

## Anhang B. Beispielversuch

### B.1. Die Untersuchung einer elektrischen Baß-Gitarre

Wenn man ein Instrument untersuchen soll, wird man wohl erst einmal die verschiedenen Klänge, die man produzieren kann, aufzeichnen und danach auswerten.

#### Allgemeines Vorgehen

Die Saiten werden einzeln angeschlagen. Während der Ton klingt, wird die Messung durchgeführt. Meßzeit: 500 ms, Samplefrequenz: 60 kHz.

Bei der E-Saite ist eine sehr niedrige Grundfrequenz zu erwarten. Die Messung und Analyse ergab dann folgendes Bild, bzw. einen ähnlichen Ausdruck<sup>33</sup>:

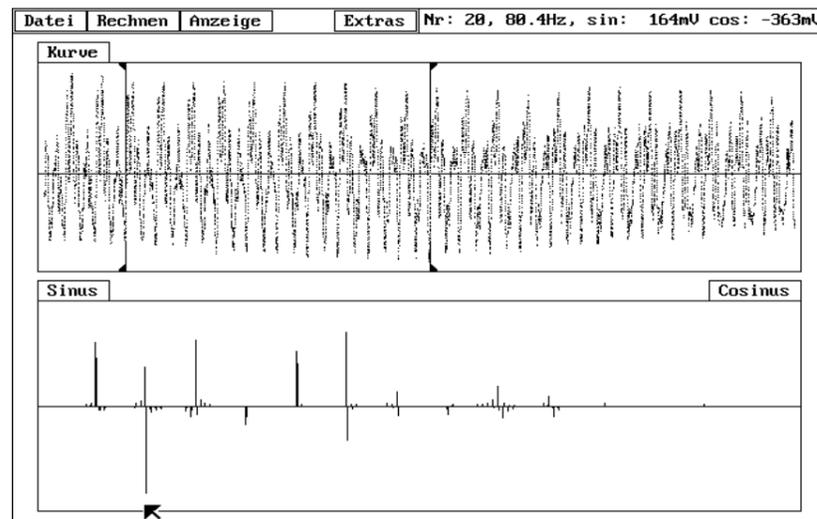


Tabelle der Koeffizienten

Nr:	Ampl.,	Phase	-Cosinus,	Sinus		Nr:	Ampl.,	Phase	-Cosinus,	Sinus
0:	0,	-°	0,	0		20:	398,	65°	164,	-363
1:	0,	-°	0,	0		21:	27,	107°	-8,	-26
2:	0,	-°	0,	0		22:	15,	114°	-6,	-13
3:	0,	-°	0,	0		23:	10,	128°	-6,	-8
4:	0,	-°	0,	0		24:	0,	-°	0,	0
5:	0,	-°	0,	0		25:	0,	-°	0,	0
6:	0,	-°	0,	0		26:	0,	-°	0,	0
7:	0,	-°	0,	0		27:	0,	-°	0,	0
8:	11,	279°	-2,	11		28:	22,	163°	-21,	-6
9:	17,	288°	-5,	16		29:	47,	163°	-45,	-13
10:	340,	322°	-271,	206		30:	282,	6°	281,	-31
11:	18,	134°	-12,	-13		31:	28,	357°	-28,	1
12:	16,	166°	-16,	-4		32:	16,	355°	-16,	1
13:	0,	-°	0,	0		33:	11,	355°	-11,	1
14:	0,	-°	0,	0		34:	0,	-°	0,	0
15:	0,	-°	0,	0		35:	0,	-°	0,	0
16:	0,	-°	0,	0		36:	0,	-°	0,	0
17:	0,	-°	0,	0		37:	0,	-°	0,	0
18:	15,	259°	-3,	15		38:	0,	-°	0,	0
19:	26,	269°	-0,	26		39:	0,	-°	0,	0

Abb.1

<sup>33</sup>Die Ausdrücke des Programms wurden nicht verwendet, da diese immer eine neue Seite beginnen, die Zahlenwerte der Koeffizienten beinhalten und sich schlecht mit einem Textverarbeitungsprogramm kommentieren lassen. Stattdessen wählte ich den Umweg über Bildschirmskopien. Diese wurden unter Windows erstellt und konnten nach Umwandlung in Schwarz-weiß-Bitmapgrafiken in Winword eingebunden werden. Ein zusätzlicher Vorteil ist, daß die Bilder skaliert und aneinandergesetzt werden können. Dies wurde weiter unten genutzt, um drei Graphen pro Abbildung zeigen zu können

Das gezeigte Spektrum ist die Intensität über die Frequenz aufgetragen. Jede im Signal vorkommende Schwingung taucht im Spektrum als Strich auf. Dessen Länge repräsentiert die Amplitude, mit der diese Schwingung beteiligt ist, bzw. der Ort die Frequenz. Links beginnt das Spektrum mit dem konstanten Glied der Fourierreihe, gefolgt von der Grundschwingung und den Oberschwingungen. Der erste große Pike in dem Spektrum liegt auf der 10. Harmonischen (9. Oberwelle), wie man auch anhand der Tabelle überprüfen kann.

In der Statuszeile (in der rechten oberen Ecke) kann man erkennen, daß das zweite Maximum bei der 20. Harmonischen liegt. Der Mauszeiger (Pfeil) deutet in die entsprechende Spalte, daher wird der zugehörige Wert in der Statuszeile rechts oben eingeblendet. Man erkennt, daß alle Maxima als Vielfache von Zehn auftreten. Der Grund ist, daß im Meßfenster 10 Perioden markiert sind. Die benachbarten Werte resultieren aus Rechen- bzw. Meßungenauigkeiten.

