

2.9 Magnettonabnehmer mit Dehnwellen-Anregung

Induziert eine axiale Saitenverschiebung eine elektrische Spannung im Magnettonabnehmer? Der Abstand zwischen Saite und Tonabnehmer-Polstück bleibt hierbei ja konstant, sodass man keine Spannung erwarten würde – eine Hypothese, die von Messungen jedoch nicht bestätigt wird. Offensichtlich ist der Abstand zwischen Saite und Polstück nicht das einzige Kriterium für die Spannungs-Erzeugung: Wegen hysteresebedingter Speicherprozesse kann auch eine die Saite entlanglaufende Dehnwelle im Tonabnehmer Spannung induzieren. Die folgende Modellbetrachtung erläutert die grundsätzlichen Zusammenhänge:

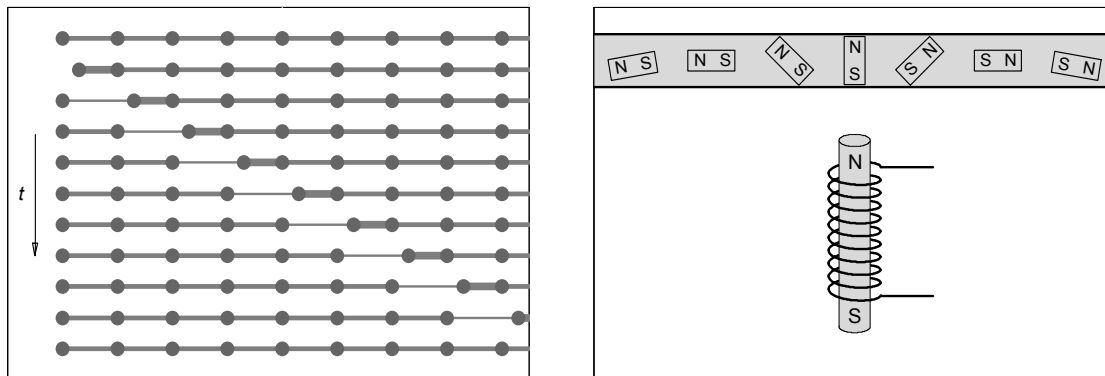


Abb. 2.44: Dehnwelle (links), Saite mit Elementarmagneten und Tonabnehmerspule (rechts). Beide Abbildungen zeigen stark vereinfachende, diskretisierende Modelle.

In **Abb. 2.44** ist im linken Bild eine Saite modellhaft zu 11 verschiedenen Zeiten dargestellt; die dicken Punkte sind Massen, dazwischen befinden sich Federn*. Links oben wird ein Kompressionsimpuls generiert, der sich mit fortschreitender Zeit dispersionsfrei entlang der Saite ausbreitet (Dehnwellen sind generell dispersionsfrei). Ein unter der Saite montierter Tonabnehmer-Magnet erzeugt in der Saite eine permanente Magnetisierung, im rechten Bild modellhaft anhand einiger Elementarmagnete dargestellt. Der die Saite entlang laufende Dehnwellen-Impuls verschiebt nun (nacheinander) jeden der Elementarmagnete, zuerst ein kleines Stück nach rechts, danach wieder an die ursprüngliche Position zurück. Diese Verschiebung verändert den die Spule axial durchdringenden Magnetfluss: Die vom Impuls hervorgerufene Lageänderung bewirkt bei den (im rechten Bild) links gezeichneten Elementarmagneten eine Vergrößerung, bei den rechts gezeichneten eine Verkleinerung des die Spule durchdringenden Flusses.

Die Effizienz der hiervon verursachten Spannungsinduktion hängt von vielen Faktoren ab: Vom Magnet, von der Windungszahl, vom Saitenmaterial. Von besonderer Bedeutung für die o.a. Modellbetrachtungen sind die folgenden beiden Parameter: Die Distanz zwischen Elementarmagnet und Spule, und der Winkel zwischen Elementarmagnet- und Spulenachse. Der die Saite von links nach rechts entlanglaufende Kompressionsimpuls erzeugt in der Spule zuerst eine Flussvergrößerung, und danach eine Flussverringerng, und diese Flussänderungen induzieren in der Spule eine elektrische Spannung (Induktionsgesetz: Die pro Windung induzierte Spannung entspricht der zeitlichen Ableitung des diese Windung durchdringenden Magnetflusses).

