

Fehler beim Stimmen der Gitarre

**Prüfungsarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters**

durchgeführt von

Robert Winkler

(Studienrichtung: Instrumentalstudium Gitarre)

Institut für Elektronische Musik und Akustik
der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Vorstand: O.Univ.Prof.Mag. DI Dr. Robert Hödrich

Betreuer: O.Univ.-Prof. Mag. DI Dr. Robert Hödrich

Graz, im September 2006

Inhaltsangabe

Ziel dieser Arbeit ist es, die Fehlerquellen beim Stimmen der Gitarre aufzuzeigen und zu bewerten. Dazu wird der Einfluss von Instrumentenbau (bzw. des Saitenmaterials) und Spieltechnik auf Intonation und Stimmung untersucht. Ein Vergleich der unterschiedlichen Stimmungsmethoden zeigen ihre Stärken bzw. Schwächen auf. Grundlegende Fragen zur Genauigkeit des Messgeräts „menschliches Ohr“ wird einerseits theoretisch erörtert (Lautstärke, Dauer, Klangfarbe und Hüllkurve als Einflussfaktoren für die Tonhöhenwahrnehmung, günstiger Hörbereich), andererseits auch praktisch an Studenten der Gitarrenklassen an der KUG getestet: Die Frequenzunterscheidungsschwelle wird mit den für die Stimmung relevanten Flageolett-Tönen ermittelt werden. Abschließend wird versucht, eine Anweisung zum Stimmen der Gitarre unter Berücksichtigung aller Fehlerfaktoren zu geben.

Abstract

The main goal of this study is to point out and evaluate the errors being made tuning a guitar. To achieve this, we have to look at the construction as well as the strings of the instrument and examine their intonation and tuning. Comparisons of the different methods in tuning show their strengths respectively as their weaknesses. Fundamental questions of the accuracy in measuring the human hearing will be discussed theoretically, like intensity, duration, timbre and envelope as the parameter of perception of the pitch, and the favorable audible area. Afterwards it will be tested by guitar playing students of KUG as well: The discrimination in frequencies were tested with the Flageolett-Tuning. In conclusion, an instruction to tune a guitar is given in consideration of all the errors that can be made.

Ehrenwörtliche Erklärung:

Ich versichere, dass ich die hier vorliegende Arbeit eigenständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen verfasst habe.

Datum

Unterschrift

Vorwort

Die bewusste Beschäftigung mit dem Thema „Stimmen der Gitarre“ begann bei mir knapp vor der ersten künstlerischen Diplomprüfung. Den Anstoß dazu gab mir damals das Diplom einer Gitarrenkollegin, die hervorragend spielte, aber wegen ihrer verstimmten Gitarre eine schlechtere Note erhielt. Um ein ähnliches Schicksal zu vermeiden, informierte ich mich bei meinen Lehrern und anderen Gitarristen und war schon damals über die Vielzahl, aber viel mehr noch von der Oberflächlichkeit der angebotenen Methoden überrascht. In Zuge meiner Recherchen für diese Arbeit konnten mir selbst erfahrene Konzertgitarristen keine genauen Begründungen für die eine oder andere Stimmungsmethode geben. Besonders im Gedächtnis ist mir da folgender zynischer Musikerwitz geblieben:

Die Hälfte seines Lebens stimmt der Gitarrist vergebens. Was macht er die andere Hälfte? Er spielt auf einer verstimmten Gitarre!

Mit der vorliegenden Arbeit möchte die gängigen Stimmungsmethoden kritisch beleuchten und in der Zusammenfassung versuchen, eine auf den Argumenten des Hauptteils basierende Anleitung für das Stimmen der Gitarre zu geben.

Im ersten Kapitel werden akustische und psychoakustische Voraussetzungen geschaffen, das zweite Kapitel geht auf spezielle gitarrenbauliche Probleme im Zusammenhang mit der Stimmung ein. Das dritte Kapitel untersucht das passende Temperatursystem für die Gitarre und beschreibt die unterschiedlichen Stimmungsmethoden. Kapitel 4 ist ein passiver Hörversuch, der klären soll, inwieweit die theoretischen Konstrukte der vorhergehenden Kapitel und teils sehr kleinen Fehlerquellen überhaupt Relevanz besitzen, wie genau ein geübter Gitarrist zu hören im Stande ist, und ob ein Stimmen nach Schwebungen zielführend ist. Dazu wird an Gitarrestudenten der Kunstuniversität Graz

die kleinstmögliche Frequenzunterscheidungsgrenze für reale Gitarrenklänge ermittelt.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, bei meinen Studienkollegen für die Teilnahme am Hörversuch, Johannes Egger/Institut f. Nachrichtentechnik und Ronald Mesaric/Tonstudio Romes für die Aufnahme der Tonbeispiele, Karin Cranford für die Übersetzung des Abstracts ins Englische und bei allen Gitarristen und Gitarrenbauern, die mir so breitwillig Auskunft gegeben haben.

Vorwort.....	1
1 Akustische und psychoakustische Grundlagen	5
1.1 Saitenschwingung, Teiltöne, Ideale und reale Saite	6
1.1.1 Saitenschwingungen und Teiltonreihe.....	6
1.1.2 Ideale und reale Saite.....	8
1.2 Frequenzabhängiges Auflösungsvermögen des Gehörs	11
1.3 Parameter der Tonhöhenwahrnehmung	14
1.3.1 Einfluss der Lautstärke auf die Tonhöhe	15
1.3.2 Einfluss der Tondauer auf die Tonhöhe.....	16
1.3.3 Einfluss der Klangfarbe auf die Tonhöhe.....	18
1.3.4 Einfluss der Hüllkurve auf die Tonhöhe.....	19
2 Instrumentenbau.....	25
2.1 Saiten	25
2.2 Griffbrett.....	28
2.2.1 Steg.....	30
2.2.2 Sattel	33
2.2.3 Mechanik.....	34
2.3 Unsauberer Fingeraufsatz	35
3 Stimmungsmethoden	37
3.1 Stimmtton	37
3.2 Das richtige Temperatursystem.....	40
3.2.1 Reine Stimmung.....	40
3.2.2 Gleichmäßig temperierte Stimmung	41
3.2.3 Ungleichmäßig temperierte Stimmungen	44
3.3 Stimmungsmethoden.....	47
3.3.1 5. Bund-Methode.....	47
3.3.2 Quartenstimmung.....	49
3.3.3 E-Dur- Kontrolle.....	50
3.3.4 Flageolett-Stimmung	51
3.3.5 Stimmen nach Schwebungen.....	54
4 Hörversuch.....	59
4.1 Zielsetzung	59

4.2	Versuchsdesign	60
4.2.1	Versuchspersonen.....	60
4.2.2	Aufbau des Tests.....	60
4.2.2.1	Sukzessiv-Test	61
4.2.2.2	Umfrage Stimm-Technik.....	62
4.2.2.3	Simultan-Test	63
4.2.3	Zusammenstellung der Testbeispiele	65
4.3	Versuchsauswertung	68
4.3.1	Ergebnisse des Sukzessiv-Tests.....	68
4.3.1.1	Hohe Lage.....	68
4.3.1.2	Tiefe Lage	70
4.3.1.3	Sukzessiv-Test mit Forced-Choice.....	72
4.3.2	Ergebnisse der Umfrage Stimm-Technik.....	74
4.3.3	Ergebnisse des Simultan-Tests.....	75
4.3.3.1	Hohe Lage.....	76
4.3.3.2	Tiefe Lage	80
5	Zusammenfassung	84
5.1	Versuch einer Anweisung zum Stimmen der Gitarre	84
5.2	Resümee	87
	Anhang.....	92
	Literaturverzeichnis.....	106
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	110
	Verzeichnis der CD-Inhalte.....	111

1 Akustische und psychoakustische Grundlagen

Die Ausbildung zum klassischen Gitarristen hat viele Facetten. Einen Großteil der Arbeit muss man als Musiker am Instrument z.B. für die Verfeinerung der Spieltechnik, darunter Üben von Läufen, Bindungen Arpeggios, Griffkombinationen u.s.w. aufwenden. Diesen immensen Zeitaufwand kann sich jeder Gitarrist aus eigener Erfahrung bestätigen.

Ein weiterer großer Brocken ist die Analyse und die Frage der richtigen Interpretation eines Werkes, Fingersatzsuche und schließlich das Auswendig-Lernen.

Bei all diesen Herausforderungen und Belastungen vergisst man mit der Zeit auf die Grundlagen, die selbstverständlichen Dinge. So auch aufs Stimmen. Dabei ist diese Kunst – ich möchte es bewusst nicht bloß als „Tätigkeit“ degradieren - für die Wirkung eines Musikstückes von großer Bedeutung. Die beste Interpretation und Technik nützen wenig, wenn der Zuhörer bei jedem verstimmtten Akkord innerlich zusammenzuckt.

Und ähnlich kritisch wie bei der Sisyphosarbeit Interpretation oft vorgegangen wird, so sollten Gitarristen auch ihre Stimmungsmethoden reflektieren. Immerhin stimmen sie mehrmals täglich ihr Instrument – oft resignierend, mit dürftigem Ergebnis.

Für eine kritische Beschäftigung mit dem Thema Stimmen der Gitarre fehlt vielen das theoretische Rüstzeug, das Kapitel 1 sollen als Grundlage für die weitere Diskussion dienen.

1.1 Saitenschwingung, Teiltöne, Ideale und reale Saite

1.1.1 Saitenschwingungen und Teiltonreihe

Versetzt man eine Gitarrensaite in Schwingung hört man einen bestimmten Ton mit einer eindeutigen Tonhöhe, den sogenannten Grundton. Was man nicht bewusst hört, sind die zahlreichen Obertöne. Sie sind verantwortlich für die Empfindung der Klangfarbe. Der Gitarrist erzeugt viele Obertöne, indem er die Saite nahe am Steg anschlägt (sul ponticello), der Ton wird „hell“. Am Griffbrett angeschlagen (sul tasto) erhält man einen obertonarmen Ton, er klingt „weich, warm“.

Eine Gitarrensaite kann in unterschiedlichen Schwingungsformen (Schwingungs-Moden) gleichzeitig oszillieren. Als Randbedingungen sind Steg und Sattel (bzw. gedrückter Bund) fixiert, die ein festes Ende, also einen Knotenpunkt bilden.

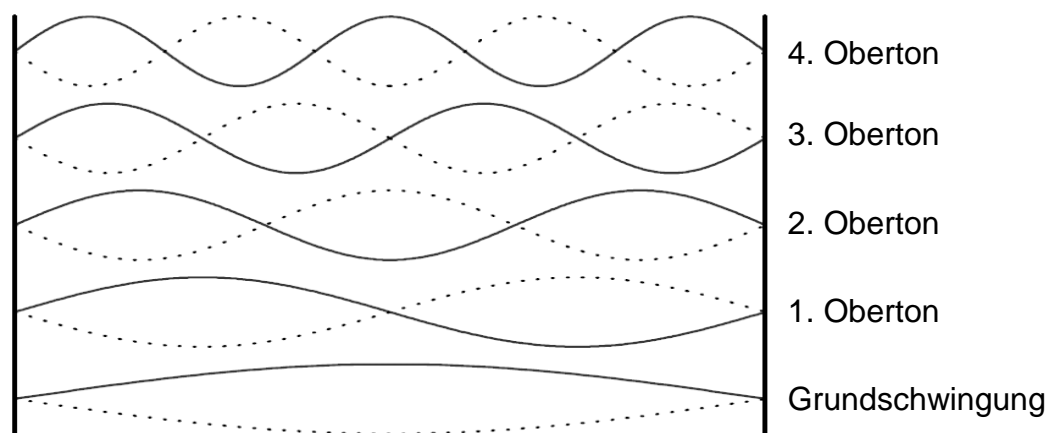


Abb.1: schematische Darstellung der ersten fünf Schwingungsformen einer Saite.¹

¹ Gross R./Marx A, S. 330

Die *Grundschiwingung*: auch als 1. Partialton oder 1. Teilton bezeichnet. Einzige Knotenpunkte sind Steg und Sattel, dazwischen befindet sich ein Schwingungsbauch. Physikalisch entspricht dies einer Wellenlänge λ von $2 \cdot L$ (L ...schwingende Saitenlänge). (Abb. 1)

1. *Oberton (=2. Partialton, 2. Teilton)*: Ein zusätzlicher Knotenpunkt befindet sich genau in der Mitte der Saite, zwei Schwingungsbäuche ($\lambda = L$). (Abb.1)

2. *Oberton (=3. Partialton,3. Teilton)*: Saite wird in 3 gleiche Abschnitte aufgeteilt, es ergeben sich 3 Schwingungsbäuche ($\lambda = 2/3 \cdot L$).