Mit dem Befehl Rechnen/Oberwellen wird auf "10 markierte Perioden" umgeschaltet. Das gibt folgendes Bild: (die Koeffiziententabelle der Ausdrücke entfällt ab jetzt, da nur qualitative Untersuchungen gemacht werden sollen)

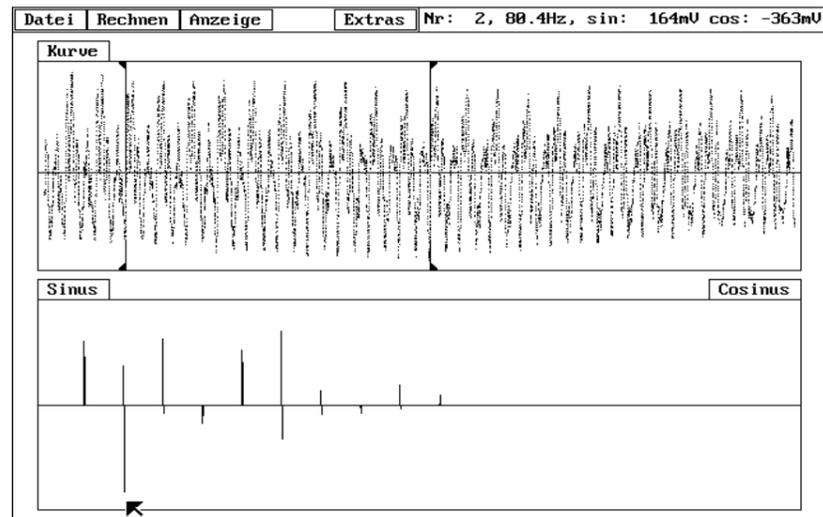


Abb.2

Der Mauszeiger deutet jetzt auf die 2. Harmonische! Sie hat dieselbe Frequenz wie oben die 20.; das Programm gibt also das Spektrum so aus, als ob nur eine Periode markiert wäre.

Da in der Akustik die Phasenbeziehungen irrelevant sind, reicht die Anzeige eines Amplitudenspektrums, das nicht mehr zwischen Sinus- und Cosinuskoeffizienten unterscheidet:

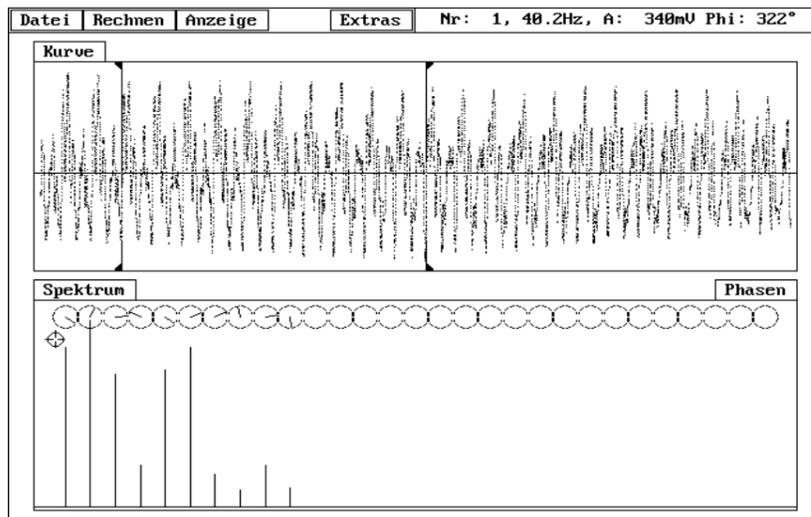


Abb.3

Dies ist das Amplituden- bzw. Intensitätsspektrum der E-Saite einer (preiswerten) elektrischen Baßgitarre. Man erkennt deutlich, daß die Grundschwingung in der Amplitude von der ersten Oberwelle übertroffen wird. Das kann genauso an der Übertragung des Signals wie an der Saitenschwingung liegen. So hat der Mikrophonverstärker im Bereich tiefer Frequenzen eine niedrigere Verstärkung. Der Frequenzgang der Tonabnehmer hat eine ähnliche Charakteristik.

## B.2. Untersuchungen an einer Saite

Die G-Saite wurde zweimal gemessen, um die Qualität der Messung beurteilen zu können:

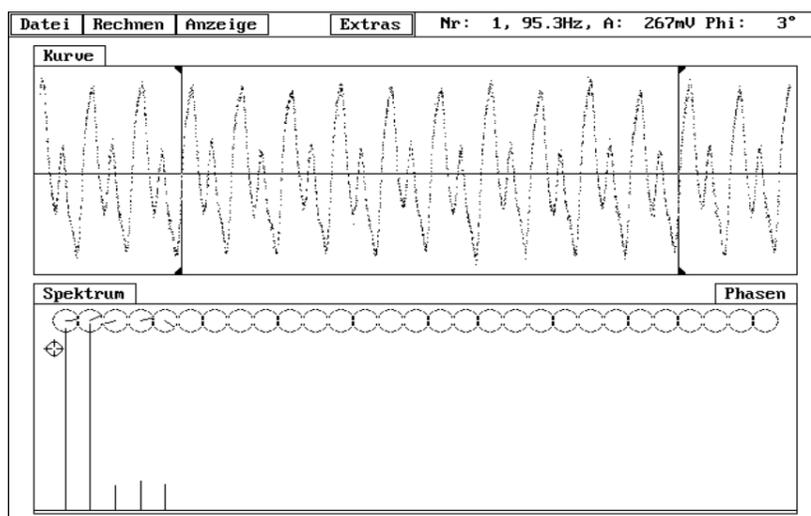


Abb.3

Hier sind die Grundschwingung und die erste Oberwelle ungefähr gleich stark vertreten.

