Effekt wegen des hochohmigen Betriebs vernachlässigt werden kann, sind starke Magnete bei geringem Saitenabstand durchaus für ihre Störwirkung bekannt (Kap. 4.11). Zur prinzipiellen Erläuterung der Übertragungscharakteristik ist eine Nachbildung der Anziehung aber nicht erforderlich.

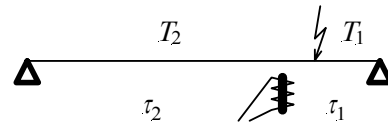
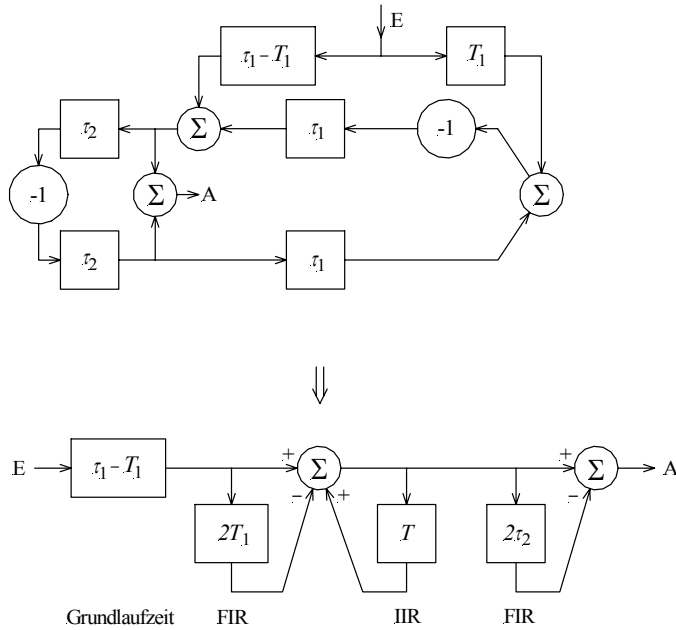
In **Abb. 2.30** ist das vereinfachte Modell für eine ideale Saite und einen einspulgigen Magnet-Tonabnehmer dargestellt. Hierbei bezeichnen  $T_1$  bzw.  $T_2$  die Laufzeit von der Anzupfstelle zum Steg bzw. zum Sattel,  $\tau_1$  bzw.  $\tau_2$  ist die Laufzeit von der Position des Tonabnehmers zum Steg bzw. zum Sattel. Durch mehrfaches Umzeichnen erhält man eine Kettenschaltung von vier verschiedenen Filtern:

- Eine Grundlaufzeit vom Anzupfpunkt zum Tonabnehmer
- Ein FIR-Filter mit der langen Verzögerung  $2T_2$  (bzw.  $2\tau_2$ )
- Ein rekursives IIR-Filter zur Nachbildung der Saitenschwingung
- Ein FIR-Filter mit der kurzen Verzögerung  $2\tau_1$  (bzw.  $2T_1$ )

Die Reihenfolge dieser vier linearen Teilsysteme ist beliebig vertauschbar. Die Tonhöhe hängt vom IIR-Filter ab, die Klangfarbe von den FIR-Filtern, deren Interferenzwirkung auf die Laufzeiten  $T_1$  und  $\tau_1$  zurückgeführt werden kann. Für die Position des Tonabnehmers und des Anzupfpunktes gibt es drei Fälle:  $T_1 < \tau_1$ ,  $T_1 > \tau_1$ , und  $T_1 = \tau_1$ . Hierbei ist es gleichgültig, ob der Tonabnehmer oder der Anzupfpunkt näher am Steg liegt. Man kann z.B. den Tonabnehmer 10 cm weit vom Steg entfernt montieren, und die Saite 4 cm vom Steg entfernt anzupfen, oder den Tonabnehmer 4 cm weit vom Steg entfernt montieren, und die Saite 10 cm vom Steg entfernt anzupfen – das Ergebnis ist *im linearen Modell* identisch (Abb. 2.35). Hiermit wird jedoch nicht die auf die Bünde aufprellende Saite nachgebildet.