In analoger Weise geht dieses Prozedere weiter für höhere Obertöne. Zusammenfassend lässt sich dies mit der folgenden Formel beschreiben:

$$[\text{Gl. 1}] \quad \lambda = \frac{2L}{n_i} \quad \begin{array}{l} \lambda \dots \text{Wellenlänge} \\ n_i \dots \text{Zahl des } i\text{-ten Partialtones} \\ L \dots \text{Saitenlänge} \end{array}$$

Die Wellenlänge wird also kürzer mit zunehmender Partialtonordnung n_i . Der Musiker hat selten mit der Größe Wellenlänge, vielmehr mit der Frequenz als Maß für die Tonhöhe zu tun, die Umrechnung erfolgt über:

$$[\text{Gl. 2}] \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad \begin{array}{l} f \dots \text{Frequenz} \\ c \dots \text{Schallgeschwindigkeit} \end{array}$$

durch Einsetzen der Gl. 1 in Gl. 2:

$$[\text{Gl. 3}] \quad f = \frac{n_i \cdot c}{2L}$$

Die Frequenzen der Obertöne sind also ganzzahlige ($n_i \in \mathbb{N}$) Vielfache der Grundfrequenz $f_1 (= \frac{1 \cdot c}{2L})$.

$$[\text{Gl. 4}] \quad \boxed{f_{n_i} = n_i \cdot f_1}$$

Abb. 2 zeigt eine Grundschiwingung (hier C) mit ihren ersten 15 Obertönen, die sogenannte Teiltonreihe.

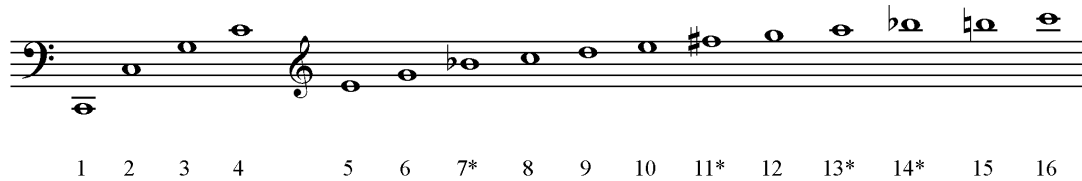


Abb. 2: Teilton-Reihe über C, * tiefer oder höher als reine Skala²

Bei den Flageolett-Tönen berührt der Finger ganz leicht die Saite an einem der Knotenpunkte (siehe Abb. 1), dadurch wird ein Oberton angeregt. Die Flageoletts sind also aus der natürlichen Teiltonreihe, eine Eigenschaft, die bei den Stimmungsmethoden berücksichtigt werden muss, wenn man Flageolett mit temperierten Tönen vergleicht.

1.1.2 Ideale und reale Saite

Schon die Überschrift lässt ahnen, dass ein Unterschied zwischen dem mathematisch/theoretischem Konstrukt „ideale Saite“ mit den wirklichen Eigenschaften einer Saite besteht.

Hier ist vor allem die Steifigkeit zu nennen, die eben bei der idealen (im physikalischen und nicht qualitativen Sinn) gar nicht auftaucht. Lässt man z.B. eine ideale Saite über eine Tischkante hängen, so folgt sie exakt dem Knick (Abb. 3a), während die reale Saite einen leichten Bogen macht (Abb. 3b).

² Brüderlin, 1978, S. 24



Abb. 3: Steifigkeit von idealer und realer Saite

Eine Konsequenz der unterschiedlichen Steifigkeit ist die „Inharmonizität der Teiltöne“:

„An ideal string vibrates in a series of modes that are harmonics of a fundamental [...]. Actual strings have some stiffness, which provides a restoring force (in addition to the tension), slightly raising the frequency of all the modes. The additional restoring force is greater in the case of the higher modes because the string makes more bends.“³

Die Obertöne sind also nicht mehr ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, wie in Gleichung 4 (siehe Kap. 1.1.1) hergeleitet. Die Formel muss erweitert werden zu

$$[\text{Gl.5}]^4 \quad f_{n_i} = n_i \cdot f_1 (1 + A \cdot n_i^2)$$

Aus der Gleichung ist zu entnehmen, dass die Abweichung umso stärker (und zwar quadratisch wegen n_i^2) wird, je höher die Ordnung des Teiltones ist (der 2. Teilton ($n_i=2$) also um 4-fache, der 3. um 9-fache, usw.).

Besonders interessant ist der Faktor A.

$$\text{Gl. 6}^5 \quad A = \frac{\pi^3 r^4 E}{8FL^2}$$

³ Rossing 1983, S.264

⁴ ebenda 1983, S. 264

⁵ ebenda 1983, S. 264

Hier gehen die geometrischen Faktoren Radius r und Länge L der Saite ein, aber auch die Spannkraft F und mit E das Elastizitäts-Modul. In Verbindung mit Gl. 4 ergeben sich große Abweichungen:

- je dicker die Saite ($A \sim r^4$). Die 4. Potenz macht die Saitendicke zum größten Einflussfaktor.
- je kürzer die Saite ($A \sim 1/L^2$).
- je lockerer gespannt die Saite ist.

Die Inharmonizität der Teiltöne wird beim Klavierstimmen durch die Spreizung der Oktaven berücksichtigt, auf der Gitarre ist die Abweichung aber vernachlässigbar:

„Sie [Anm.: Inharmonizität der Teiltöne] kommt marginal bei angeschlagenen und gezupften Saiten vor, darf aber beim Klavierstimmen nicht unberücksichtigt bleiben, wenn Belastbarkeit der Saite durch deren Steife beeinträchtigt wird (bei kurzen, dicken Saiten beispielsweise).“⁶

Eigene Messungen⁷ ergaben auf 1., 2. und 4. Saite keine signifikanten Hinweise auf ein Auftreten einer verstärkten Inharmonizität. Die 6. Saite wich um etwa 10 Cent für eine bestimmte Saitenart vom harmonischen Wert ab. Weniger drastisch aber doch bemerkenswert sind die 5. und 3. Saite. Der Theorie nach einleuchtend (siehe Gl. 5), sind diese 3 Saiten doch von allen die dicksten und mit der geringsten Spannung. Die gemessenen Werte können den Tabellen 5-7 im Anhang entnommen werden. Die Genauigkeit dieses Tests reicht jedoch nicht aus für eine quantitative Aussage.

⁶ vgl. Baines 1996, S. 322

⁷ Frequenzanalyse mit Cool Edit Pro 2 an verschiedenen Saitentypen (Nylon, Carbon, Basssaiten). Die analysierten Töne sind auf der CD im Verzeichnis :\Aufnahmen zu finden. Die Analyseparameter waren: Blackmann-Harris, FFT-Size: 65536, Länge des Tones 0,9s. Automatische Berechnung der Lage des Intensitätsmaximums durch die Frequenzanalysefunktion (Scan) des Programms, dadurch entsteht ein methodischer Fehler, der die Signifikanz der Ergebnisse herabsetzt. Geeigneter wäre eine parabolische Interpolation zur Ermittlung der tatsächlichen Frequenz.

Für das Stimmen der Gitarre hat die Inharmonizität der Teiltöne besonders Auswirkungen bei der Flageolett-Methode, bei der im extremsten Fall (6. Saite/1. Saite) der 4. Teilton (=Doppeloktav-Flageolett am 5. Bund) mit dem Grundton der e¹-Saite verglichen wird (detaillierte Besprechung folgt in Kap. 3.3.4).

1.2 Frequenzabhängiges Auflösungsvermögen des Gehörs

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Töne sich im Besonderen für das Stimmen der Gitarre eignen.

Zwischen dem Anschlag eines Gitarrentones bis zum empfundenen Klangerlebnis gibt es viele Stationen. Die Kraft des Fingers wird auf die Saite übertragen (transversal, longitudinal, torisional), vom Steg auf den Korpus und Resonanzraum und als Schallwelle an unser Ohr abgestrahlt. Nach der Filterwirkung der Ohrmuschel gelangt der Klang ans Trommelfell, das diese Luftschwankungen über ein gefinkertes System von Knöchelchen (Hammer, Ambos und Steigbügel) als mechanische Energie über das Ovale Fenster ins Innenohr weiterleitet. Dort werden Schallwellen in einer Flüssigkeit erzeugt, die bestimmte Haarzellen zum Feuern von elektrischen Impulsen anregen. Das Gehirn verarbeitet diese neuronalen Signale zu einem Klangeindruck. Soweit eine stark vereinfachte Darstellung des Hörvorganges (genauer folgt im Kapitel 3.3.5).

Auf diesem Spießrutenlauf der Energie gibt es für den ursprünglichen Klang viele Hürden. Vor allem im Ohr treten nicht-lineare Veränderungen auf (so werden z.B. von einer Station nicht alle Frequenzen gleich stark beeinflusst), die das gehörte Ergebnis von den objektiven wissenschaftlichen Messwerten unterscheidet. Man spricht in diesem Zusammenhang von Empfindungsgrößen, im Gegensatz zu den

Messgrößen. Auf die Empfindungsgröße „Tonhöhe“ wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

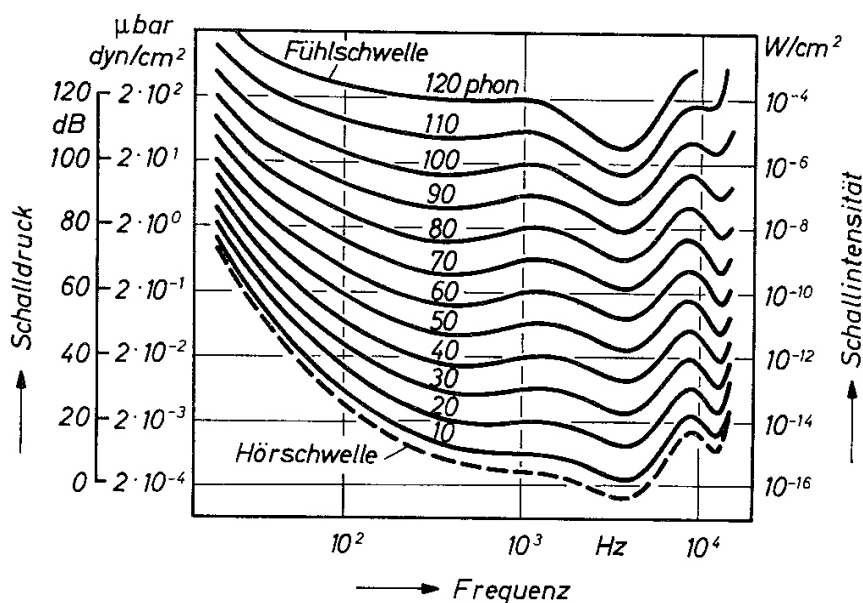


Abb. 4: Kurven gleicher Lautstärkenempfindung⁸

Abbildung 4 zeigt die Kurven gleich empfundener Lautstärke. Die unterste Linie gibt die Hörschwelle an, den gerade noch hörbaren, also leisesten Ton. Bei tiefen Frequenzen und über 10 kHz ist ein sehr viel höherer Schalldruck (Schallpegel) nötig, als bei Frequenzen um 1000 Hz, um einen Ton überhaupt noch zu hören. Diese Frequenzen werden nämlich vom Gehörgang zusätzlich verstärkt:

„The auditory canal acts as a pipe resonator that boosts hearing sensitivity in the range of 2000 to 5000 Hz.“⁹

Unser Gehör reagiert nicht nur für Lautstärkenunterschiede in diesem Frequenzbereich sehr differenziert, sondern auch für Frequenzunterschiede:

⁸ Meyer/Neumann 1974, S.214

⁹ Béséky 1960, S 270

		Hörpegel/dB								
		5	10	20	30	40	50	60	70	80
Frequenz in Hz	31	220	150	97	76	70				
	62	120	120	85	80	74	61	60		
	125	100	73	52	46	43	48	47		
	250	61	37	22	19	18	17	17	17	17
	500	28	19	12	10	9	7	6	7	
	1000	16	11	7	6	6	6	6	5	5
	2000	14	6	4	3	3	3	3	3	3
	4000	10	8	5	5	4	4	4	4	
	8000	11	9	7	6	5	4	4		
	11700	12	10	6	6	6	5			

Tabelle 1: Der kleinste erkennbare Frequenzunterschied für Sinuswellen in Cent¹⁰

Die Unterscheidungsschwelle für Frequenzen (jndF: just noticeable difference in Frequency) variiert in der Literatur stark, je nach Test ergeben sich Extremwerte von 0,3 – 75 Cent¹¹, im Durchschnitt aber um +/- 6 Cent.¹²

Als Quintessenz dieses Kapitels ist festzuhalten, dass Frequenzen von 2-5 kHz sehr gut hörbar (Lautstärke) und sehr fein unterscheidbar (Tonhöhen) sind. Darauf aufbauend kann man für die Stimmtöne fordern:

Die Stimmtöne sollen in einem günstigen Frequenzbereich liegen!

Die Gitarre ist ein sehr tiefes Instrument, die Grundtöne der einzelnen Saiten sind weit unterhalb des geforderten Frequenzbandes (E=82 Hz, A= 110 Hz, d= 147 Hz, g= 196 Hz, h= 247 Hz, e¹= 330 Hz, siehe auch Tabelle 8 im Anhang).

¹⁰ Pierce 1985, S. 117

¹¹ zur Cent-Rechnung siehe Kap. 3.2.2

¹² vgl. Fischer 1996, S. 88

Würde man Sinustöne dieser Frequenzen miteinander vergleichen, wäre der jndF im Bereich eines Achteltons und mehr (siehe Tabelle 1). Erleichtert wird die Tonhöhenunterscheidung durch die Existenz von Obertönen, die automatisch in einen höheren Bereich vordringen und einen konkreten Toneindruck stärken (Residuum, Periodizitätstonhöhe, virtual pitch).¹³ Für das Stimmen der Gitarre ist es besser, möglichst hohe Töne zu verwenden.

1.3 Parameter der Tonhöhenwahrnehmung

Die musikalische Größe „Tonhöhe“ ist keineswegs so einfach fassbar, wie es scheint. Sie ist von mehreren Faktoren¹⁴ beeinflusst, begründet durch die Physiologie des Ohres und die neuronale Verarbeitung im Gehirn.

Die Tonhöhe ist eine Empfindungsgröße, die von folgenden physikalischen Messgrößen abhängt:

- (1) **Frequenz:** absolut dominierende Größe für die Tonhöhenempfindung
- (2) **Schalldruck:** Maß für die Lautstärke, siehe Kap. 1.3.1
- (3) **Tondauer:** siehe Kap. 1.3.2
- (4) **Spektrum:** bestimmend für den Eindruck einer Klangfarbe, siehe Kap. 1.3.3
- (5) **Hüllkurve:** siehe Kap. 1.3.4

In den folgenden Kapiteln werden die weniger bekannten Einflussfaktoren auf die Tonhöhe besprochen. Vorrangiges Ziel ist die Überlegung um den adäquaten Anschlag zum Stimmen.

¹³vgl. Roederer 1977, S. 47

¹⁴vgl. Rossing 1983, S. 73

1.3.1 Einfluss der Lautstärke auf die Tonhöhe

Der Frage „Welche Tonhöhe besitzt ein Sinuston mit der Frequenz von 200 Hz?“ könnte die Gegenfrage folgen: „Mit welcher Lautstärke wird dieser gespielt?“ Je nachdem variiert nämlich die empfundene Tonhöhe um einen Viertel-Ton.

Abb. 5 zeigt die Tonhöhenänderung („pitch-shift“) bei unterschiedlichen Schalldrücken (=dominierende physikalische Messgröße der Lautstärke). Zu erkennen ist, dass eine Erhöhung der Lautstärke für den einen Frequenzbereich zu einer Anhebung, in einem anderen zur Senkung der Tonhöhe führt. Frequenzen unter 2000 Hz werden mit zunehmender Lautstärke als tiefer, darüber als höher empfunden.¹⁵

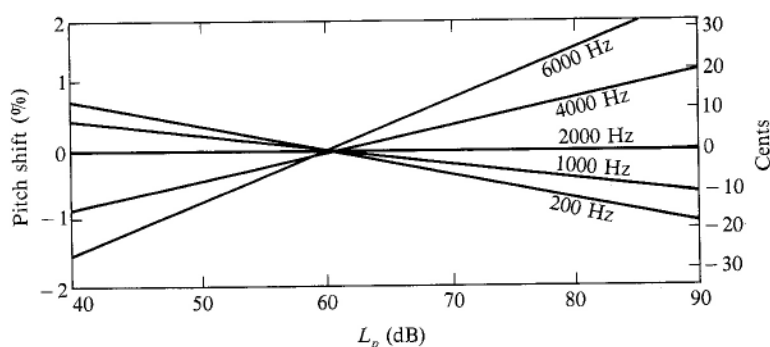


Abb. 5: Pitch shift eines Sinustones als Funktion des Schalldrucks¹⁶

Überträgt man diese Erkenntnisse auf die Gitarre, darf man einige Einschränkungen vornehmen, die den pitch shift durch die Lautstärkenwirkung weniger dramatischer erscheinen lassen. Abb. 5 gilt nur für reine Sinustöne. Die Abhängigkeit eines komplexen musikalischen Tones von der Lautstärke ist seinerseits wiederum abhängig von den dominierenden Teiltönen, also in konsequenter Folge vom Spektrum (Klangfarbe)¹⁷.

¹⁵ vgl. Rossing 1983, S. 108f

¹⁶ ebenda 1983, S. 109

¹⁷ vgl. Rossing 1983, S. 109

Weiters ist die dynamische Breite eines Gitarrentones sehr beschränkt (Flageolett-Töne: 30-66 dB¹⁸).

Im Zusammenhang mit dem Stimmen ergibt sich der geringste pitch shift dann, wenn beide Töne (Stimmton und zu stimmender Ton) gleich laut angeschlagen werden. Hier ist die Abweichung gleich Null. Die Forderung an den adäquaten Anschlag lautet also:

Beide Töne sind gleich laut zu spielen!

Die Frage der Relation der Lautstärke zueinander ist somit geklärt, nun zur Frage: „Wie laut soll überhaupt angezupft werden?“

Zum Einen ist ein lauter Ton hilfreich für die Frequenzunterscheidung (siehe Tab. 1), andererseits werden durch allzu starken Anschlag sehr viele störende Geräusche erzeugt, die das Auflösungsvermögen für Frequenzen wieder vermindern (Maskierung). Ein Mezzo-Forte-Anschlag ist daher vermutlich empfehlenswert.

1.3.2 Einfluss der Tondauer auf die Tonhöhe

Die Frage, wie lange ein Ton erklingen muss, um eine Tonhöhe zu erkennen, ist schon 1840 von SAVART geklärt: es reichen sogar schon zwei Periodendauern.¹⁹

Der Tonhöhereindruck ist hier allerdings sehr ungenau, eher ein Klick. In Analogie zur Heisenberg'schen Unschärferelation wird das Verschwinden einer eindeutigen Tonhöhe mit kurzer Zeitdauer als „Akustisches Unschärfeprinzip“ bezeichnet. Mit zunehmender Tondauer wird die Empfindung einer Tonhöhe immer konkreter.

¹⁸ vgl. Meyer, 1972, S. 64

¹⁹ vgl. Rossing 1983, S. 107

Abb. 6 zeigt den relativen jndF für unterschiedliche Tondauern und Frequenzbereiche.

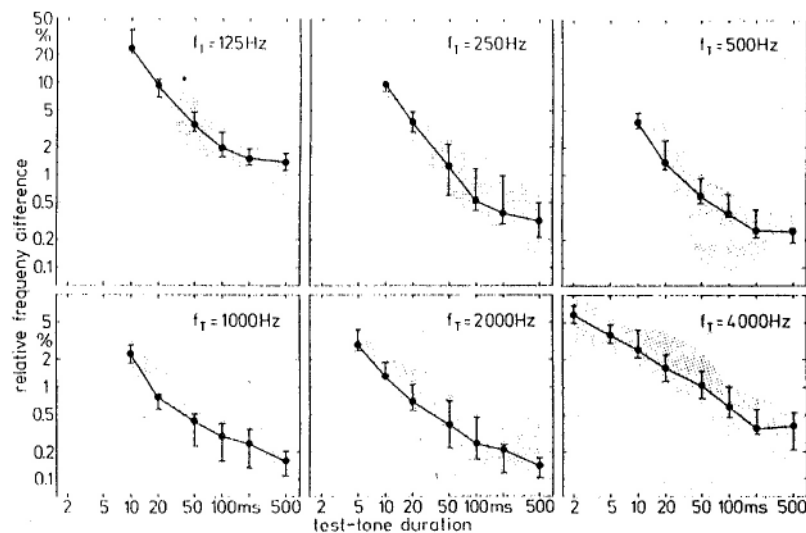


Abb. 6: Frequenzunterscheidung von Sinustönen bei kurzen Dauern²⁰

Prinzipiell gilt, je länger der Ton, desto deutlicher die Tonhöhe.

Von diesem Standpunkt aus sollte man einen möglichst lang ausgehaltenen Ton zum Stimmen der Gitarre verwenden. Limitierend wirken hier allerdings andere Faktoren (Ausschwingvorgang), die im Kapitel 1.3.4 näher erörtert werden.

Zusammenfassend kann für Stimmtöne formuliert werden:

Die Stimmtöne dürfen nicht zu kurz ausfallen!

²⁰ Zwicker/Fastl 1990, S. 116

1.3.3 Einfluss der Klangfarbe auf die Tonhöhe

Für den Klangfarbeneindruck sind die Anzahl und Stärke der Obertöne maßgeblich. Für einen hellen, obertonreichen Ton verschiebt der Gitarrist die Anschlagstelle Richtung Steg (sul ponticello), für einen weichen, obertonarmen Sound geht er ans Griffbrett (sul tasto).