* Die gezeichnete Dickenänderung ist stark übertrieben.

In **Abb. 2.45** sind für einen halbwellenförmigen Auslenkungsimpuls die Zeitfunktionen der Flussänderung $\Delta\Phi$ und deren zeitliche Ableitung dargestellt. Die Kurven, erstellt aus einfachen Funktionen, sollen nur mit dem prinzipiellen Verlauf vertraut machen; eine exakte Berechnung wäre sehr aufwändig. Legt man für den örtlichen Abstand der Bereiche maximaler Empfindlichkeit ca. 1 – 2 cm zugrunde (übliche Tonabnehmerdimensionen), so erhält man hieraus mit einer Dehnwellengeschwindigkeit von ca. 5 km/s den zeitlichen Extremwert-Abstand zu $\Delta t = 2 - 4 \mu\text{s}$.

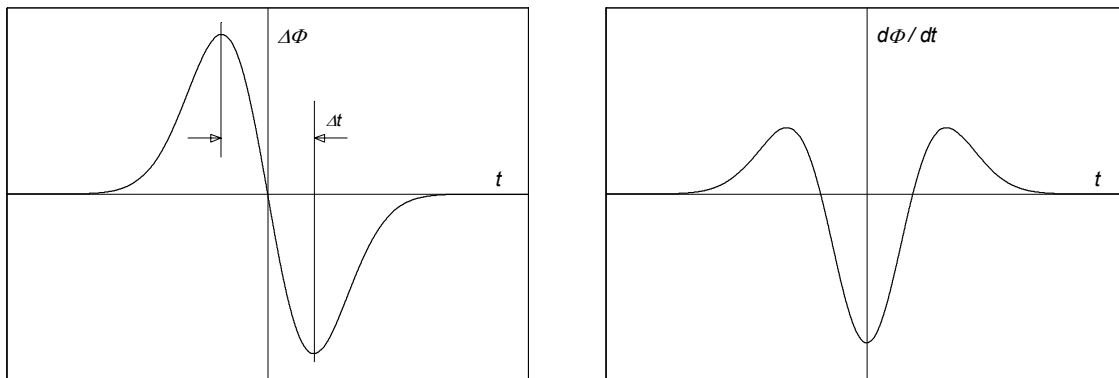


Abb. 2.45: Flussänderung (links) und zeitliches Differential, hervorgerufen von einem Kompressionsimpuls.

Das im rechten Bild von Abb. 2.45 dargestellte Signal kann als Impulsantwort $h_{U\xi}$ interpretiert werden. Der erste Index (U) weist darauf hin, dass als Ausgangsgröße die Tonabnehmer-Spannung U betrachtet wird, die durch Differentiation des Magnetflusses entsteht. Der zweite Index ξ weist auf das Quellsignal hin: Einen *Auslenkungsimpuls*. Von der Impulsantwort $h(t)$ eines LZI-Systems [6, 7] gelangt man mithilfe der Fourier-Transformation zur Übertragungsfunktion $\underline{H}(j\omega)$ dieses Systems*. Eingangs- und Ausgangssignale bleiben dabei erhalten, sie werden lediglich in unterschiedlichen "Domänen" dargestellt: Die Impulsantwort verbindet (über die Faltung) die Eingangs- mit der Ausgangs-Zeitfunktion, die Übertragungsfunktion verbindet (multiplikativ) das Eingangs- mit dem Ausgangs-Spektrum. Die Fouriertransformierte der Impulsantwort $h_{U\xi}$ ist folglich die Übertragungsfunktion $\underline{H}_{U\xi}$. Modellbetrachtungen zu Ersatzschaltungen haben nun aber gezeigt, dass nicht $\underline{H}_{U\xi}$, sondern \underline{H}_{Uv} die besser interpretierbare Übertragungsfunktion ist (Kap. 5.9.3). Hierbei kommt anstelle eines Auslenkungsimpulses ein *Schnelleimpuls* als Auslöser der Dehnwelle zur Anwendung (die hierzu gehörende Auslenkungsfunktion ist der Sprung). Anstelle in der Saite mit einem Auslenkungsimpuls eine Dehnwelle anzuregen, wird optional deren zeitliches Integral, der Auslenkungssprung (= Schnelleimpuls) eingepreßt. Dieser zusätzlichen Integration wird in Abb. 2.45 dadurch Rechnung getragen, dass die im rechten Bild dargestellte Induktionsspannung zu integrieren ist (Kommutativität bei LZI-Systemen). Da das rechte Bild durch Differentiation aus dem linken hervorgegangen ist, kann für den zeitlichen Verlauf von h_{Uv} das linke Bild verwendet werden – lediglich die Einheiten unterscheiden sich. Hieraus ergibt sich folgende Zusammenfassung:

