

# Psychoakustische Untersuchungen zu Inharmonizitäten von Gitarrensaiten

Florian Völk, Hugo Fastl, Markus Fruhmann, Stefan Kerber

AG Technische Akustik, MMK, TU München, Arcisstr. 21, 80333 München, Deutschland, Email: vol@mmk.ei.tum.de

## Einleitung

Gitarrensaiten können als Biegeschwinger betrachtet werden; daher tritt, abhängig von ihrer Stärke, eine unterschiedlich große Teiltoninharmonizität auf (vgl. Zollner [1]). Vor diesem Hintergrund wird die "richtige" Stimmung von Elektrogitarren kontrovers diskutiert. Einerseits versucht man, die Teiltoninharmonizität durch Umwickeln der Saiten zu verringern, andererseits wird die Teiltoninharmonizität als "klangbildend" und "unbedingt notwendig" bezeichnet.

In diesem Beitrag wird dargestellt, welche Unterschiede zwischen rein harmonischen und leicht inharmonischen Gitarrenklängen wahrnehmbar sind, und ob Präferenzen auftreten.

## Spektren von Gitarrensaiten

Die Spektralanteile  $f_n$  einer als ideal (masselos) betrachteten Saite liegen nach Terhardt [3] bei ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz  $f_g$ :

$$f_n = n \cdot f_g \quad \text{mit} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Die Grundfrequenz einer real schwingenden Saite ist unter anderem abhängig von deren Masse. Um die sechs Saiten einer Gitarre auf verschiedene Tonhöhen stimmen zu können, wählt man Saiten unterschiedlicher Masse. Bei massiven Saiten erhöht sich mit dem Durchmesser auch die Biegesteifigkeit. Diese wiederum ist die Ursache dafür, dass die Spektralanteile von realen (massebehafteten) Saiten nicht mehr bei Vielfachen der Grundfrequenz liegen, sondern nach Fletcher und Rossing [2] abhängig von der Stärke unterschiedlich stark verschoben sind:

$$f_n = n \cdot f_g \sqrt{1 + b \cdot n^2} \quad \text{mit} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

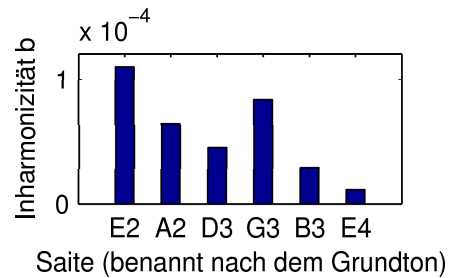
Dabei ist  $b$  die von der Biegesteifigkeit abhängige Inharmonizität einer Saite. Um die Masse der tieferen Saiten ohne wesentliche Zunahme der Inharmonizität erhöhen zu können, verwendet man meist umwickelte Saiten. Diese bestehen aus einem massiven Kern, der wie Abbildung 1 zeigt, schraubenförmig mit einem dünneren Draht umspinnen wird. Somit bestimmt vornehmlich die Inhar-



**Abbildung 1:** Schnitt durch eine umwickelte Gitarrensaitenstruktur. Der massive Kern ist schraubenförmig mit einem dünneren Draht umspinnen.

monizität des Kerns die Verteilung der Spektralkomponenten. In der Regel spielt man auf einer Gitarre einen Saitensatz aus drei tieffrequenten, umwickelten und drei höherfrequenten, massiven Saiten. Der Durchmesser der

massiven wird, wie der Kerndurchmesser der umwickelten Saiten, mit steigender Frequenz kleiner. Abbildung 2 zeigt die Inharmonizitäten der sechs Saiten eines Standardsaitensatzes.