Die Tonhöhe zeigt eine Abhängigkeit vom Obertonspektrum bei Grundtönen bis zu 1000 Hz.²¹ Darüber ändert sich an der Tonhöhe selbst bei extremen Klangfarbenwechsel nichts mehr.

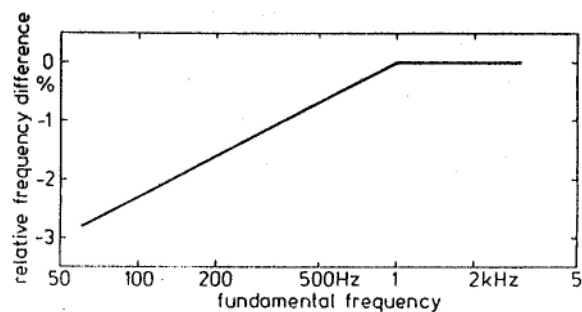


Abb. 7: Relativer Frequenzunterschied eines komplexen Tones im Vergleich mit einem Sinustones der selben Tonhöhe.²²

Abb. 7 zeigt den relativen Frequenzunterschied eines komplexen, obertonhaltigen Tones (hier: alle harmonischen Teiltöne mit gleicher Lautstärke, -3 dB pro Oktave) zu einem reinen Sinuston gleich empfundener Tonhöhe.

Je mehr Obertöne einer Sinusschwingung beigemischt werden, desto tiefer wirkt der Ton.²³ Die Grundtöne auf der Gitarre liegen alle unter 1000 Hz, die Absenkung der Tonhöhe bei hellen Tönen gilt also im gesamten Tonbereich der Gitarre.

²¹ vgl. Zwicker/Fastl 1990, S. 110

²² ebenda, S. 111

²³ vgl. ebenda, S. 111

Für den passenden Stimm-Anschlag gilt analoges wie für die Lautstärke: Besitzen beide Töne dieselbe Klangfarbe, dann weisen beide die gleiche Verschiebung auf und sind fehlerfrei vergleichbar.

Beide Töne sollen die gleiche Klangfarbe besitzen!

Die tiefen Grundtöne liegen weit außerhalb des günstigen Hörbereichs (siehe Kap. 1.2), ihre höheren Obertöne schaffen es jedoch in diesen sensitiven Frequenzabschnitt. Durch einen obertonreichen Anschlag erhalten sie die nötige Intensität, um durchzudringen und positiv zur Frequenzunterscheidung beizutragen. Daher die weitere Forderung:

Wähle zum Stimmen eine helle Klangfarbe!

1.3.4 Einfluss der Hüllkurve auf die Tonhöhe²⁴

Hüllkurve (envelope):

„Time variation of the amplitude (or energy) of a vibration“²⁵

Ein musikalischer Ton verändert sich im Laufe seines Erklingens, er kann zeitlich in 4 Abschnitte unterteilt werden:

- Attack
- Decay
- Sustain
- Release

²⁴ Die folgenden drei Saiten sind inhaltlich an das Vorlesungsskriptum an der KUG „Akustik der Musikinstrumente“ von Prof. Robert Höldrich angelehnt.

²⁵ Rossing 1983, S. 29

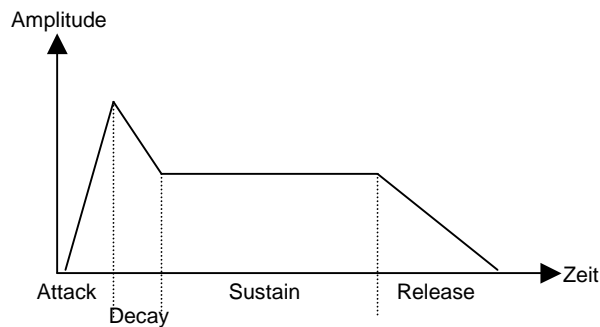


Abb. 8: Schema einer Hüllkurve

Attack: Der Ton benötigt vom Anschlag weg eine gewisse Einschwingzeit, bis er das Maximum an Lautstärke erreicht hat. Dabei benötigen die einzelnen Teiltöne unterschiedlich viel Zeit, um sich zu entwickeln. Deshalb ist in dieser Phase des Klanges ein wirres (teils auch inharmonisches) Teiltenspektrumsgemisch zu hören, das vom Anregungsmechanismus und spezifischen Eigenschaften des Instruments abhängt. Dieser charakteristische Einschwingvorgang ist es auch, der die meiste Information über das Instrument enthält: Versuche mit Aufnahmen, bei denen man nachträglich den Einschwingvorgang entfernt hat, zeigen eine weitaus schwerere Zuordnung der Beispiele zu einem bestimmten Instrument.

Bei guten Gitarren beträgt die Einschwingzeit etwa 35-65 ms.²⁶

Decay: Der Abschnitt vom Punkt maximaler Amplitude bis zum Erreichen des Sustain-Levels wird als Decay (Abfall) bezeichnet.

Sustain: Die Sustain-Phase charakterisiert sich durch einen relativ gleichmäßigen Lautstärkepegel. Auch das Teiltenspektrum bleibt ziemlich konstant. Man spricht von einer „stationären Phase“ des Klanges.

²⁶ vgl. Meyer 1995, S. 1372

Die Energie für die dauerhaft konstante Amplitude muss ständig neu zugeführt werden, damit der Ton nicht ausschwingt. Dies geschieht bei den Blasinstrumenten durchs Weiterblasen, bei den Streichern durch die ständigen mikroskopischen Haft-Abrutsch-Vorgänge an der Kontaktstelle Bogen/Saite.

Die Gitarre und andere gezupfte/geschlagene Instrumente besitzen so einen kontinuierlichen Energie-zuführenden Mechanismus nicht. Es wird kein gleichbleibendes Lautstärkeniveau erreicht, die Sustainphase fällt also bei der Gitarre weg und es folgt sofort der nächste Abschnitt, der

Release: Die Zeit bis zum Verklingen des Tones nennt man Release. Während sich im Attack sehr viele Teiltöne ausbilden, werden vor allem die höheren unter ihnen beim Ausschwingvorgang stark gedämpft und der Ton klingt stumpf, obertonarm.

Speziell auf der Gitarre ist die selektive Dämpfung unterschiedlicher Frequenzbereiche stark ausgeprägt. Die Ausklingzeiten in der unteren Oktave betragen hier 10-20 Sekunden, in der hohen Lage etwa 5 Sekunden und um 2000 Hz (also im Obertonbereich) nur 2-3 Sekunden. Zusätzlich verringern verschmutzte, alte Saiten die Nachhallzeit der hohen Obertöne, sie wirken dumpf.²⁷

Das Wegfallen von Obertönen erzeugt im Ausschwingvorgang einen höheren Tonhöhereindruck als im Einschwingvorgang (Zusammenhang Klangfarbe-Tonhöhe siehe Kap. 1.3.3).

Dieser Anstieg der Tonhöhe wird durch einen anderen Effekt gebremst:

„Plucking or striking the string causes tension modulation, which is perceived as a rapid decay of pitch after the attack. This can be heard in the clavichord, the guitar (played in forte), and several other string instruments.”²⁸

²⁷ vgl. Meyer 1995, S. 1372

²⁸ Järveläinen 2001, S. 191

Die Modulation der Saitenspannung kommt dadurch zustande, dass man beim Anzupfen die Saite zuerst aus der Ruhelage auslenkt und somit eine höhere Spannung herbeiführt. Beim Loslassen schwingt die Saite zunächst wieder in ihre Ruhelage zurück (kleiner Spannung), um anschließend auf die andere Seite wieder einem Spannungsmaximum zuzustreben. Die Spannung erreicht also pro Saitenschwingung zweimal den maximalen Wert.²⁹ Die modulierte Saitenspannung geht bei der Berechnung der Tonhöhe einer Saite ein, allerdings nicht linear, sondern als Quadratwurzel ($f=1/2L*\sqrt{(F/\mu)}$), es handelt sich also um einen nicht-linearen Effekt.

„Since the mode frequencies are proportional to the square root of the tension stress σ , this nonlinearity causes an unpleasant falling ‘twang’ as the string is released and its amplitude decays, and is minimized by using strings with a low Young’s modulus, such as gut or nylon, and increasing the tension stress to nearly the breaking point. [Anm.: Beide Faktoren treffen bei der akustischen Gitarre zu.]”³⁰

Das Absinken der Frequenz zeigt die Abb. 9 für einen E-Gitarren-Ton.

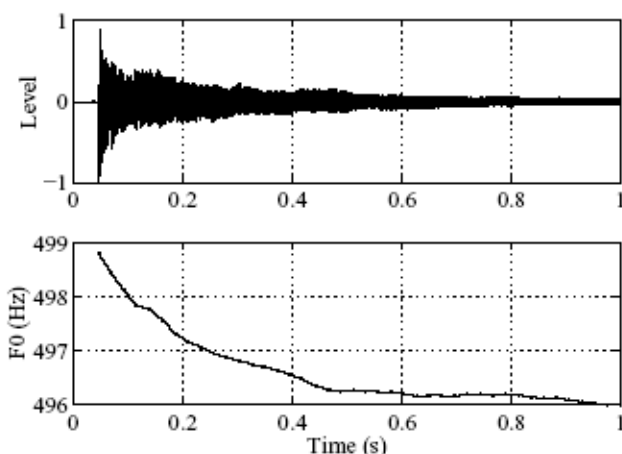


Abb. 9: oben: Wellenform eines Einzeltones auf der E-Gitarre

unten: Absinken der Frequenz mit fortschreitender Zeit.³¹

²⁹ vgl. Järveläinen/Välimäki 2001, S. 187

³⁰ Fletcher 1993

³¹ Järveläinen/Välimäki 2001, S. 187

Eigene Messungen an akustischen Gitarrentönen (siehe CD-Anhang: :\\Aufnahmen\\Savarez_Saiten) ergaben folgenden Verlauf³²:

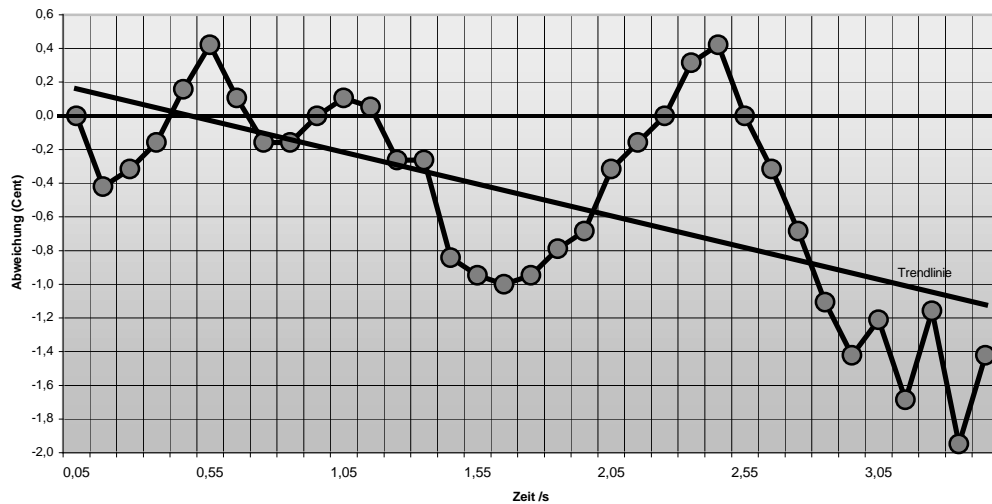


Abb. 10: Abweichungen der Frequenz im Laufe eines Gitarrentones ($e^1=328,84$ Hz)

Die Abb. 10 zeigt zwar eine fallende Tendenz an, allein die Größe dieses Effekts ist sehr schwach ausgeprägt (max. 2 Cent). Auch andere Lagen auf der Gitarre zeigten kein verstärktes Absinken der ursprünglichen Tonhöhe.