Eine Auslenkungsimpuls-Dehnwelle induziert die in Abb. 2.45 rechts dargestellt Tonabnehmerspannung, eine Schnelleimpuls-Dehnwelle induziert die in Abb. 2.45 links dargestellte Tonabnehmerspannung.

* Die in Tonabnehmer und Kabel entstehende zusätzliche Tiefpassfilterung wird zunächst ignoriert.

Die Fouriertransformierte von h_{UV} (d.h. die Übertragungsfunktion $|H_{UV}|$) ist in **Abb. 2.46** dargestellt. In dem für Magnettonabnehmer wichtigen Frequenzbereich (< 10 kHz) ist ein frequenzproportionaler Anstieg erkennbar – entsprechend dem Betragsfrequenzgang eines Differenzierers. Hierbei wird ersichtlich, dass der exakte Verlauf von h_{UV} eher untergeordnete Bedeutung hat: Jede nullpunktsymmetrische (ungerade) Impulsantwort zeigt im tieffrequenten Bereich eine Differenzierer-Charakteristik. Durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit von Dehnwellen liegt das Maximum der Übertragungsfunktion so hochfrequent, dass seine genaue Lage nicht unbedingt ermittelt werden muss.

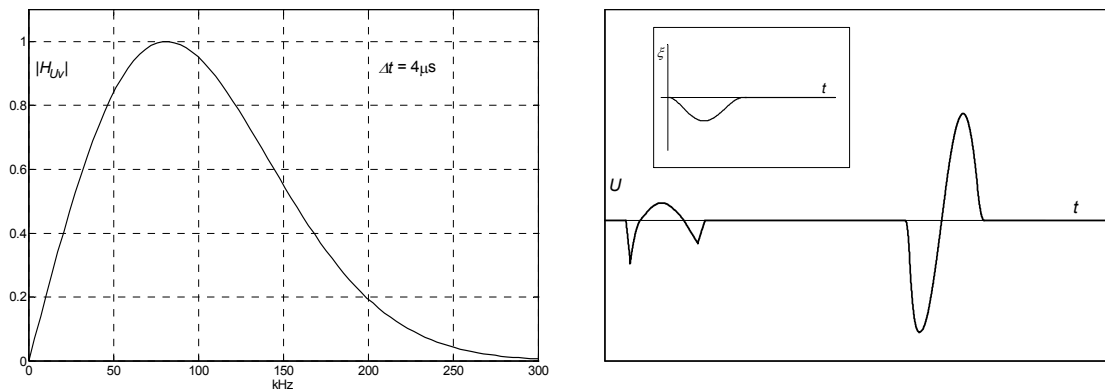


Abb. 2.46: Betrag der Schnelle \rightarrow Spannungs-Übertragungsfunktion, ohne LC-Tiefpass (linkes Bild). Nach Fallhammeranregung der Saite im Tonabnehmer induzierte Spannung, ohne Dispersion, ohne LC-TP (rechts).