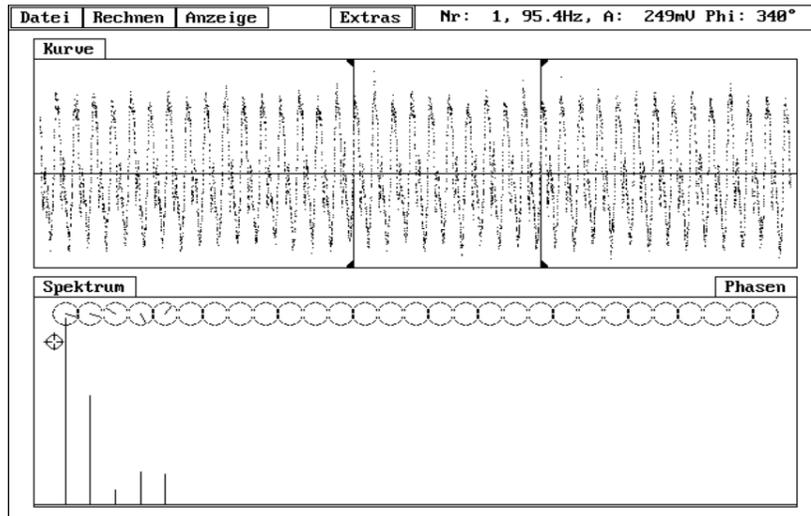


Abb.4

Eine zweite Messung mit derselben Saite ergibt ein ganz anderes Bild. Offensichtlich unterscheiden sich die Schwingungszustände einer Saite, wenn man sie zweimal anschlägt. Die Abhängigkeiten sollen nun untersucht werden.

Es bestehen verschiedene Anschlagmöglichkeiten, sowohl, was die Anschlagstelle betrifft, als auch, was das Anschlaginstrument betrifft.

Im Folgenden werden erst einmal die einzelnen Messungen mit Spektrum vorgeführt: Im Praktikum wird man auf einen Teil der Ausdrücke verzichten können und nur die Spektren am Bildschirm vergleichen.

#### Anschlag mit dem Finger in der Mitte der Saite

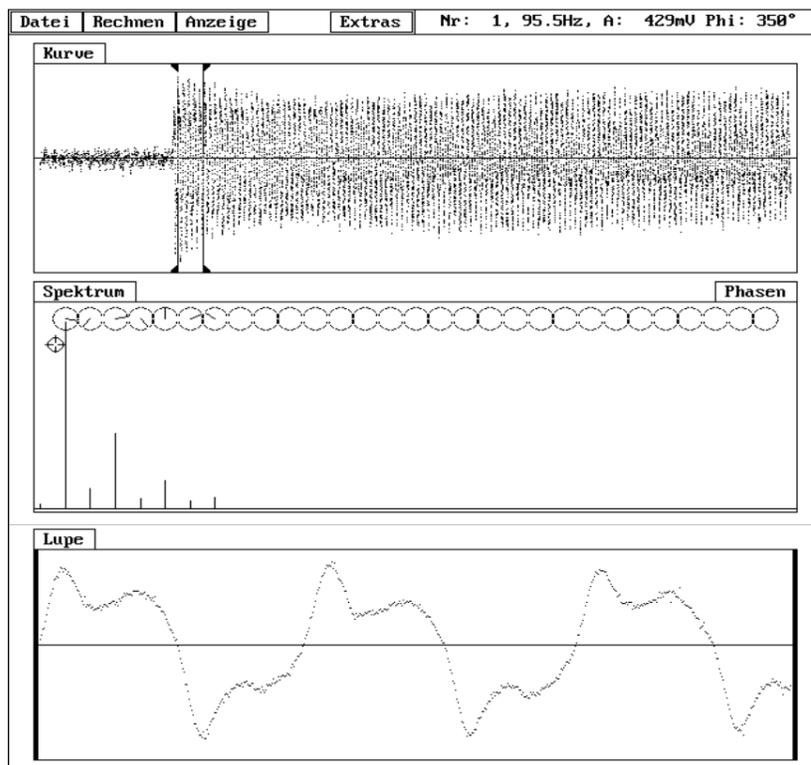


Abb.5

Analyse kurz nach dem Anschlagen

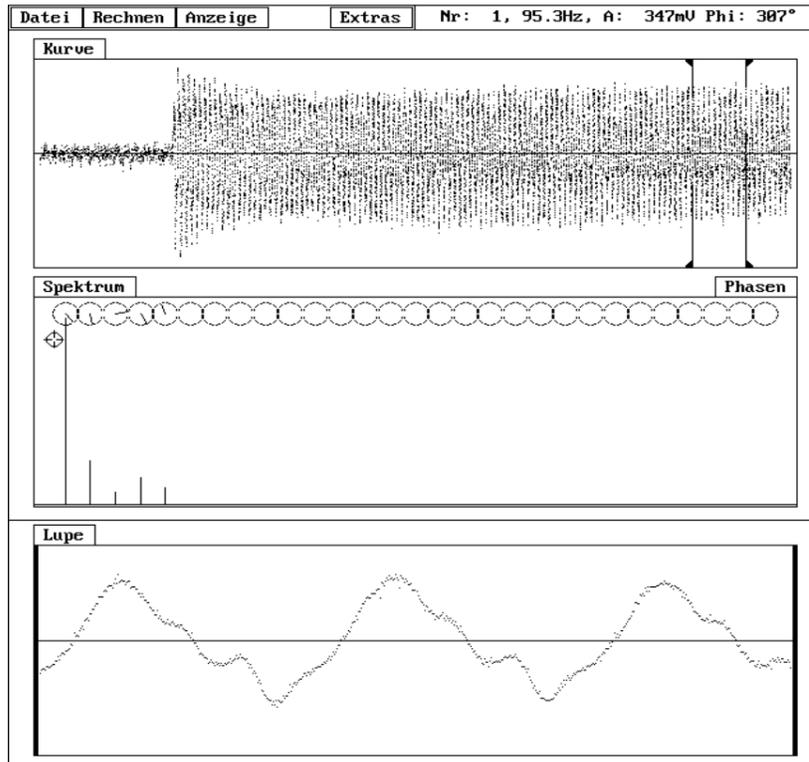


Abb.6

Eine Sekunde nach dem Anschlagen

### Anschlagen mit dem Finger am Ende der Saite

Mit dem Finger angeschlagen, diesmal aber beim unteren Abnehmer, also nahe dem Ende der Saite:

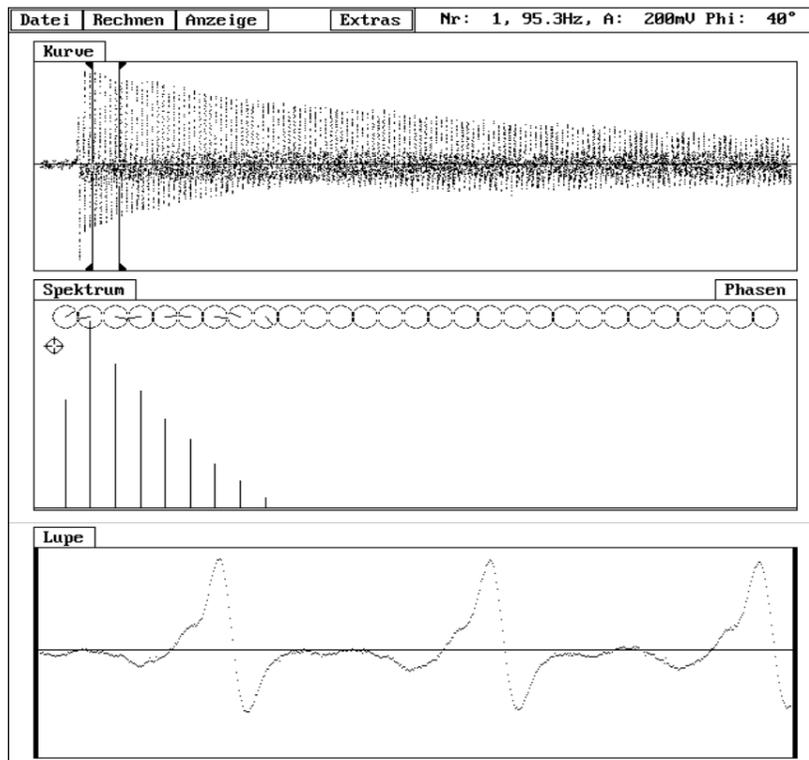


Abb.7

Analyse kurz nach dem Anschlagen

Dieselbe Messung nach einer Sekunde analysiert:

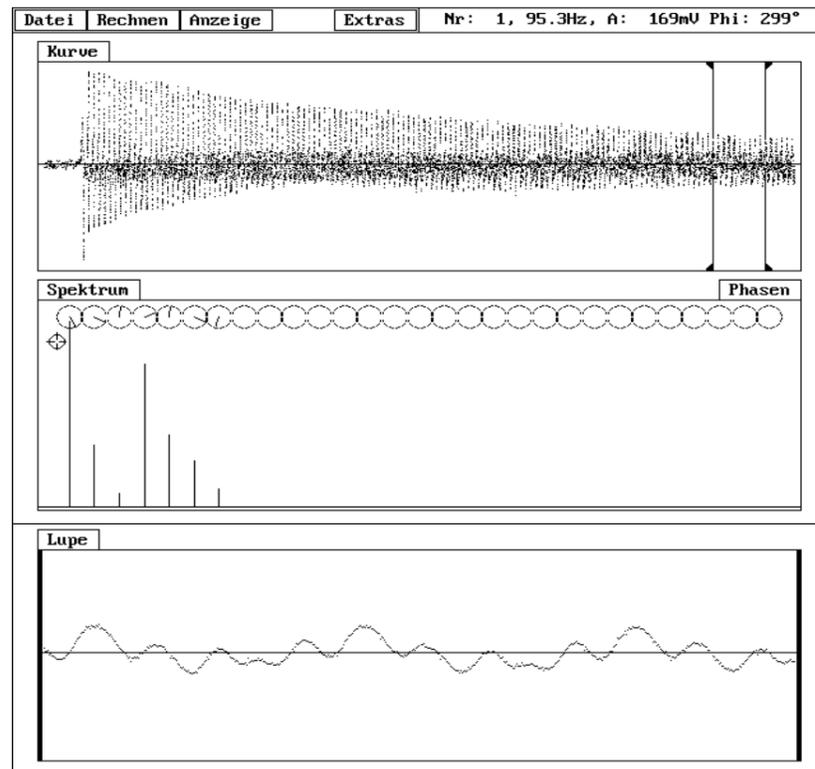


Abb.8

Anreißen der Mitte der Saite mit dem Fingernagel

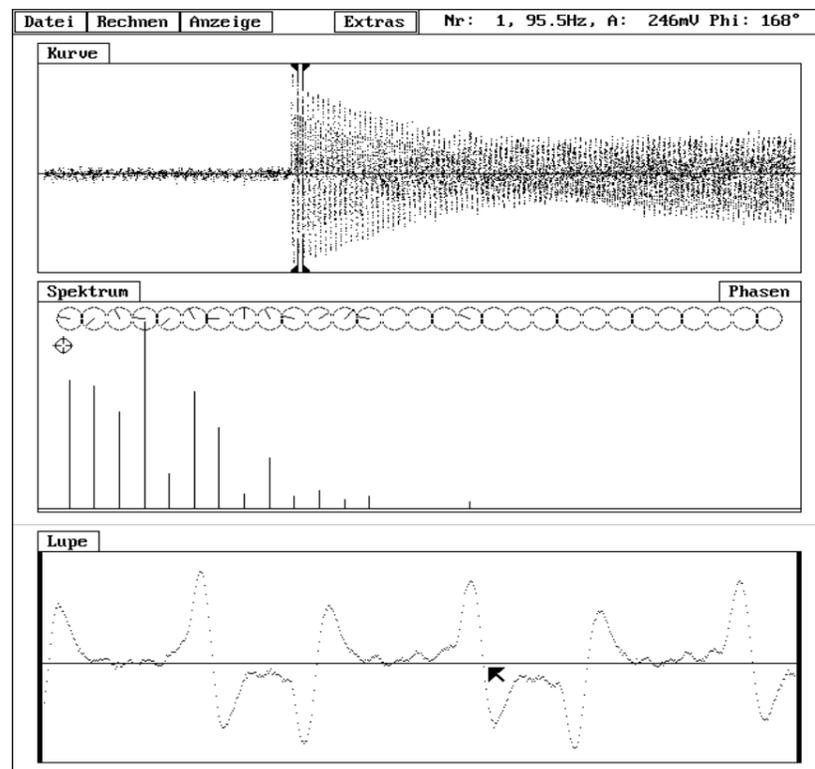


Abb.9

Die zweite echte Periode wurde analysiert. In der Vergrößerung ist der Mauszeiger (Pfeil) auf das Periodenende gesetzt.