Dennoch, in Betrachtung all dieser Faktoren muss man ans Stimmen die Forderung stellen:

Vergleiche die gleichen Bereiche der Hüllkurve!

³² Die Fourier-Transformation wurde über Parabolische Interpolation durchgeführt, die Parameter der Frequenzanalyse mit Cool Edit Pro 2.0: FFT-Größe: 4096, Verfahren: Blackmann-Harris. Die gemessenen Daten sind im Anhang angeführt. Die Berechnung der Scheitelpunkte der Parabel erfolgte über <http://www.arndt-bruenner.de/mathe/10/parabeldurchdreipunkte.htm>

Dies begrenzt auch im selben Atemzug die Dauer des ersten angeschlagenen Tones: Lässt man Stimmtöne ausklingen, dauert es bis zum nächsten analogen Abschnitt des zweiten Tones zu lange und er hat seine Tonhöhe bereits dementsprechend stark geändert. Daher nachträglich die Ergänzung bezüglich der Tondauer:

Der Stimmtöne soll nicht länger als notwendig ausgehalten werden!³³

³³ Dies gilt nicht für Simultane Stimmungsmethoden (siehe Kap. 3.3.5)

2 Instrumentenbau

2.1 Saiten

Einen großen Einfluss auf saubere Intonation hat seit jeher das Saitenmaterial. Vor allem im Zeitalter der Darmsaiten waren Saiten der dominierende Fehlerfaktor. So beklagt sich z.B. LE BLANC 1740:

„zwei Saiten derselben Dicke, so klar wie Bergkristall, in der Bildung der Quinte ganz erheblich nach oben und unten voneinander abweichen.“³⁴

Darm hat vor allem den Nachteil, trotz optischer Gleichmäßigkeit in der Dichte stark zu variieren, d. h. eine Saite hat auf ihrer Länge eine ungleichmäßige Dichteverteilung. Auch quellen Darmsaiten bei Feuchtigkeit auf, wie es bei schwitzenden Händen, aber auch bei erhöhter Luftfeuchtigkeit der Fall ist.³⁵

1934 wurde die synthetische Kunstfaser Nylon erfunden und hielt berechtigterweise ihren Einzug in die Saitenindustrie. Die wesentlichen Vorteile sind die längere Lebensdauer, die stark verbesserte Homogenität des Materials und die weitgehende Unabhängigkeit von der Feuchtigkeit.

„Das seit 1938 [Anm.: 1939 von der Firma DuPont in den USA auf den Markt gebracht³⁶] erhältliche Nylon liefert Saiten ähnlicher Dicke und Stärke wie aus Darm, doch ohne die Unzulänglichkeiten eines Naturprodukts, wodurch die Auswahl zu einer beschwerlichen Angelegenheit werden kann. Nylon reißt auch weniger leicht, ist weniger anfällig gegen Feuchtigkeit und wird von den Fingerspitzen nicht so schnell aufgeraut.“³⁷

³⁴ Le Blanc 1740, S. 138 zit. nach: Lindley 1990, S. 14

³⁵ vgl. Baines 1996, S. 282

³⁶ vgl. <http://www.experimentalchemie.de/02-e-06.htm>

³⁷ Baines 1996, S. 282

Eine weitere Entwicklungsstufe sind „Multifilamente“ oder „Floss-Nylon“, das sind ultrafeine, zusammengeflochtene Nylonfäden.³⁸

„Seit einiger Zeit wird für sie auch Polyvinylidenfluorid (PVDF) benutzt, ein Material, das eine deutlich höhere Dichte als Nylon aufweist. Die Saiten sind daher bei gleicher Tonhöhe dünner und somit „lebendiger“ und reaktionsfreudiger (unter Gitarristen werden diese die PVDF-Saiten auch „Carbonsaiten“ genannt).“³⁹

Bei den umspinnenen Basssaiten bildet Nylon den Kern, der zu Erhöhung des spezifischen Gewichts (μ =Masse/Längeneinheit, wichtig für die Frequenz der Saite: $f=1/2L*\sqrt{(F/\mu)}$.) von einem Metalldraht umwickelt wird. Hier sind Stahldrähte mit verschiedenen Beschichtungen (elektrolytisch aufgetragen) aus Gold, Silber, Kupfer, Bronze u.a. erhältlich. Auch verschiedene Querschnitte des Umwicklungsdrahtes sind in Verwendung (round wounded, flat wounded, ground wounded).

Neben den Materialien spielt auch die Spannkraft eine Rolle (high/medium/low tension), da die Saite nahe der Festigkeitsgrenze am besten klingt.⁴⁰ Zur gängigen Praxis, bei neu aufgespannten Saiten gleich eine Terz höher anzuspinnen oder mit Kraft die Saite zu dehnen, möchte ich anmerken, dass man die ohnehin straff gespannten Saiten (s.o. ,6.5-7 kg Zugkraft⁴¹) überdehnen und ihnen irreparable Schäden zuführen könnte. Das elastische Verhalten⁴² eines Körpers gilt nämlich nur im elastischen Bereich (Hook´sches Gesetz).

Wichtig bei all dieser Vielfalt an Saiten ist für die vorliegende Arbeit die Stabilität der Tonhöhe. Sie ist dank der fortschrittlichen industriellen

³⁸ vgl. Pinksterboer 2000, S. 65

³⁹ http://de.wikibooks.org/wiki/Gitarre:_Saiten

⁴⁰ vgl. Baines 1996, S. 283

⁴¹ vgl. ebenda 1996, S. 283

⁴² *„Die Elastizität ist jene Eigenschaft eines Körpers seine ursprüngliche Form wieder anzunehmen, wenn die deformierende Kraftwirkung aufhört.“* (Jahnel 1977, S. 212)

Fertigungstechniken heute bereits in ausreichendem Maß gegeben. Eigene stichprobenartige Messungen unterschiedlicher Saiten/Marken/Materialien ergaben (nach Verstreichen eines Einschwingvorganges von 60 ms⁴³) eine sehr geringe Tonhöhen-Schwankungsbreite. Diese gleichmäßige Tonhöhe ist äußerst wichtig und hilfreich für den Stimmvorgang.

	Bruchdehnung/%	Zugfestigkeit kg/mm ²	Feuchtigkeits- Aufnahme bei 65% L.F.	Elastizitätsmodul kg/mm ²
Darm	14-16	32-46	10-15	550-650
Naturseide	16-18	37,1-57,5	15-25	500-600
Fortisan	7-8	65-75	2-3	1150-1250
Perlonarten	16-30	54,2-68,7	3-4	350-550
Nylonarten	20-25	61,5-78,7	3-4	450-550

Tabelle 2: Natur- und Kunststoff-Fasern im Vergleich⁴⁴

Trotz des technologischen Fortschrittes bei der Saitenherstellung findet man oft „kaputte“, fabrikneue Saiten. Die Fehler hierfür liegen oft am Material (Dichteschwankung durch Fehlstellen und Fremdatome im Material, Verletzungen der Gitterstruktur) in behaupteter Weise an der aufgewickelten Lagerung (Tröster-Saitensätze werden deshalb in länglicher Packung verkauft), und an der Abstimmungsproblematik eines bestimmten Saitentyps auf den Steg. Die letztgenannte Fehlerquelle wird im Kapitel 2.2.1 genauer erläutert.

In der Praxis testet der Gitarrist die Brauchbarkeit von Saiten mit dem Oktavabgleich am 12. Bund: Der gegriffene Ton am 12. Bund muss mit dem Oktav-Flageolett derselben Saite übereinstimmen.⁴⁵ Aus eigener Erfahrung ist bei einem neuen Saitensatz fast immer eine falsche bzw. gerade noch vertretbare Saite dabei. Diese „unsauberen“ Saiten sind es

⁴³ vgl. Meyer 1995, S. 1372

⁴⁴ Jahnel 1977, S. 221

⁴⁵ vgl. Klickstein 1993, S. 55

auch, die das Stimmen der Gitarre oft unmöglich machen. Da ist zum Einen die Leersaite mit den anderen Saiten stimmig, dafür aber gegriffene Töne unsauber. Eine gleichzeitige Richtigkeit aller Töne ist hier unmöglich und eine erträgliche Kompromisslösung notwendig. Perfektionisten können durch solche Unzulänglichkeiten zum Verzweifeln und aus der Konzentration gebracht werden, es empfiehlt sich - zumindest für musikalische Großereignisse – diese falschen Saiten zu ersetzen.

Grundsätzlich sollte man Saiten regelmäßig wechseln, da die Elastizität mit der Zeit nachlässt, die Bundstäbe durchs oftmalige Aufdrücken Schäden an der Saite (und somit an der regelmäßigen Dichte) herbeiführen. zusätzlich kann sich zwischen den Rillen der Bassumwicklung Rost und Schmutz anlagern, die Saite klingt dumpfer.⁴⁶

2.2 Griffbrett⁴⁷

Auf die gegebene Bundsetzung hat man als Instrumentalist keinen Einfluss. Eine ungenaue Bundsetzung kann allerdings das Stimmen zu einer unlösbaren Aufgabe machen. Als Musiker kann in diesem Fall nur auf die gewissenhafte Arbeit des Gitarrenbauers hoffen. Dieser versucht den Fehler so gering wie nur möglich zu machen, indem er für die Lage der Bundstäbe eine Sägeschablone verwendet, die in eine Sägelade eingeschoben wird. Die Einkerbungen der metallenen Schablone, die die Bundstäbe markieren, rasten in der Lade ein. Der Gitarrenbauer kann so Bundstabschlitzte punktgenau und auch in geeigneter Tiefe sägen. Zufällige Abweichungen vom theoretischen Wert werden also auf ein Minimum reduziert. Solche speziellen Sägeladen und Schablonen sind z.B. bei Steward McDonald mit unterschiedlichern Messuren erhältlich.

⁴⁶ vgl. Pinksterboer 2000, S. 67

⁴⁷ Für die breitwillige Beantwortung meiner Fragen zu den folgenden 3 Kapiteln bedanke ich mich besonders bei den Gitarrenbauern Lukas Giefing, Mario Gropp und Konrad Schwingenstein.

Historisch (und teilweise noch heute) benutzten viele Gitarrenbauer die sogenannten „18/17- Methode“ zur Bundstabberechnung: Die Saite wird in 18 gleiche Teile zerlegt und der 1. Bund am 17. Teilungsstrich eingesetzt. Die verbleibende Saite wird wieder in 18 gleiche Teile gegliedert u.s.w.. 18/17 ergibt als Wert 1,05882 was dem mathematisch berechneten gleichmäßig temperierten Halbton $^{12}\sqrt{2} = 1,05946$ sehr nahe kommt.⁴⁸ Zusätzlich waren früher die Bünde verschiebbar, da man nicht ins Holz geschlagene Metallstifte, sondern ums Griffbrett gewundene Darmbünde verwendete. So konnte der Musiker die Lage der Bünde selbst nachjustieren (vgl. Kap. 3.2.3).

Die Bundsetzung der Gitarre ist grundsätzlich für die temperierte Stimmung ausgelegt (s. Kap. 3.2.2.1). Zu berücksichtigen ist aber die geringfügige Spannungserhöhung, die beim Aufdrücken eines Fingers auftritt, weil dadurch die Saite zusätzlich etwas stärker gespannt wird ($f_n = n/2L \cdot \sqrt{(F/\mu)}$). Als Folge weicht auch der resultierende Ton vom angestrebten gleichmäßig temperierten ab. Dieser Fehler wird als „Hiatus“ bezeichnet und wird vom Gitarrenbauer am Steg berücksichtigt (s. Kap. 2.2.1).