**Abbildung 2:** Inharmonizitäten der einzelnen Saiten eines gängigen Saitensatzes für E-Gitarren (nach Zollner [1]).

## Durchgeführte Versuche

Durch Teiltonsynthese und geeignete Filterung (vgl. Fletcher und Rossing [2], Fleischer [4]) wurden mittels MATLAB Gitarrentöne sowohl mit streng harmonischen als auch mit leicht verschobenen Obertönen synthetisiert (Inharmonizitäten siehe Abbildung 2). Daraus wurden Tonpaare und kurze Melodiepaare zusammengestellt. Diese wurden normalhörenden Probanden über einen elektrodynamischen Kopfhörer (Beyer DT48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Fastl [5] in einer schallisolierten Kabine dargeboten. Vor den für die Ergebnisse herangezogenen Bewertungen wurden den Probanden (ohne deren Wissen) zwölf Schallpaare zum Einhören dargeboten, dann erst erfolgte die eigentliche Beurteilung in zufälliger Reihenfolge. Im Folgenden werden Paare aus einem harmonischen und einem gespreizten Schall als A-B-Paare, solche aus zwei identischen (harmonischen oder gespreizten) Schallen als A-A-Paare bezeichnet.

### Unterschied erkennbar?

20 Personen im Alter zwischen 23 und 60 (Median: 25) Jahren beurteilten jeweils 24 A-A- und 24 A-B-Paare, gebildet aus den Grundtönen der Saiten. Die Frage lautete, ob sich die beiden Töne unterscheiden, mögliche Antworten waren ja oder nein. Durchschnittlich 75% der A-A-Paare aller Saiten wurden richtig als nicht unterschiedlich erkannt. Tabelle 1 zeigt den Prozentsatz der Probanden, die bei mindestens drei der vier pro Saite getesteten A-B-Paare den Unterschied erkennen konnten.

### Schwebungen erkennbar?

Im zweiten Versuch wurden die Schalle des vorhergehenden verwendet, allerdings war nun die Frage, welcher der beiden Töne mehr Schwebungen enthalte. Am Versuch nahmen 19 Personen im Alter zwischen 23 und 60 (Me-

Ton	$E_2$	$A_2$	$D_3$	$G_3$	$B_3$	$E_4$
Unt. erk.	80%	70%	25%	45%	15%	10%

**Tabelle 1:** Prozentsatz der Probanden, die für die jeweilige Saite den Unterschied zwischen streng harmonischem und leicht gespreiztem Spektrum bei mindestens 3 von 4 Durchläufen erkannt haben.

dian: 25) Jahren teil. Die Antwortmöglichkeiten waren: der erste, der zweite oder keiner. Die A-A-Paare wurden in durchschnittlich 90% der Fälle richtig erkannt. Wird eine Tongattung als schwebend gewertet, wenn sie bei mehr als zwei A-B-Paaren einer bestimmten Saite von einer Person gewählt wurde, ergibt sich die in Tabelle 2 gezeigte Verteilung.

Ton	$E_2$	$A_2$	$D_3$	$G_3$	$B_3$	$E_4$
inh.	80%	47%	11%	42%	5%	0%
harm.	11%	0%	0%	0%	0%	11%

**Tabelle 2:** Anteil der Versuchspersonen, die entweder das gespreizte oder das streng harmonische Spektrum für die jeweilige Saite bei mindestens 3 von 4 Durchläufen als mehr schwebend bezeichneten.

### Präferenzen vorhanden?

Um zu prüfen, ob eine der Spektralverteilungen bevorzugt wird, wurden 16 Versuchspersonen sechs verschiedene Paare aus kurzen Melodien dargeboten. Acht der Probanden spielen ein Saiteninstrument, fünf ein anderes Instrument und drei sind keine Musiker. Ihr Alter lag zwischen 23 und 60 (Median: 25) Jahren. Wieder wurden 24 A-B- und 24 A-A-Paare dargeboten. Mögliche Antworten waren: kein Unterschied vorhanden, Variante 1 ist schöner oder Variante 2 ist schöner. Bei den A-A-Paaren konnten wiederum keine signifikanten Abweichungen beobachtet werden, außer dass von zwei (gleichen) gespreizten Varianten die zweite mehrmals als schöner beurteilt wurde. Tabelle 3 zeigt den Prozentsatz der Probanden, die eine der beiden Varianten als schöner empfand. Diese Entscheidung basiert darauf, dass eine Testperson eine Variante öfters als die andere und mindestens zweimal bevorzugt hat.