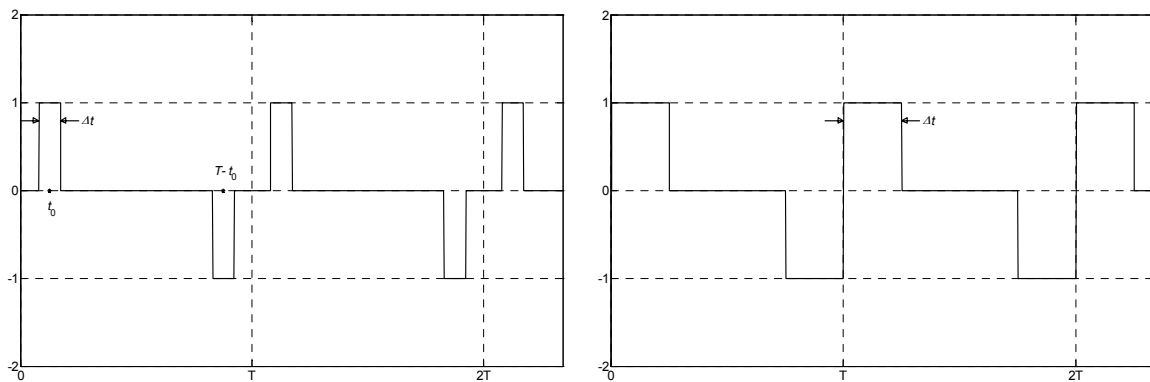
**Abb. 2.30a:** Ideale Saite mit Singlecoil-Magnettonabnehmer,  $T_1 \geq \tau_1$ . Steg- und Sattelreflexion sind verlustfrei angenommen ( $R = r = -1$ ).



**Abb. 2.30b:** Ideale Saite mit Singlecoil-Magnettonabnehmer,  $T_1 \leq \tau_1$ . Steg- und Sattelreflexion sind verlustfrei angenommen ( $R = r = -1$ ).

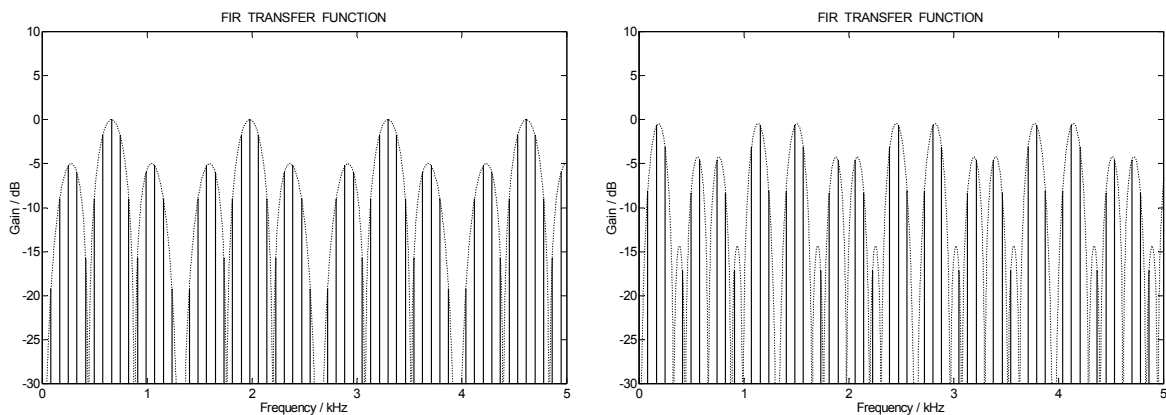
Die zur Sprunganregung gehörende **Sprungantwort** ist in **Abb. 2.31** dargestellt. Sie zeigt, ebenso wie **Abb. 2.30**, dass beim Übergang von  $T_1 < \tau_1$  auf  $T_1 > \tau_1$  lediglich die beiden Laufzeiten  $T_1$  und  $\tau_1$  vertauscht werden müssen. Die Periodendauer dieses dispersionsfreien Filters beträgt  $T = 2(T_1 + T_2) = 2(\tau_1 + \tau_2)$ . Innerhalb dieser Periode befinden sich bei der Sprungantwort zwei Rechteckimpulse, zentriert um den Zeitpunkt  $t_0$  bzw.  $T - t_0$ . Für  $T_1 < \tau_1$  ergibt sich  $t_0 = \tau_1$ , für  $T_1 > \tau_1$  ergibt sich  $t_0 = T_1$ . Die Impulsbreite beträgt  $\Delta t = |T_1 - \tau_1|$ .