Wie aus Abb. 11 ersichtlich spielen für die zusätzliche Saitenspannkraft F auch die Bundstabhöhe h_B , die Lage des Greifpunktes G am Bund, die Aufdrückkraft A und die Saitenlage h_S eine Rolle.

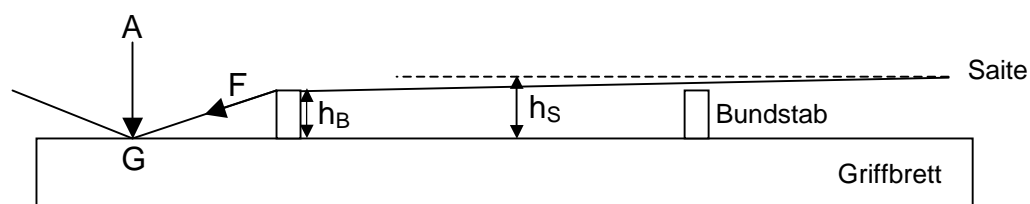


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Griffbretts von der Seite

⁴⁸vgl. Lindley 1990, S. 33

Nebensächlich ist der Einfluss der Bundstabhöhe, die gegeben und bei allen professionellen Instrumenten in etwa gleich ist.

Beim Greifpunkt G geht man vom Normalzustand, also vom letzten Bunddrittel, aus. Größere Auswirkungen hat da schon die Aufdrückkraft A, die Konsequenzen von zu starkem/schwachen Aufdrücken werden im Kapitel über unsauberen Fingeraufsatz (Kap. 2.3) noch näher erläutert.

Die Abhängigkeit vom Abstand der Saiten vom Griffbrett, der Saitenlage h_s ist zwar prinzipiell gering, schafft dennoch intonatorische Probleme, weil sie nicht über das ganze Griffbrett gleichmäßig hoch bleibt. Etwa 3 mm beträgt die Saitenlage am 12. Bund, sie nimmt Richtung Sattel auf ungefähr 1 mm ab. Obendrein schwankt die Saitenlage auch zwischen den einzelnen Saite. Der Gitarrenbauer kann über Stegkompensation zwar einen einzelnen Bund sauber intonieren⁴⁹, alle anderen sind allerdings fehlerbehaftet. Lösungsvorschläge⁵⁰ dazu gibt es kaum, der entstehende Fehler ist zugegebenermaßen auch recht gering und vernachlässigbar. Ein exotischer Lösungsansatz stellt das Griffbrett mit einzeln verschiebbaren, geteilten Bündeln z.B. vom Gitarrenbauer HERVÉ CHOUARD⁵¹ dar.

In den beiden folgenden Kapitel werden die Saitenbegrenzungen Steg und Sattel näher untersucht und Korrekturvarianten vorgestellt.

2.2.1 Steg

Wie im vorhergehenden Kapitel schon angedeutet, kann der Fehler, der durch das Aufdrücken eines Fingers entsteht, am Steg gemindert werden.

⁴⁹ Dies geschieht am 12. Bund mit dem sogenannten „Oktavabgleich“: der gegriffene Ton am 12. Bund muss mit dem Oktav-Flageolett zusammenstimmen.

⁵⁰ vgl. Stenzl 1997, S.14

⁵¹ vgl. www.chouard.de

Der Gitarrenbauer wirkt dieser Spannungserhöhung bautechnisch entgegen, indem er den Steg um 1 bis 2,5 Millimeter vom Schalloch weiter nach hinten verlegt und damit die schwingende Saitenlänge vergrößert.⁵² ($f_n = n/2L \cdot \sqrt{F/\mu}$). Die genaue Position erhält man, wenn man den gegriffenen 12. Bund der 1. Saite (mit der Bundstabschablone bereits fixiert) mit dem Oktav-Flageolett derselben Saite vergleicht. Der Steg wird nun solange verschoben, bis gegriffener Ton und Flageolett-Ton exakt übereinstimmen.

Bei den Basssaiten ist die Saitenlage wegen ihrer größeren Schwingungsamplitude größer als im Diskant. Eine erhöhte Saitenlage bewirkt auch eine größere Spannungserhöhung beim Aufdrücken (siehe Kap. 2.2), deshalb ist hier eine Kompensation besonders wichtig.⁵³

Im Unterschied zur idealen Saite besitzen reale Saiten eine gewisse Steifigkeit. Diese Eigenschaft verursacht auch die Inharmonizität der Teiltöne, wie bereits in Kap. 1.1.2 besprochen.

Der Mangel an Elastizität hat an den Rändern Steg und Sattel (bzw. bei gegriffen Tönen der Bundstab) die Auswirkung, dass die Saite nicht ganz bis zur jeweiligen Begrenzung schwingt. Da die Länge der schwingenden Saite indirekt proportional zur Tonhöhe ist ($f_1 \sim c/2L$, siehe Gl. 2), wird der Ton durch diesen Effekt höher als es die idealisierte Berechnung ergäbe.

Zur Korrektur verlängert der Gitarrenbauer nochmals zusätzlich die Mensur, indem er den Steg etwas vom Schalloch entfernt.

Dabei hat jede Saiten eine unterschiedliche Steifigkeit, ihre Abhängigkeit von den Parametern Radius, E-Modul und Spannkraft wurde im Kap. 1.1.2 analysiert (Gl 6). Es sind unterschiedliche Mensurverlängerungen notwendig. Einige Konzepte, die dies beachten, werden in den Abbildungen 12- 14 vorgestellt:

⁵² Der entstehende Effekt berechnet sich auf 2,7 bis 6,6 Cent Erniedrigung der Tonhöhe ohne Kompensation.

⁵³ vgl. Jahnel 1977, S. 153

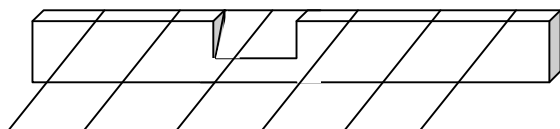


Abbildung 12: unterbrochener Steg mit Rücksicht auf die 3. Saite. In seltenen Fällen sogar mit mehreren Abstufungen.

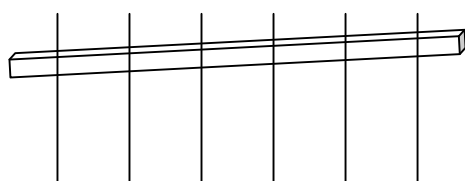


Abbildung 13: Schräger Steg
(z.B. Giefing-Gitarren) Zwischen 1. und 6. Saite ist ein Unterschied von 1,5mm (entspricht -4 Cent).

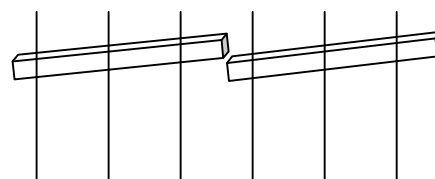


Abbildung 14: Schräge, zweiteilige Steg-Konstruktion
(z.B. Gropp-Gitarren)

Allgemein findet man derartige Steg-Korrekturen äußerst selten, unter ihnen bevorzugt die Konstruktion mit gebrochenem Steg (Abb.12). Diese ist auch nachträglich ohne gitarrenbauliche Veränderung einsetzbar. Das Umrüsten des Steges auf diese einfache Variante möchte ich an dieser Stelle allen Gitarristen empfehlen.

Eine weitere Variable stellt die Unterschiedlichkeit der zahlreichen Saitensätze verschiedener Materialien, Dicken, Hersteller u.v.m. dar. Die Stegkompensation ist also stets ein Näherungsverfahren und müsste bei jedem Saitenwechsel neu justiert werden (wie es bei der E-Gitarre über die sog. „Stegreiter“ möglich ist).

2.2.2 Sattel

Die korrigierenden Vorkehrungen am Steg begründen sich durch die Erhöhung der Seitenspannung beim Greifen. Eben diese fällt allerdings beim Spielen einer leeren (=ungegriffene) Saite weg. Der Ton klingt dadurch zu tief, weil die Greifspannung am Steg bereits kompensiert wurde.

Als Korrektur kann man nun den Sattel als Ganzes näher zum 1. Bund rücken bzw. eine Sattelbeilage am Sattel ankleben. Für die gegriffenen Töne hat diese Konstruktion keine Auswirkung, es beeinflusst lediglich die Tonhöhe der leeren Saiten. Die Saitenlänge wird durch sie verkürzt, der Ton klingt im gleichen Maß höher, als wenn er gegriffen worden wäre.⁵⁴

Die Sattelkompensation muss schon vor dem Oktavabgleich montiert sein, da das Oktav-Flageolett als Quasi-Leersaite zum Einrichten des Steges dient.

Im praktischen Fall wird die richtige Abstimmung recht komplex, da ähnlich wie bei der Stegkompensation das Dehnungsverhalten der unterschiedlichen Saitenmarken und -typen einget. Sattelkompensationen sind auf Konzertgitarren äußerst selten zu finden, die Abweichungen sind bei Nylonsaiten kaum in Rechnung zu stellen. Auf Stahlsaitengitarren empfiehlt sich jedoch wegen des steiferen Saitenmaterials eine Kompensation. Verwendete Konstruktionen zeigen die Abbildungen 15 und 16.

⁵⁴vgl. Schwingenstein, http://www.pepiderzweite.de/pageID_721093.html

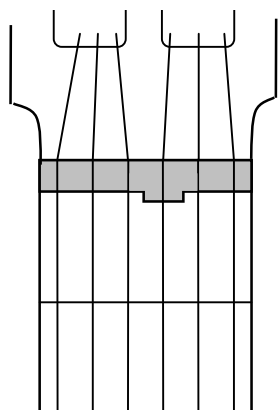


Abbildung 15:
Sattelkompensation für die 3.
Saite

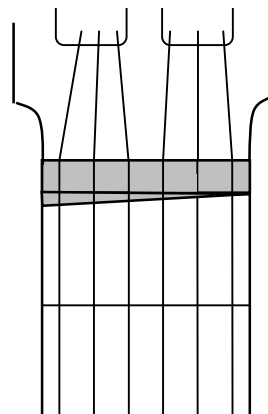


Abbildung16: Keilförmige
Sattelkompensation

2.2.3 Mechanik

Eine leichtgängige Mechanik hilft beim Stimmen ungemein. Es nützt nämlich wenig, ein sehr feines Gehör zu besitzen, wenn die Mechanik sprunghafte Ruckungen mit Abstufungen von mehreren Cent vollführt. Eine wichtige Maßzahl ist auch die Übersetzung der Gewinde: 10:1 bedeutet 10 Umdrehungen des Mechanikkopfes für eine Umdrehung des Wirbels. Mit 14:1 oder 16:1 wird die Quantisierung der Stimmungsschritte sogar noch kleiner.⁵⁵

Das Drehen am Stimmwirbel sollte auch sofort eine proportionale Veränderung der Saitenspannung bewirken und nicht erst nach vollendetem Stimmvorgang während des Spielens auftreten. Oft liegt die Ursache gar nicht bei der Stimmmechanik, sondern am Sattel: Macht die Saite einen zu extremen Knick an der Sattelaufgabe, kann sie nicht ungehindert hin und her gleiten. Die Spannungsänderung vom Wirbel bis zum Sattel kann dann nicht stufenlos auf die restliche Saite weitergegeben werden. Besonders anfällig sind die rauen Bass-Saiten. Beim Stimmen

⁵⁵ vgl. Pinksterboer: 2000, S.49

hört man bei diesen oft ein kurzes Knacksen, immer dann, wenn sich die Saite um eine oder mehrere Rillen der Metalldrahtumwicklungen weiterbewegt.