Nun soll 500 ms später analysiert werden:

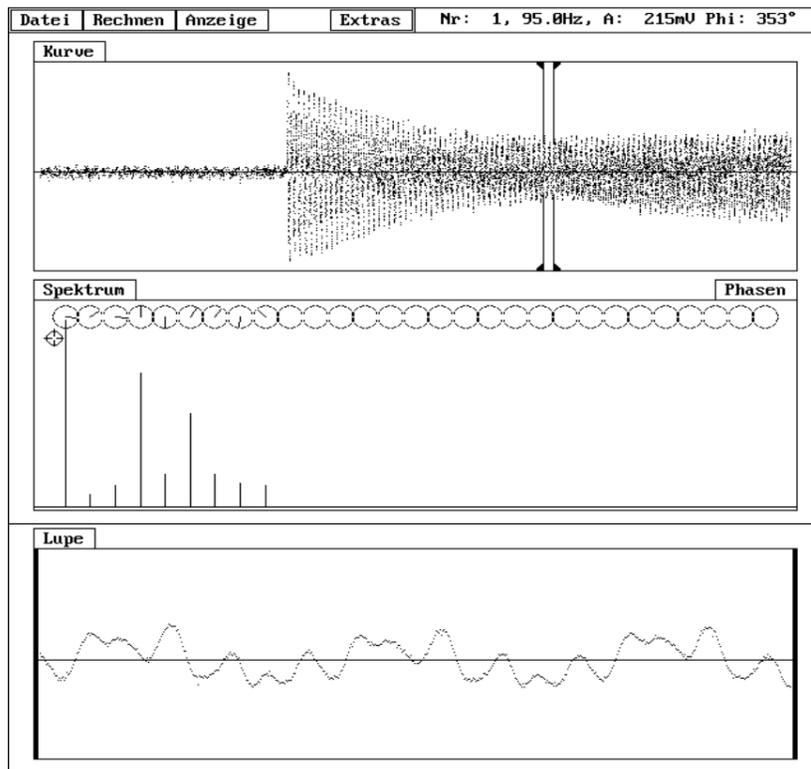


Abb.10

Eine Sekunde nach dem Anreißen:

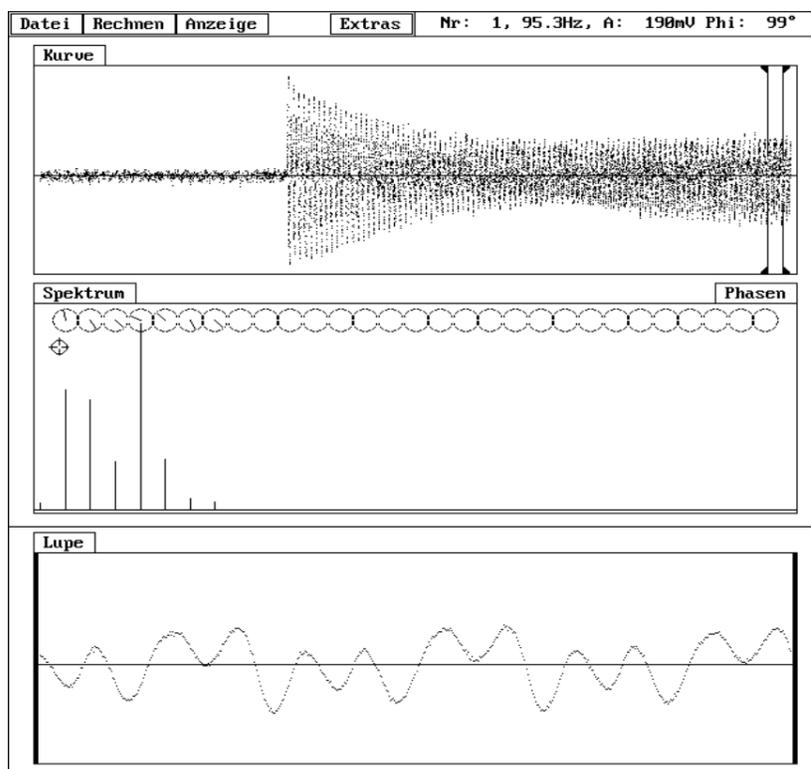


Abb.11

Mit dem Fingernagel bei dem unteren Abnehmer angerissene Saite:

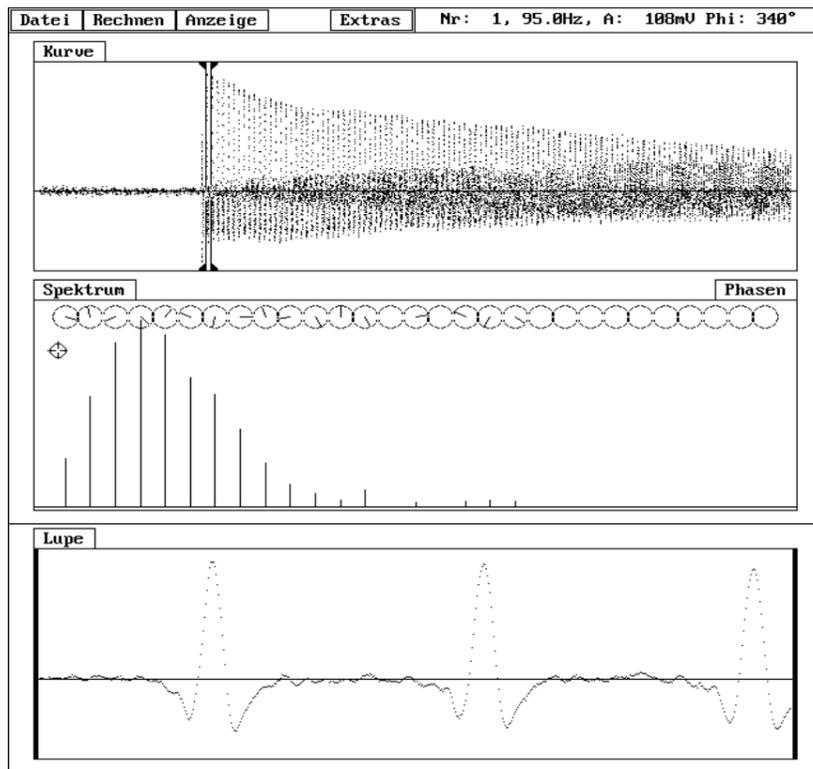


Abb.12

Nach 500 ms:

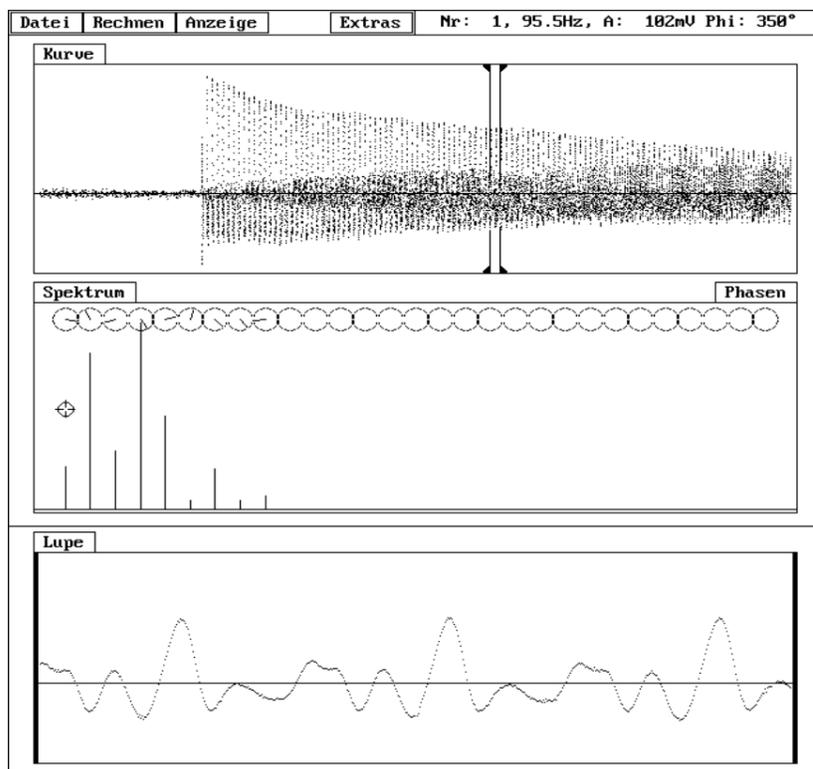


Abb.13

Und 1 Sekunde nach dem Anschlag:

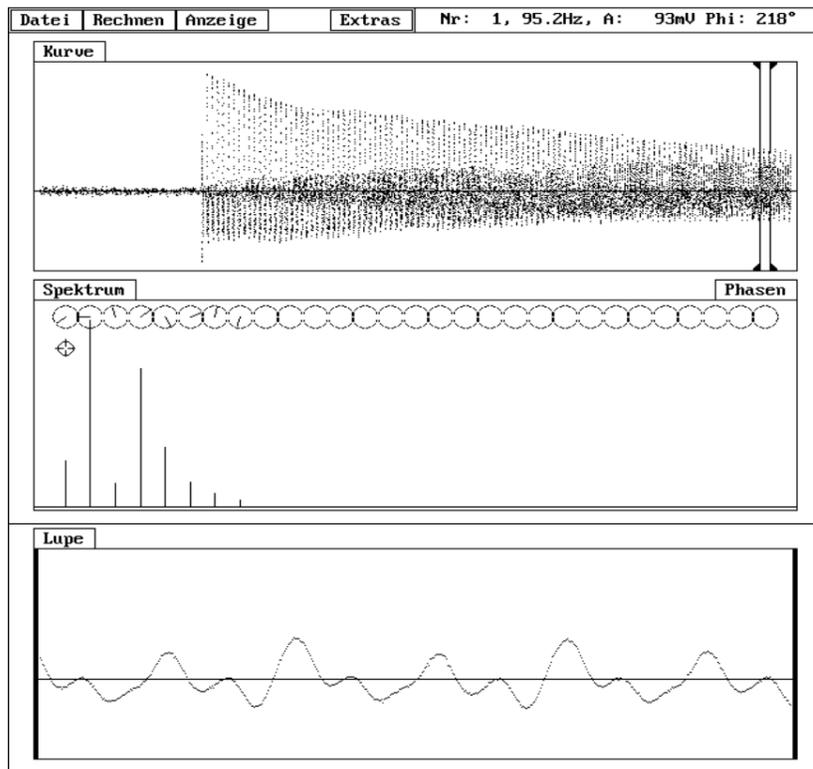


Abb.14

**Anreißen einer Saite am Ende**

Nun eine Saite, die, ca. 1 cm von ihrer Befestigung entfernt, angerissen wurde. Zuerst die Analyse des ersten Impulses (mit dem Pfeil markiert):