Die Impulsbreite entspricht der Transversalwellen-Laufzeit vom Anzupfpunkt zum Tonabnehmer. Beträgt diese Distanz z.B. 4 cm, so ergibt sich die Impulsbreite zu  $4 \cdot T / 2 \cdot 64 = T / 32$ . Hierbei wurde die Mensur zu 64 cm angenommen. Wenn die Saite genau über dem Tonabnehmer angezupft wird, schließen die beiden Rechteckimpuls lückenlos aneinander an.

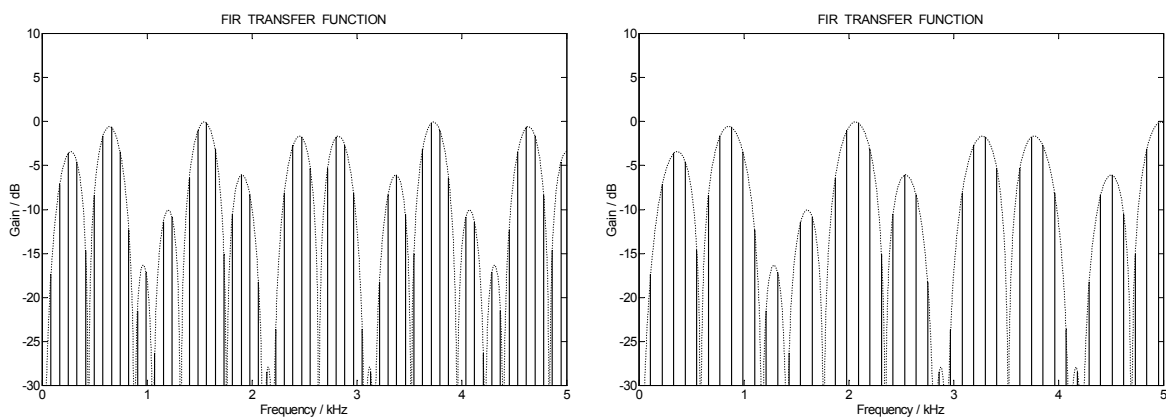


**Abb. 2.31:** Sprungantwort des Filters aus **Abb. 2.30**. Im linken Bild ist  $T_1 \neq \tau_1$ , im rechten  $T_1 = \tau_1$ . Eingangsgröße ist für das Filter ein Kraftsprung am Anzupfpunkt. Ausgangsgröße ist die Saitenschnelle über dem Tonabnehmermagnet; zu ihr ist die Quellenspannung des Tonabnehmers proportional. Die Klemmenspannung ergibt sich aus der Quellenspannung durch Tiefpassfilterung (Kap. 5.9). Insbesondere bei den tiefen Saiten sorgt die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit (Dispersion, Kap. 2.8.4) dafür, dass schon nach kurzer Zeit die rechteckige Kurvenform verändert wird (**Abb. 2.40**). Um diesen Effekt nachzubilden, müssen in **Abb. 2.30** die Verzögerungsglieder als Allpässe ausgeführt werden (**Abb. 2.39**).

Die Berechnung der **Gesamt-Übertragungsfunktion** der vier in Kette geschalteten Einzelfilter aus Abb. 2.30 erfordert eine Multiplikation der Einzel-Übertragungsfunktionen, woraus etwas kompliziertere Frequenzgänge resultieren (**Abb. 2.32**).