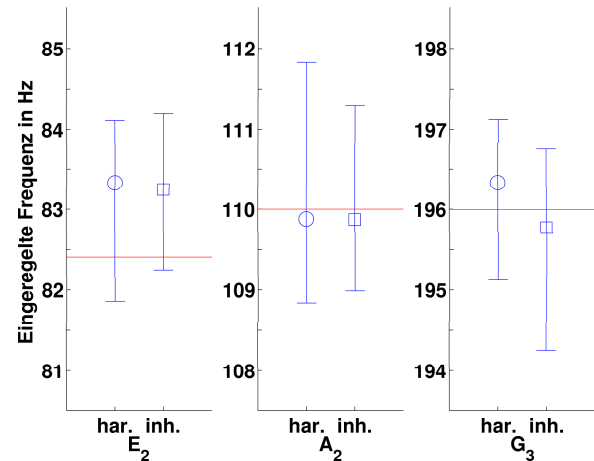
Melodie	1	2	3	4	5	6
inh.	44%	31%	50%	31%	25%	31%
harm.	31%	25%	38%	19%	13%	13%

**Tabelle 3:** Prozentsatz der Personen, die entweder das gespreizte oder das streng harmonische Spektrum einer Melodie öfters als das andere und bei mehr als zwei von vier Durchläufen als schöner empfunden haben.

### Tonhöhenwahrnehmung unterschiedlich?

Um zu untersuchen, ob die Spreizung der Obertöne Einfluss auf die Tonhöhenwahrnehmung hat, mussten fünf Musiker im Alter von 25 bis 60 (Median 31) Jahren, die alle ein Saiteninstrument spielen, einen Sinuston auf die Tonhöhe des dargebotenen komplexen Tones einregeln. Benutzt wurden die Töne  $E_2$ ,  $A_2$  und  $G_3$ , jeweils mit streng harmonischem sowie mit gespreiztem Spektrum. Für jede Variante wurden pro Versuchsperson 20 Einregelvorgänge durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die für

die verschiedenen Saiten eingeregelten Frequenzen, jeweils links die für den streng harmonisch komplexen Ton (Kreis), rechts für den mit leicht gespreiztem Spektrum (Quadrat). Dargestellt werden die Interquartilbereiche mit den Medianen als Symbole, sowie als horizontale Linie die Grundfrequenz des jeweiligen Tones.



**Abbildung 3:** Angleichen der Tonhöhe eines variablen Sinustones an die eines komplexen Tones. Median und Interquartilabstände der eingeregelter Frequenzen sowie Grundfrequenz des komplexen Tones als Linie. Für jede Grundfrequenz links der harmonische komplexe Ton (har.), rechts der mit gespreiztem Spektrum (inh.).

## Zusammenfassung

Es wurden sowohl rein harmonische als auch leicht inharmonische Gitarrenklänge mittels MATLAB synthetisiert. In psychoakustischen Experimenten wurde dann ermittelt, dass

1. Gitarrenklänge mit harmonischen bzw. inharmonischen Spektren unterschieden werden können,
2. Bei inharmonischen Gitarrenklängen die zugehörigen Schwebungen in der Regel erkannt werden,
3. Kurze Melodien aus inharmonischem Tonmaterial etwas bevorzugt werden, insbesondere von Musikern, die selbst ein Saiteninstrument spielen,
4. Harmonische und leicht inharmonische Gitarrenklänge die gleiche Tonhöhe hervorrufen.

## Literatur

- [1] Zollner M.: *Die Physik der Elektrogitarre* (In Vorbereitung, 2004)
- [2] Fletcher N., T. Rossing: *The Physics of Musical Instruments*, second Edition (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1998)
- [3] Terhardt E.: *Akustische Kommunikation* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1998)
- [4] Fleischer H.: *Abklingen der Saitenschwingungen von Solid-Body-Gitarren*. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 2002*, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e.V., Oldenburg, pp. 402-403 (2002)
- [5] Zwicker E., H. Fastl: *Psychoacoustics*, second Updated Edition (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1999)