Bei Anregung der Saite mit einem **Fallhammer** entstehen an der Tonabnehmer-Wicklung nacheinander zwei Impulse: Zuerst der von der Dehnwelle induzierte Impuls, danach der von der (langsameren) Biegewelle induzierte Impuls. Lässt man zunächst die (nur bei der Biegewelle auftretende) Dispersion außer Acht, würde man einen Spannungsverlauf ähnlich dem in Abb. 2.46 rechts gezeichneten erwarten. Ein ähnlich einer Sinus-Halbwelle geformter Auslenkungsimpuls (kleines Bild) läuft sowohl als (vereinfacht) dispersionsfreie, langsame Transversalwelle, als auch als schnelle Dehnwelle die Saite entlang. Die erste zeitliche Ableitung dieses Impulses entspricht der von der Transversalwelle im Tonabnehmer induzierten Spannung, die zweite zeitliche Ableitung entspricht der von der Dehnwelle induzierten Spannung. Nun führt aber die **dispersive Ausbreitung** der Biegewelle zu einer erheblichen Impulsverformung, deshalb wird der in Abb. 2.46 rechts dargestellte Spannungsverlauf in der Realität nicht zu messen sein. Stattdessen treten allpassbedingte Impulsverformungen auf (Kap. 1.3.2, Kap. 2.8.4). Um die Qualität der o.a. theoretischen Modellberechnungen mit Messungen vergleichen zu können, muss der (einer vollen Sinusschwingung ähnlich sehende) Transversalwellenimpuls noch durch ein **Allpassfilter** geschickt werden.

Die im Folgenden als Vergleich herangezogenen **Messungen** entstanden an einer 30m langen 0,7-mm-Saite, unter die ein Jazzmaster-Tonabnehmer montiert war. Bedingt durch seine sehr kleine Wicklungskapazität ermöglicht dieser Tonabnehmer bei geeigneter elektrischer Belastung eine breitbandige Signalübertragung bis ca. 20 kHz – in dieser Beschaltung für Elektrogitarren zwar untypisch, für Messungen aber sehr gut geeignet. Die Saite wurde 3 mm neben ihrer Einspannung mit einem kurzen Auslenkungsimpuls angeregt, worauf sich eine Dehn- und eine Biegewelle entlang der Saite ausbreiteten. 68 cm von der Einspannung entfernt wurde die Querschnelle sowohl mit dem Laser-Vibrometer als auch mit dem Jazzmaster-Tonabnehmer abgetastet und digital gespeichert.

In **Abb. 2.47** ist links die vom Laser-Vibrometer gemessene Querschnelle dargestellt. Der Dehnwellenimpuls erreicht ca. 0,13 ms nachdem der Fallhammer die Saite getroffen hat den Messpunkt – dieser Moment ist der Nullpunkt der Zeitskala. Das Laser-Vibrometer kann den Dehnwellenimpuls praktisch nicht erkennen, der Tonabnehmer zeigt hingegen einen Impuls, der einem zweimal differenzierter Sinus-Halbwellenimpuls (Abb. 2.46) ähnelt. Nach ca. 1 ms erreichen die hochfrequenten Anteile der Biegewelle den Messpunkt, nach ca. 6 ms die tief-frequenten (dispersive Ausbreitung); sie werden von beiden Sensoren in ähnlicher Weise empfangen.

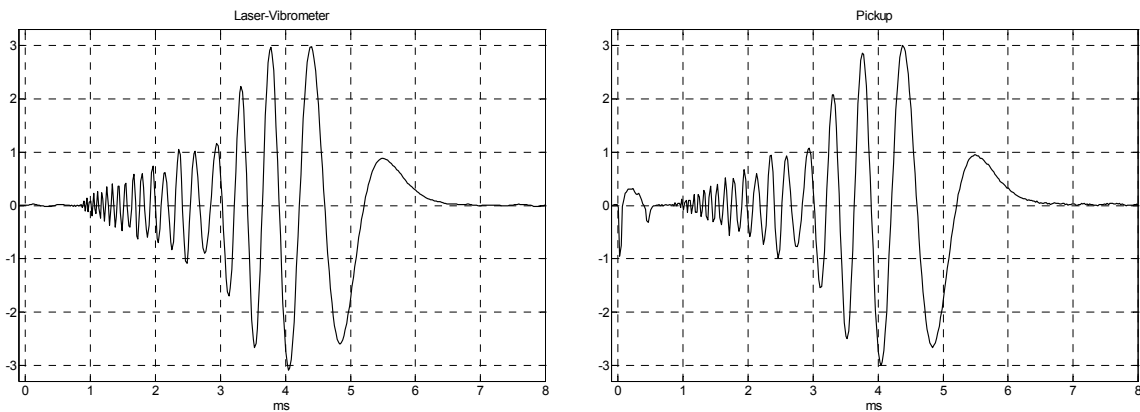


Abb. 2.47: Nach Impulsanregung der Saite gemessene Zeitfunktionen; Laser (links), Tonabnehmer (rechts).