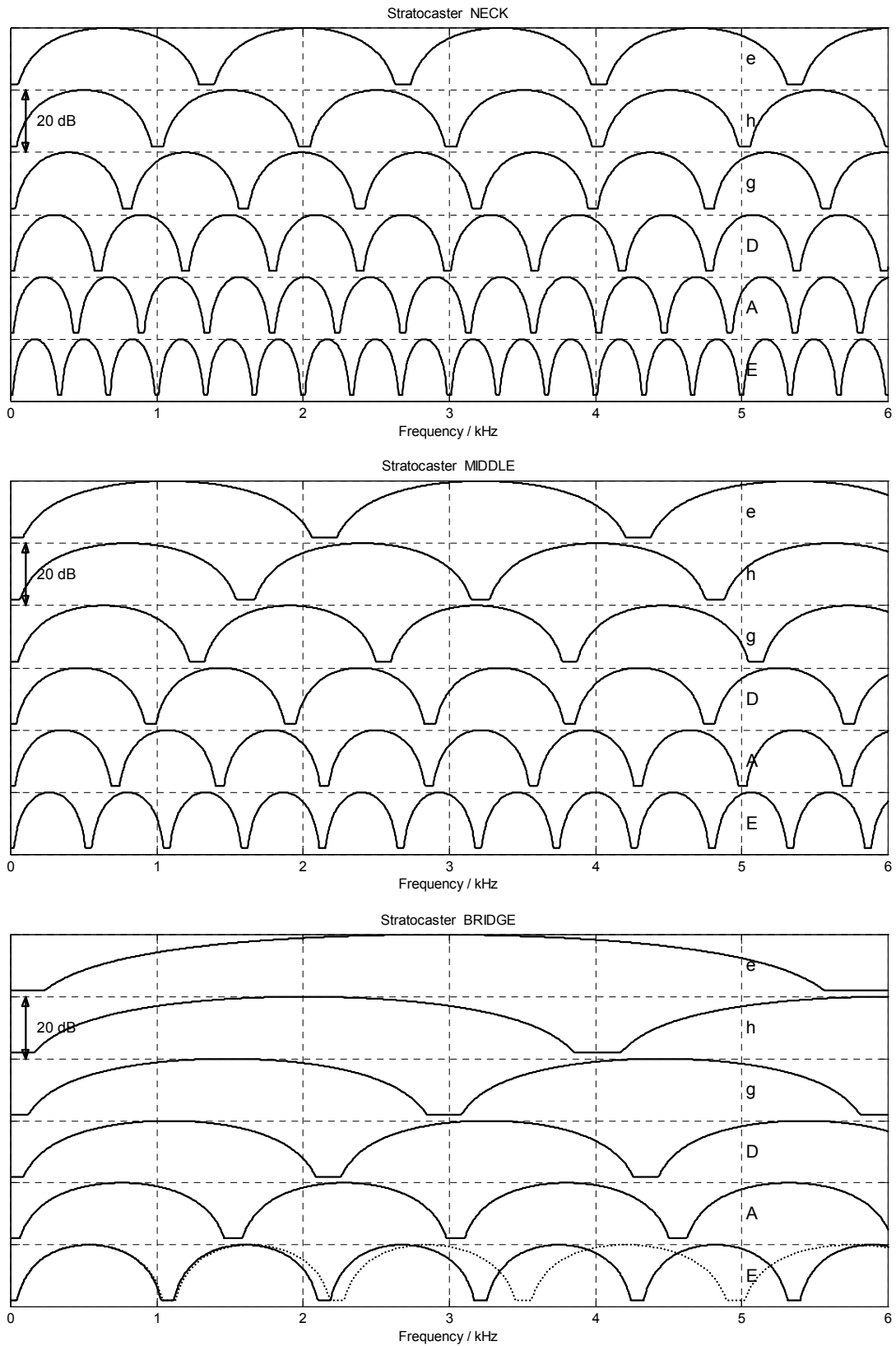
**Abb. 2.32a:** Übertragungsfrequenzgang, E<sub>2</sub>-Saite in 12 cm Entfernung vom Steg angezupft. Mensur = 64 cm. Steg-Tonabnehmer (4 cm vom Steg entfernt, linkes Bild); Hals-Tonabnehmer (16 cm vom Steg entfernt, rechts).



**Abb. 2.32b:** Übertragungsfrequenzgang, Saite in 12 cm Entfernung vom Steg angezupft, Steg-Tonabnehmer (5 cm vom Steg entfernt; Mensur = 64 cm). Linkes Bild: E<sub>2</sub>-Saite, rechtes Bild: A-Saite.