Der Gitarrist kann dies einigermaßen verhindern, indem er die Auflagefläche „schmiert“: In die Sattelfugen etwas Graphit (z.B. von einem Bleistift abschaben) einstreuen, vermindert die Reibung zwischen Saite/Auflage.⁵⁶

Auch die Mechanik selbst sollte man hin und wieder etwas ölen, und sollten die Kontaktstellen Holz/Wirbel beim Drehen knarren hilft Hirschtalg⁵⁷ (dazu muss allerdings die Mechanik abgeschraubt werden).

2.3 Unsauberer Fingeraufsatz

Das Greifen eines Tones erhöht die Spannung und damit den Ton. Grundsätzlich wird dieser Hiatus ja durch die Stegversetzung abgefangen (s. Kap. 2.2.1), das gilt aber nur für eine ganz bestimmte Abdrückkraft des Fingers. Alle zu stark gedrückten Töne sind zu hoch, zu leicht gegriffene zu tief.

Ebenso verfälscht ein Verziehen der Saiten beim Greifen die Tonhöhe, quasi ein unbeabsichtigtes Bending. In der Saitenmitte (also in höheren Lagen) benötigt man zum transversalen Auslenken (=Bewegung normal zur Saite) der Saite am wenigsten Kraft, deshalb ist dort besondere Vorsicht geboten. Gefährdet sind auch Griffe mit mehreren Fingern oder weite Streckungen.

Ebenfalls zu vermeiden sind „Stauchungen“ und „Streckungen“ der Saite: Ein gegriffener Bund kann durch ein Ziehen des Greiffingers in Richtung Schalloch entspannt, also die Saite gestaucht werden und der Ton wird tiefer. Dasselbe gilt auch in die Gegenrichtung, bei der sich der

⁵⁶ Ich danke dem Konzertgitarristen Johannes Tonio Kreusch für diesen Tipp.

⁵⁷ Ich danke dem Mechanikenschlosser Sepp Reischl für diesen Tipp.

Ton erhöht. Dieser Fehler passiert bevorzugt bei großen Fingerstreckungen. Den höherbündigen Finger zieht es dabei in Richtung des niederbündigen und umgekehrt, das heißt, einer macht eine Streckung, der andere eine Stauchung, die Fehler addieren sich!

Prinzipiell ist also beim Stimmen mit gegriffenen Tönen (z. B. 5.-Bund-Methode, s. Kap. 3.3.1) also auf einen sauberen Fingeraufsatz zu achten.

3 Stimmungsmethoden

3.1 Stimmtton

„Als Stimmtton bezeichnet man im allgemeinen einen durch eine festgelegte Frequenz definierter Ton, nach dem Instrumente gestimmt werden“⁵⁸

Bei der internationalen Stimmttonkonferenz 1939 in London wurde als einheitlicher Kammerton das a^1 mit 440 Hz (bei 20°C) als Standard festgesetzt.⁵⁹ Auf der Gitarre ist es allerdings üblich, etwas höher, nämlich auf 442 oder 443 Hz einzustimmen. Das hat den Vorteil, dass der Ton wegen der erhöhten Saitenspannung brillanter und strahlender wird. Vorsichtig muss man im Zusammenspiel mit anderen Instrumenten sein und sich an „unstimmbaren“ Instrumenten orientieren (Akkordeon, Orgel, Klavier, usw.).

*„Die Stimmgabel ist mit 440 Hertz zwar noch immer in Gebrauch, doch pflegen Orchestermusiker in höherer Stimmung zu spielen. Mit Rücksicht auf Idiophone wie Xylophon oder Celesta hat z.B. die Kunstuniversität Graz schon vor Jahren das a' mit **443 Hz** verbindlich festgelegt“⁶⁰*

Prinzipiell kann man sich von jedem Instrument einen Stimmtton (Referenzton) angeben lassen, manche eignen sich jedoch besser als andere. Deshalb werden im Nachfolgenden einige Anforderungen an unseren Referenzton gestellt.

Allgemein ist festzustellen, dass zwei Töne am besten vergleichbar sind, wenn sich deren Klangspektrum ähnelt.⁶¹ Die Abhängigkeit der

⁵⁸ vgl. Haynes 1998, S.1813

⁵⁹ vgl. <http://www.musica.at/musiklehre/gesamt.htm>

⁶⁰ Witoszynskyj 2003, S. 137

⁶¹ vgl. Geller 1997 S. 30

subjektiven Tonhöhenempfindung vom Obertonspektrum hat bereits das Kap. 1.3.3 gezeigt. Bei verschiedenen Klangfarben bewertet unser Gehör dieselbe Grundfrequenz unterschiedlich hoch. Welche Teiltöne im Besonderen hervortreten ist vom Anregungsmechanismus abhängig. Welche Teiltöne dann in welcher Stärke tatsächlich unser Ohr erreichen, liegt im Wesentlichen am Resonanzkörper des jeweiligen Instrumentes.

Ein ganz wichtiges Kriterium für einen Stimmtone ist seine Stabilität. Das Frequenzband sollte relativ schmal sein, im Idealfall nur aus einer Linie, d. h. aus einer einzelnen Frequenz (bzw. einer harmonischen Reihe über einer Grundfrequenz f_1) bestehen. Schwankungen um die zentrale Frequenz müssen nach Möglichkeit vermieden werden, Vibratos sind demnach völlig kontraproduktiv.

Stimmgabel: Sie hat den Vorteil, sehr frequenzstabil zu sein und besitzt, wenn man den Stimmgabelkopf auf die Decke setzt, auch noch den gleichen Resonanzkörper. Ein Nachteil ist aber das sinustonähnliche Klangspektrum. Experimentelle Untersuchungen zeigen wesentlich schlechtere Frequenzunterscheidungsschwellen für Sinustöne im Vergleich zu echten Instrumentaltönen.⁶² Aus eben genanntem Grund ist auch das Stimmen nach Frequenzgeneratoren (z.B. Stimmtone eines Taktgerätes) für Kammermusik abzuraten. Für das Einstellen einer gewünschten Frequenz (z.B. 442 Hz) sind sie unverzichtbar, doch zum Weitergeben an andere Instrumente ist ein Instrumentalklang vorzuziehen. Abgesehen davon gibt es kaum Stimmgabeln außerhalb der Norm von 440 Hz, was dem Ton a^1 auf dem 5. Bund der e^1 -Saite entspricht. Der Tonvergleich bringt in dieser Lage ein praktisches Problem mit sich, nämlich mit der linken Hand den Ton zu greifen, während die Rechte die Stimmgabel auf den Steg setzen (harte Materialien → keine Verletzung der Decke!) und gleichzeitig anzupfen muss. Auch der Vergleich mit der

⁶² vgl. Warnke 1976, S. 89

leeren A-Saite ist wegen des 2-Oktavenabstandes nicht optimal (vgl. Kap. 1.2).

Stimmpfeife, Blasinstrumente: Durch den völlig unterschiedlichen Anregungsmechanismus haben die Blasinstrumente ein ganz anderes Obertonspektrum als die Gitarre. Zusätzlich ist ein „Warmblasen“ zu berücksichtigen, das heißt eine Frequenzerhöhung, bis die Temperatur im Rohrinne Spieltemperatur (= etwa Körpertemperatur) erreicht hat ($c = \lambda \cdot f$; die Schallgeschwindigkeit c ist temperaturabhängig). Die Frequenzstabilität ist also verringert, zusätzlich schwankt die Tonhöhe durch den Lippenansatz.

Deshalb sind Stimmpfeife und Blasinstrumente nur bedingt als Referenzton für die Gitarre geeignet.

Saiteninstrumente: durch einen ähnlichen Schwingungsmechanismus sind die Klangspektren zum Vergleichen besser geeignet als mit Bläsern.

Vom Klavier lässt man sich am besten ein e^1 geben und vergleicht es mit der 1. Saite.

Bundlose Saiteninstrumente müssen aus fehlerminimierender Sicht eine Leersaite spielen, da jedes Greifen bereits eine mögliche Fehlerquelle sein kann. Aber auch Bundinstrumente sind vor diesen Fehlern nicht ganz gefeit (vgl. Kap. 2.3).

Es ist besser, die Gitarre nach dem Streichinstrument zu stimmen und nicht umgekehrt, da die Streicher eine klanglich lange stationäre Phase, den Sustain, besitzen. Die Gitarre hat als Zupfinstrument einen so kurzlebigen Ton, dass sich keine konstante Sustainphase ausbilden kann, nach dem Einschwingvorgang folgt gleich der Ausschwingvorgang. Es ist einsichtig, dass es wesentlich leichter für den Gitarristen ist, nach einem lang gleichbleibenden Ton richtig zu stimmen, als ein Streicher nach einem ungewohnt kurzen Einschwing-/Ausschwinggemisch.

Am besten ist jedoch die Stimmung nach einer anderen Gitarre, denn hier ist das Teiltonspektrum nahezu identisch.

3.2 Das richtige Temperatursystem

Bevor wir zu den einzelnen Stimmungsmethoden übergehen, bleibt zu klären, was man unter „richtig gestimmt“ verstehen darf. Dazu werden die wichtigsten Temperatursysteme kurz erklärt auf ihre Übertragbarkeit auf die Gitarre untersucht.

„Temperatur: Bezeichnung für Systeme, die angewandt werden, um die Intervalle innerhalb einer Oktave festzulegen.“⁶³

3.2.1 Reine Stimmung

Die Intervalle der Reinen Stimmung basieren auf den einfachen Frequenzverhältnissen der Teiltonreihe (vgl. Kap. 1.1.1), oft auch als „natürliche Stimmung, harmonische Tonskala oder mathematische Tonreihe“ bezeichnet.

	C	D	E	F	G	A	H	C
Verhältnis zu C:	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
Intervallverhältnis:		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15 ⁶⁴

Abb. 17: Frequenzverhältnisse zwischen den einzelnen Noten in der reinen Stimmung

Die reine Skala macht einen Unterschied zwischen den Ganztönen, und zwar den großen Ganzton, wo die benachbarten Töne in einem Frequenzverhältnis von 9/8 stehen, und den kleinen Ganzton (10/9). Auf einem Bundinstrument ist die Umsetzung zweier unterschiedlicher Ganztöne unmöglich, man versuche z.B. nur D-Dur in einer auf C rein

⁶³ Baines 1996, S. 324

⁶⁴ nach: Rossing 1983, S.155

abgestimmten Saite (siehe Abb. 17) zu spielen: schon der erste Ganztonschritt (D-E) ist zu klein (nämlich $10/9$ statt $9/8$). Es wären für jeden Bund zwei verschiedene Bundstäbe nötig. Das ist nur einer der Gründe, warum die reine Stimmung auf der Gitarre nicht anwendbar ist.

Für die Gitarre als gleichmäßig temperiertes Bundinstrument (vgl. Kap. 3.2.2) ist die reine Stimmung insofern wichtig, als die Flageolett-Töne (die ja nicht von der Bundeinteilung abhängen) reine Intervalle sind:

1. Oberton (12. Bund) = Oktav-Flageolett,
2. Oberton (7. Bund) = „Quint-Flageolett“ (eigentlich Duodezim-Flageolett),
3. Oberton (5. Bund) = Doppeloktav-Flageolett.

(Die Frequenzen für diese Flageoletts auf der Gitarre sind in Anhang, Tabelle 9, aufgelistet.)