Aus Sicht der **Systemtheorie** ist die gespannte Saite in guter Näherung ein LZI-System, das Eingangsgrößen auf Ausgangsgrößen abbildet. Eine Aufteilung nach den beiden Wellentypen ergibt zwei Teilsysteme: Eine dispersionsfreie Verzögerungsleitung (Dehnwelle), und eine dispersive Verzögerungsleitung (Biegewelle). **Entfaltet** man die am Tonabnehmer gemessene System-Ausgangsgröße mit der Impulsantwort, erhält man die System-Eingangsgröße. In **Abb. 2.48** ist das Ergebnis dieser Entfaltung dargestellt: Hierzu wurde der zwischen 1 – 7 ms liegende Zeitausschnitt der in Abb. 2.47 rechts dargestellten Tonabnehmerspannung mit der Allpass-Impulsantwort (Kap. 1.3.2) entfaltet und in Abb. 2.48 in die rechte Hälfte des linken Bildes eingezeichnet; zum Vergleich ist links daneben der originale Dehnwellenimpuls dargestellt. Das rechte Bild zeigt die jeweils zweifach integrierten Funktionen, die der Auslenkung entsprechen. Die im Bild gegenübergestellten Kurven sind zwar nicht identisch, aber doch sehr ähnlich, was angesichts der doch völlig andersartigen Ausgangsfunktion nicht zwingend erwartet werden konnte.

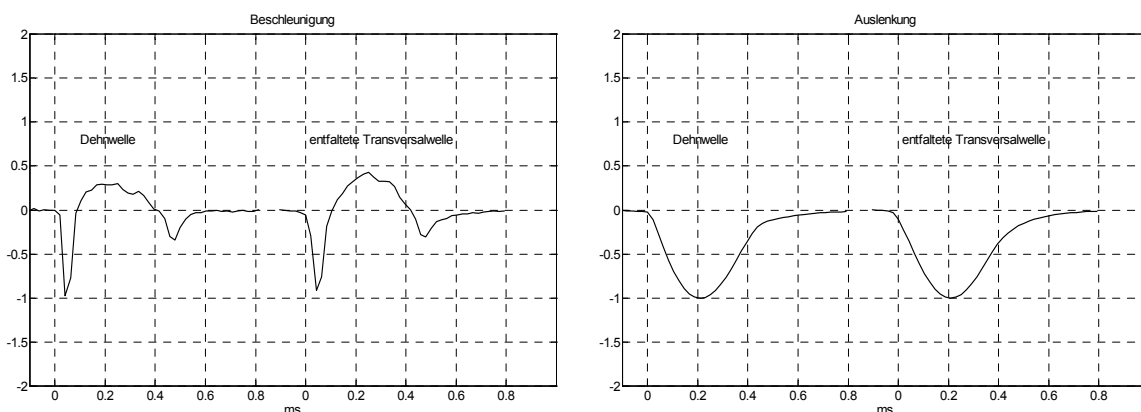


Abb. 2.48: Vergleich zwischen gemessenem Dehnwellenimpuls, und entfaltetem Biegewellenimpuls.

Die große Ähnlichkeit der in Abb. 2.48 dargestellten Kurvenverläufe führt zu dem Schluss: **Dehnwelle und Biegewelle haben im Moment ihrer Entstehung näherungsweise dieselben Zeitfunktionen.** Diese Hypothese lässt sich durch die Abbildung des Dehnwellenimpulses auf den Biegewellenimpuls erhärten: Hierzu wird der in Abb. 2.47 im rechten Bild im Bereich 0 – 1 ms dargestellte Impuls integriert und mit der Allpass-Impulsantwort gefaltet; es entsteht das in **Abb. 2.49** rechts dargestellte Signal, das in guter Näherung dem Biegewellensignal (Abb. 2.47 rechtes Bild, in Abb. 2.49 links wiederholt) entspricht. Ein Beispiel, bei dem Messung und Rechnung noch besser übereinstimmen, zeigt **Abb. 2.50**.