Besonders wichtig ist, dass die beiden FIR-Filter **saitenspezifisch** wirken, und nicht (wie der in Kap. 5 diskutierte Magnettonabnehmer) global filtern. Die Wicklung der Tonabnehmer-Spule wird von den Feldänderungen aller 6 Saiten durchflossen, deshalb wirken tonabnehmerbedingte Resonanzüberhöhungen in gleicher Weise auf alle 6 Saiten. Die Auslöschungen der FIR-Filter beruhen aber auf Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeiten, und die sind saiten-spezifisch. Wie bereits erläutert, hängen diese nicht von der gegriffenen Tonhöhe ab, sondern immer von der Tonhöhe der leeren Saite – denn die bestimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_p$ . Die FIR-Charakteristik kann deshalb bei mehrsaitigem Spiel nicht elektronisch mit einem Effektgerät erzeugt werden, zumindest nicht bei üblichen Tonabnehmern.

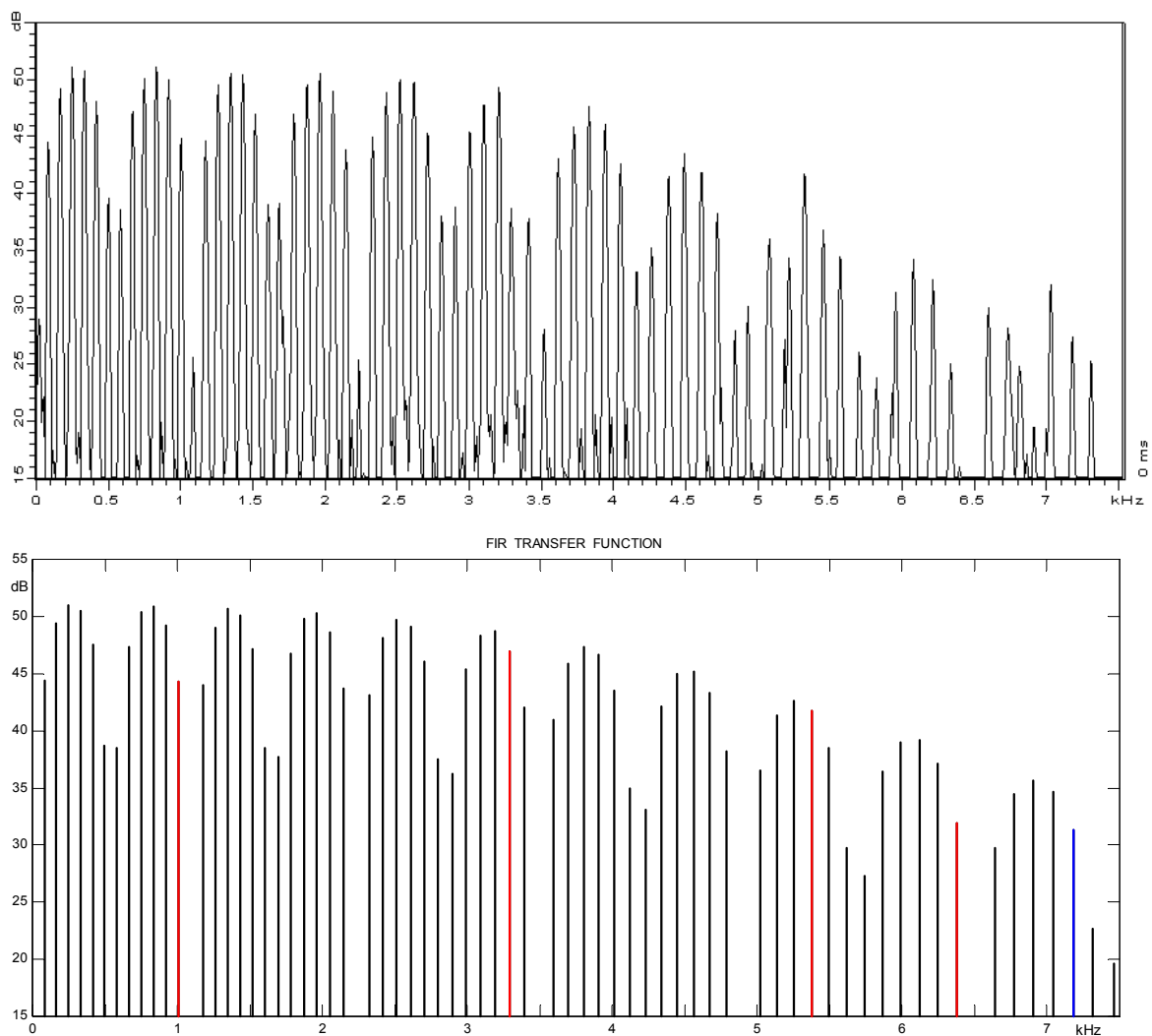
In **Abb. 2.33** sind für eine **Stratocaster** in Abhängigkeit von der Tonabnehmerposition die FIR-Filter-Frequenzgänge dargestellt. Die Wirkung des zweiten FIR-Filters (Anzupf-Ort) wurde hierbei nicht mitgerechnet. Um Übersichtlichkeit zu gewährleisten, sind die Minima nur 18 dB tief dargestellt; theoretisch geht die Kurve im Minimum gegen  $-\infty$  dB.