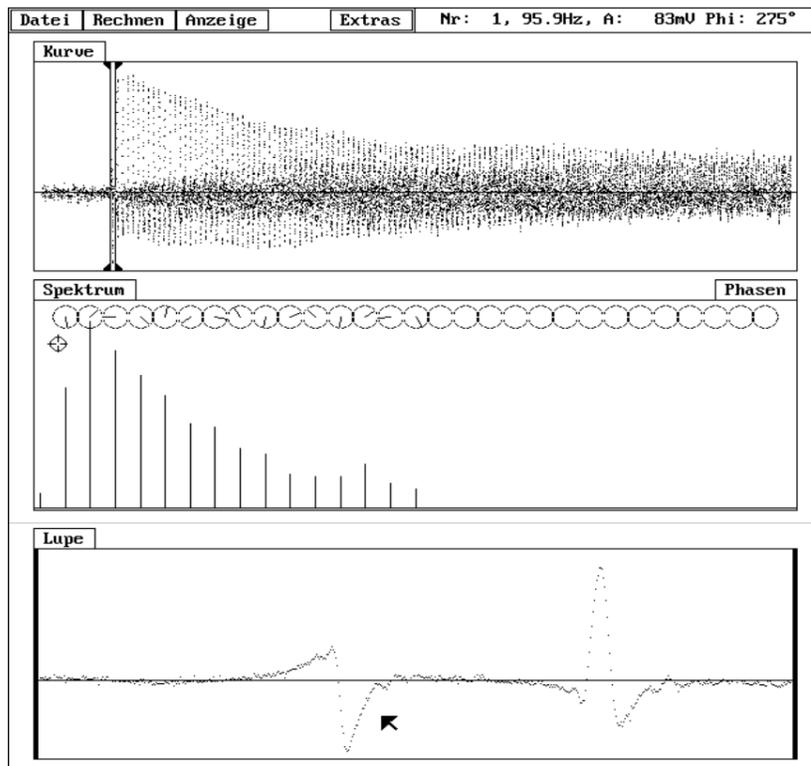


Abb.15

Und nun der nächste Impuls, der dann periodisch auftritt:

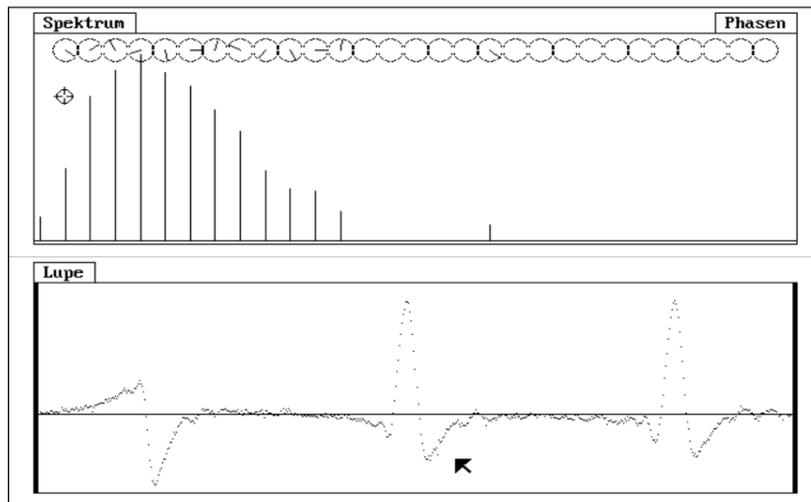


Abb.16

Nach 500 ms:

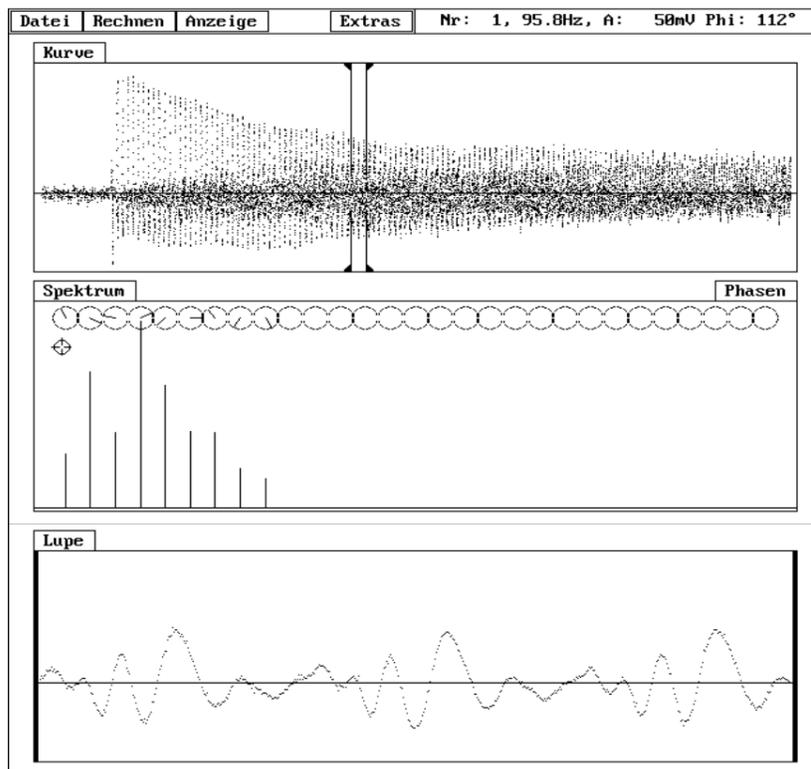


Abb.17

Nach einer Sekunde:

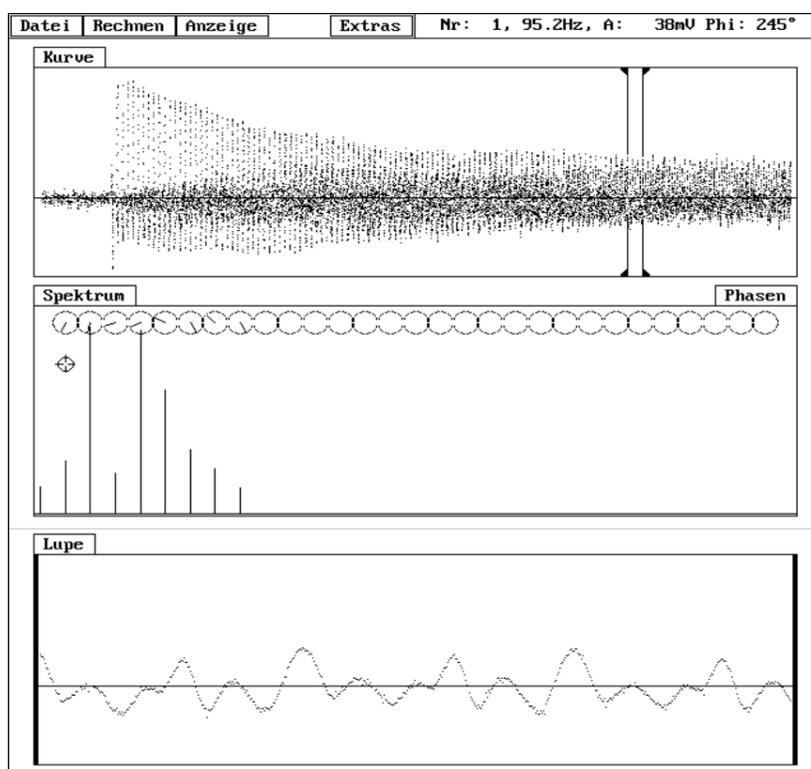


Abb.18

### B.3. Auswertung der Messungen

Wir haben drei Kriterien zu unterscheiden:

- 1) - Wo wurde die Saite angeschlagen,
- 2) - womit wurde sie angeschlagen und
- 3) - wie lange liegt der Zeitpunkt des Anschlags zurück.