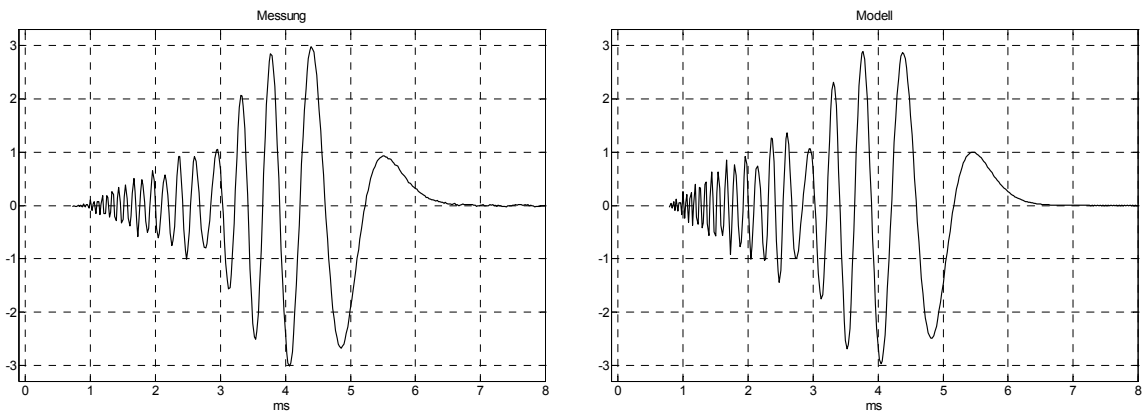


Abb. 2.49: Tonabnehmerspannungen: Biegewelle (links), aus der Dehnwelle abgeleiteter Impuls (rechts).

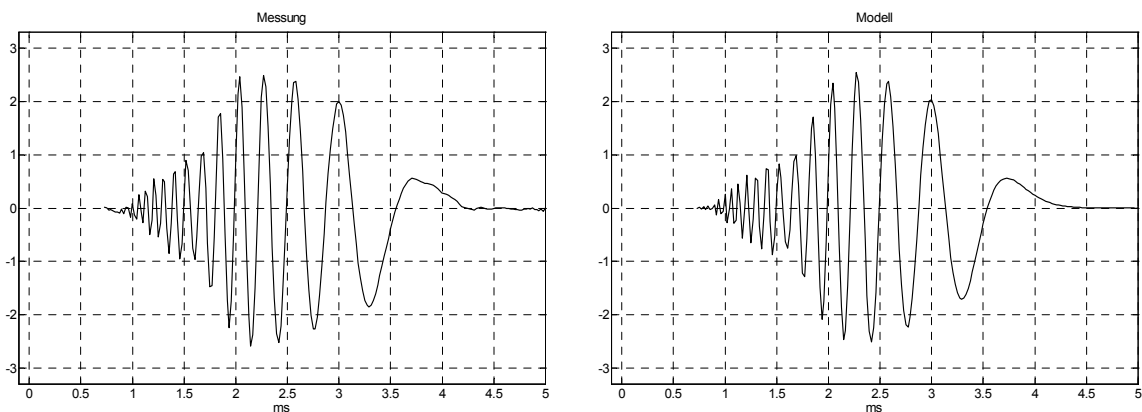


Abb. 2.50: Wie Abb. 2.49, aber an anderer Tonabnehmerposition ermittelt (55 cm anstelle von 68 cm).

In den o.a. Abbildungen ist die Ordinate nicht absolut skaliert – hierzu wäre jeweils ein individueller Tonabnehmer-Übertragungskoeffizient nötig. Um eine Vorstellung von den Wellenparametern zu bekommen, listet die nachfolgende Tabelle typische (gerundete!) Werte auf. Die Relation der Wellen-Energien hängt von der jeweiligen Lagerung ab.

	Biegewelle	Dehnwelle
Auslenkungsmaximum	30 μm	5,7 μm
Schnellemaximum	0,4 m/s	0,07 m/s
Kraftmaximum	0,2 N	1,2 N
Wellenwiderstand	0,5 Ns/m	17 Ns/m
Leistungsmaximum	88 mW	88 mW
Impuls-Energie	8,0 μWs	8,5 μWs