**Abb. 2.33:** Berechnete FIR-Frequenzgänge für die Stratocaster, ohne Dispersion. Dynamik auf 18 dB begrenzt. Im untersten Bild ist gepunktet die Wirkung dispersiver Ausbreitung eingezeichnet (vergl. Kap. 2.8.4).

**Abb. 2.34** zeigt einen Vergleich zwischen Messung und Rechnung. Eine Stratocaster wurde über ein 200-pF-Kabel an einem Messverstärker (100 k $\Omega$ ) betrieben. Die E<sub>2</sub>-Saite wurde direkt am Steg mit einem Plektrum angezupft, ausgewertet wurde das Signal des Steg-Pickups.

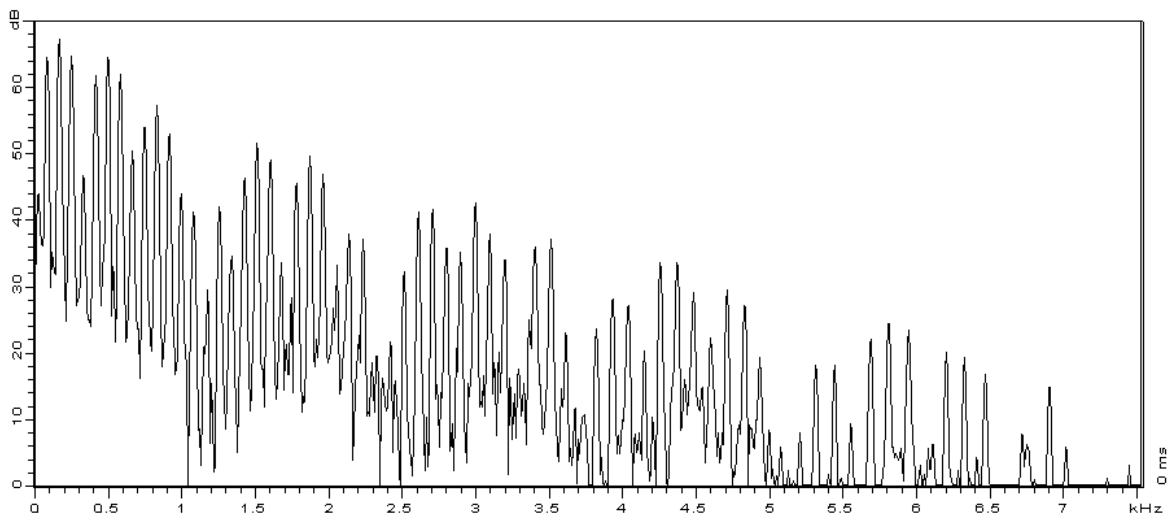
Die vergleichende Berechnung des Linienspektrums enthält beide FIR-Filter, das IIR-Filter, sowie das Tonabnehmer-Ersatzschaltbild (Kap. 5.9.3). Zusätzlich wurde eine leichte Höhenbedämpfung zur Nachbildung des Magnetfeldfensters (Kap. 5.4.4) eingefügt. Wie man sieht, ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Beim gemessenen Spektrum ist sehr schön die Spreizung der Teiltonfrequenzen zu sehen; sie wurde bei der Berechnung mit einem einfachen Modell nachgebildet. Die Kammfilterstruktur wird durch die Simulation gut wiedergegeben, bei hohen Frequenzen erkennt man aber Unterschiede zwischen Messung und Rechnung. Für eine Verbesserung müssten z.B. die Reflexionsfaktoren angepasst werden.