#### Abhängigkeit vom Ort der Anregung auf der Saite

Vergleicht man Abb. 5 und 7, so erkennt man, daß eine Anregung in der Mitte bevorzugt ungeradzahlige Oberwellen erzeugt. Diese Oberwellen erzeugen bei der Schwingung alle einen Bauch in der Mitte der Saite, also an der Stelle der Anregung.

Dafür erzeugt eine Anregung am Ende eine etwas höhere Zahl von Oberwellen, da nicht ein Großteil der Anregungsenergie in die Grundschiwingung gesetzt wird. Vermutlich schlägt man die Saite aber etwas kräftiger an, was den Effekt in diesem Fall ausmachen dürfte.

#### Abhängigkeit vom Anschlaginstrument

Leider stand mir kein Bogen zum Streichen der Saite zur Verfügung. So blieben die Möglichkeiten des weichen Anspielens mit dem Finger und des härteren Anschlages mit dem Fingernagel.

Der Finger spannt die Saite und läßt sie dann los; die Schwingungen entstehen aus der Auslenkung. Dagegen wird mit dem Fingernagel die Saite spontaner erregt. Man kann die Anregung mit einem Knall vergleichen; also einem kurzen Impuls, der, in der Fourierzerlegung, aus einer sehr großen Zahl von Frequenzen besteht. Die Frequenzen darunter, die Resonanzfrequenzen von der Saite sind, regen diese zum Schwingen an. Daher ist die Zahl der Oberwellen bei dieser Anregung im Vergleich zum Anschlagen mit dem Finger recht hoch (siehe Abb.5 und 9).

Besonders auffällig ist dieser Effekt beim Anschlagen am Ende der Saite, da mit dem Fingernagel die Saite kaum noch ausgelenkt wird und bei dieser Anregung (s.o.) Oberwellen sowieso bevorzugt werden. (vergleiche dazu Abb. 7, 12 und 16. Die Anregung selber ist in 15 zu sehen)

#### Zeitliche Änderung des Spektrums

Allen Serien ist gemeinsam, daß die Oberwellen recht schnell abklingen. Es ist bekannt, daß die Saite eines Klaviers und die einer Gitarre nach einiger Zeit gleich klingen. Dies ist auf diesen Effekt zurückzuführen.

Bei den Anregungen am Ende der Saite hält besonders die stark angeregte 4. Harmonische länger ihre Amplitude, während die Grundschiwingung absinkt. Diese Charakteristik ist aber dem Instrument zuzuschreiben, da alle Saiten recht dick sind, und so in der Luft stark gedämpft werden. Davon ist die Grundschiwingung mit ihrer großen mechanischen Amplitude besonders betroffen. Genaugenommen leiten die magnetischen Tonabnehmer nur die Ableitung der mechanischen Schwingung als elektrische Schwingung an den Computer weiter, so daß die hohe mechanische Amplitude der Grundschiwingung in diesen Messungen verborgen bleibt.

### B.4.Überprüfung der Qualität des Mikrophons und des Verstärkers

Bekanntlich erzeugt eine Stimmgabel einen Sinuston. Dieser sollte, mit dem Mikrophon aufgenommen, als einzelne Sinusschwingung im Spektrum erscheinen.

Die Übertragung der Information kann aber nichtlinear verlaufen. Das Mikrophon muß eine zum Schalldruck proportionale Spannung liefern. Der Verstärker soll diese linear verstärken, was relativ aufwendig ist. Auch der AD-Wandler könnte ein nichtlineare Charakteristik aufweisen, also bei doppelter Spannung nicht die doppelt so große Zahl liefern<sup>34</sup>. Fehler würden sich im Auftreten von Oberwellen niederschlagen.

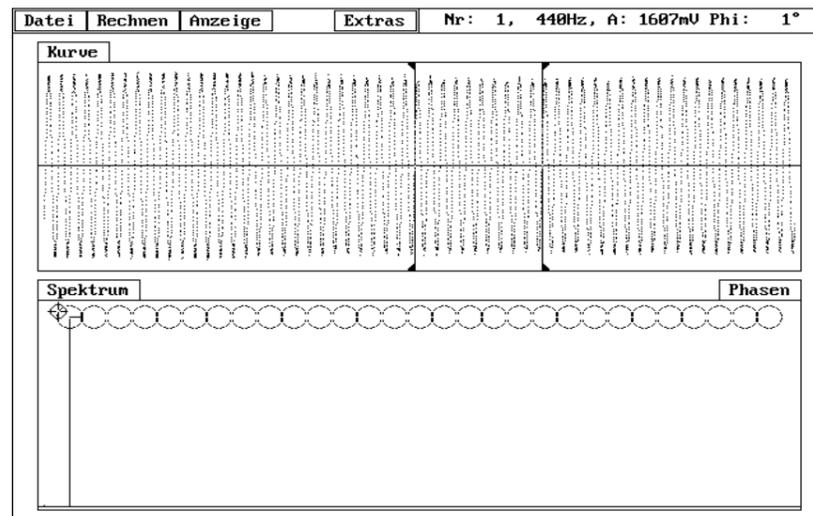


Abb.19

Offensichtlich wird das akustische Signal sehr gut wiedergegeben, da keine meßbaren Oberwellen auftreten.

<sup>34</sup>Dies ist bei der hohen Qualität der verwendeten Meßkarte aber fast ausgeschlossen.