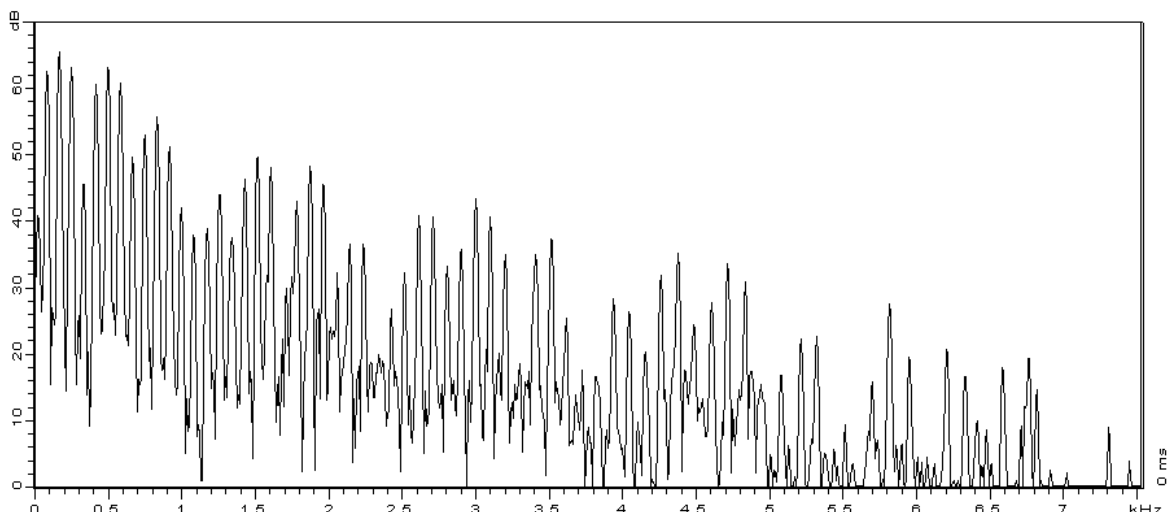
**Abb. 2.34:** Spektrum einer direkt am Steg angezupften E<sub>2</sub>-Saite (Stratocaster, mittlerer Tonabnehmer). Oberes Bild: Messung (mit DFT-Leakage), unteres Bild: Rechnung (mit Dispersion, vergl. Kap. 2.8.4). Die inharmonische Spreizung ist erheblich, die 70. "Harmonische" liegt statt bei 5,84 kHz bei 7,37 kHz.

In Abb. 2.30 wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Anzupfpunkt der Saite und der Ort des Tonabnehmers jeweils ein FIR-Filter (mit unterschiedlicher Laufzeit) ergibt. Zwei in Kette geschaltete Filter stellen zwei *kommutativ* verknüpfte Abbildungen dar, deren Reihenfolge vertauscht werden darf. Somit müsste es egal sein, ob die Saite am Punkt A angezupft wird, und der Tonabnehmer befindet sich am Punkt B, oder ob die Saite am Punkt B angezupft wird, und der Tonabnehmer befindet sich am Punkt A.

Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde die E<sub>2</sub>-Saite einer Stratocaster einmal über dem Hals-Tonabnehmer angezupft, und dabei das Signal des Steg-Tonabnehmers aufgezeichnet; anschließend wurde die E<sub>2</sub>-Saite über dem Steg-Tonabnehmer angezupft, und dabei das Signal des Hals-Tonabnehmers aufgezeichnet. **Abb. 2.35** zeigt die DFT-Spektren der beiden Signale. Die Übereinstimmung ist verblüffend, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Reproduzierbarkeit beim Anzupfen nicht besonders gut ist.



Gemessenes Signal des Steg-Tonabnehmers, Saite über dem Hals-Tonabnehmer angezupft.



Gemessenes Signal des Hals-Tonabnehmers, Saite über dem Steg-Tonabnehmer angezupft.

**Abb. 2.35:** Spektrum der E<sub>2</sub>-Saite einer Stratocaster, Tonabnehmer und Anzupf-Position vertauscht.