3.2.2 Gleichmäßig temperierte Stimmung

Die gleichmäßig temperierte Stimmung (auch gleichschwebend oder gleichstufig temperiert genannt) teilt die Oktave in 12 gleich große Halbtonschritte. Diese mathematische Einteilung stimmt nicht mit der natürlichen Obertonreihe überein, weshalb alle temperierten Intervalle von der Reinen Stimmung abweichen (Ausnahme sind Oktaven, von denen man ja per Definition ausgeht).

Musikalische Intervalle stellt man mathematisch durch Frequenzverhältnisse dar, so entspricht z.B. eine Oktave einem Frequenzverhältnis von 1:2, eine Quinte 2:3. Weil die Darstellung mit der logarithmischen Einheit Hertz wenig anschaulich ist, wurde die Einheit Cent eingeführt. Hier dürfen Intervalle in Cent ganz einfach addiert und subtrahiert werden (anstatt Frequenzverhältnisse in Hertz zu multiplizieren und dividieren).

Die Umrechnung von Hertz (Hz) in Cent (C) erfolgt über die Formel⁶⁵:

$$[\text{Gl 7}] \quad x \text{ (in Cent)} = \frac{1200 \cdot \log(f_1/f_2)}{\log 2}$$

bzw. umgekehrt von Cent auf Hertz:

$$[\text{Gl 8}] \quad f_1/f_2 = 2^{x/1200}$$

Mit Hilfe der Gl. 7 erhalten wir 1 Oktave = 1200 Cent. Diese wird von der gleichmäßig temperierten Stimmung in 12 gleich große Halbtöne eingeteilt, mit der Cent-Rechnung also $1200:12= 100$ Cent.⁶⁶ Ein gleichmäßig temperierter Halbton entspricht somit 100 Cent, eine gleichmäßig temperierte Quinte (=7 Halbtöne) = 700 Cent usw.

Tabelle 8 im Anhang zeigt einen Vergleich zwischen reinem und gleichmäßig temperiertem System. Hier sieht man, dass die gleichmäßig temperierten Quinten um nur 2 Cent von der reinen Stimmung abweichen, die großen Terzen allerdings wesentlich (um 13,7 Cent) zu hoch sind.

Aus musikästhetischer Sicht waren vor allem diese „unsauberen“ Terzen lange Zeit nicht vertretbar und man entwickelte eine Vielzahl an unterschiedlichen Temperatursystemen (z.B. Mitteltönig, $\frac{1}{4}$ -Tonkomma, Werkmeister, Kirnberger, u.v.m.), wo eine Reinheit der Terzen angestrebt wurde, ohne gleichzeitig die Quinten zu sehr zu verschlechtern. Als Folge klingen einige Tonarten sehr gut (haben reine Dreiklänge), im Quintenzirkel weit entfernte werden allerdings unbrauchbar.

⁶⁵ zur Centrechnung vgl. Frosch 1993, S. 35ff

⁶⁶ Mit der Einheit Hertz wäre der Berechnungsvorgang folgender: Oktave = $f_2/f_1=2$. Ein Halbton entspreche dem Frequenzverhältnis f_4/f_3 , das als y definiert sei. Um von der Anfangsfrequenz f_1 einen Halbton höher zu kommen multipliziert(!) man f_1 mit dem Halbtonverhältnis y . Für eine Oktave benötigt man 12 Halbtonschritte, daher ergibt sich $f_2=f_1 \cdot y^{12}$. Dividieren durch f_1 und 12.-Wurzelziehen $\rightarrow y= \sqrt[12]{(f_2/f_1)} = \sqrt[12]{2} = 1,059463$.

Vor allem Komponisten der Romantik haben die unterschiedlichen Dreiklangsqualitäten als Tonartencharakteristik ausgenutzt, um Affekte und Gefühle harmonisch zu verdeutlichen. Mit der Zeit wurden die harmonischen Fortschreitungen immer progressiver, Modulationen in weit entfernte Tonarten häufiger. Hier liegt der große Vorteil der gleichmäßig temperierten Stimmung: alle Tonarten klingen gleichmäßig gut, es gibt keine „unbrauchbaren“ Dreiklänge mehr.

Heutzutage schreiben Komponisten generell in der gleichmäßig temperierten Stimmung.

Die originale Gitarrenliteratur beginnt erst richtig in der Klassik, die Werke aus der Renaissance und dem Barock für gitarrenähnliche Instrumente wie etwa Laute, Vihuela, Theorbe wurden schnell ins Gitarrenrepertoire aufgenommen. Aus diesem Grund interessiert uns auch die Temperatur eben dieser Gitarren-„Verwandten“.

„Die meisten Theoretiker zwischen 1550 und 1650 betrachten die Lauten und Gamben als Instrumente mit gleichschwebender Stimmung.“⁶⁷

Das „Handicap“ der gleichmäßig temperierten Stimmung war aber den Komponisten stets bewusst, wenn sie Stücke für Bundinstrumente geschrieben haben. Zahlreiche musiktheoretische Schriften belegen dies.⁶⁸

„Von ihrer Erfindung bis heute wurden Gamben und Lauten immer mit einer Skaleneinteilung in gleiche Halbtöne gespielt.“⁶⁹

Die Gitarrenliteratur ist und war also stets für die gleichmäßig temperierte Stimmung gedacht.

⁶⁷ Lindley 1990, S. 31

⁶⁸ vgl. ebenda, S. 10

⁶⁹ Vincentino, fol. 146v (zitiert nach: Lindley 1990, S. 35)

3.2.3 Ungleichmäßig temperierte Stimmungen⁷⁰

Der Begriff „ungleichmäßig temperierte Stimmung“ wird zusammenfassend für alle anderen Temperaturen wie z.B. Mitteltönig, Wohltemperiert, Pythagoräisch usw. festgesetzt. Ungleichmäßig deshalb, weil die Halbtonschritte all dieser Stimmungen nicht gleichmäßig groß sind.

Die Bundsetzung der Gitarre ist grundsätzlich auf die gleichmäßig temperierte Stimmung festgelegt (s. Kap. 3.2.2), dennoch gibt es Kompositionen, die für andere Stimmungssysteme ausgelegt sind. Dazu zählt vor allem die Kammermusik mit Instrumenten, die sehr wohl eine andere Temperatur wählen konnten und bestimmt auch taten, da die gleichmäßige Temperatur als unbefriedigender Kompromiss galt. MERSENNE schreibt 1637 in seinem Werk „Harmonie universelle“ im Zusammenhang mit der gleichmäßigen Stimmung:

“[... nach dem Sprichwort der Musiker ist die Laute der Scharlatan der Musik, weil sie als gut durchgehen läßt, was schlecht ist auf guten Instrumenten...]“⁷¹

Dennoch war der Einsatz dieser „schlechten“ Bundinstrumente wie Laute, Theorbe oder Chitarrone im Generalbasszeitalter als Basso continuo –Instrument eine häufige Praxis. MICHAEL PRAETORIUS spricht vom „Geben und Nehmen“ der Saiten, um die Töne an die jeweilige ungleichmäßig temperierte Stimmung anzugleichen. Durch kleine Druckänderung beim Greifen sollten besonders störende Töne (v.a. die Terzen) ausgeglichen werden. Auch der Theoretiker GIOSEFFO ZARLINO schreibt 1588:

⁷⁰ vgl. Lindley 1990, S. 14-18, 58-73

⁷¹ Mersenne, 1637, S. 20(zit. nach: Lindley 1990, S.60)

„Wenn das Ohr dessen, der die Laute oder die Viola mit Bündeln spielt, bemerkt, dass die Intervalle nicht stimmen, ändert er sofort mit dem Finger die Saiten, die er spielt – was eine Kleinigkeit für ihn ist (sofern er auf solchen Instrumenten erfahren ist), es (sic) sogleich ein wenig höher oder niedriger zu machen;“⁷²

Die Laute hat in der Tat zwei Korrekturmöglichkeiten, die der klassischen Gitarre nur zum Teil bzw. gar nicht zur Verfügung stehen:

- 1.) Die Laute hat eine viel geringere Saitenspannung als die Gitarre. Das Verziehen der Saiten ist dadurch wesentlich leichter zu bewerkstelligen (gleich wie bei E-Gitarre: „Bendings“).
- 2.) Die Bünde werden bei den Lauten nicht ins Griffbrett geschlagen, sondern – daher auch der Name – mit Darm ums Griffbrett abgebunden. Das ermöglicht dem Musiker ein Verschieben der Bünde innerhalb gewisser Grenzen. Man kann dadurch zwar keine wohltemperierten Stimmungen zaubern, aber immerhin wichtige Töne tendenziell verbessern.

Allzu optimistisch darf diese Anpassungsmöglichkeiten allerdings nicht betrachtet werden, wie man an Aussagen mehrere Theoretiker und Musiker der Zeit herausliest:

„Größere Lust zu lachen hatte ich selten wie da, als ich sah, wie Musiker sich bemühten, eine Gambe oder eine Laute mit einem Tasteninstrument gut in Übereinstimmung zu bringen. Bis heute blieb diese höchst wichtige Sache ohne Beachtung und, wenn sie bemerkt wurde, ungelöst.“⁷³

Es gibt auch eine kleine Anzahl an originaler „gitarristischer“ Sololiteratur, die für mitteltönige Stimmungen geschrieben wurde. Dazu zählen sämtliche Werke von Arnold Schlick und Luiz Milan. Indizien dafür

⁷² Le Blanc 1740, S. 138 (zit. nach: Lindley S.14)

⁷³ Mersenne 1637, S. 20(zit. nach Lindley: S.60)

sind in den Tabulaturen versteckt, überall dort, wo der Komponist einen enharmonisch gleichen Ton auf zwei unterschiedlichen Saiten spielen lässt, obwohl es technisch dadurch anspruchsvoller wird. Das bedeutet nämlich, dass der Komponist sehr wohl zwischen einem chromatischen und einem diatonischen Halbton unterscheidet.⁷⁴

Der weitaus überwiegende Teil der Gitarrenliteratur darf aber als gleichmäßig temperiert angesehen werden.

Mittlerweile gibt es auch Griffbretter mit gebrochenen Bundstäben, wo man für jede Saite die Position der einzelnen Bünde unabhängig voneinander verstellen kann. Diese Griffbretter sind allerdings eine Erfindung unseres Jahrhunderts und entsprechen demnach nicht den historischen Bundinstrumenten, die ja gleichmäßig temperiert waren. Die Möglichkeit von unterbrochenen Bündeln wurde nicht realisiert, aber zumindest angedacht:

„...und daß er stattdessen versuchen sollte, die Laute und die Gambe zu vervollkommen, indem er einen Weg finde, deren Halbtöne als große und kleine einzurichten, wie wir sie auf dem Cembalo haben, was nicht mit den gebundenen Bündeln, mit denen man die Laute spielt, möglich ist, weil diese wechselnd angeordnet werden müßten, was nur mit dem Mittel von Elfenbeinbünden erreicht werden kann.“⁷⁵

Genauerer Betrachtung wären die Lautensuiten J.S. Bachs wert, doch würde das den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Zweifellos war er sich der Gleichmäßigen Temperiertheit der Lauten bewusst, jedoch ist ungesichert, ob die Lautensuiten überhaupt für Laute gedacht waren (z. B. BWV 996 für Lautenwerk?).

⁷⁴ vgl. Lindley 1990, S. 67-75

⁷⁵ Denis 1650, S. 12 (zitiert nach Lindley 1990, S. 62f)

3.3 Stimmungsmethoden

Nachdem nun die theoretischen Voraussetzungen für das Stimmen der Gitarre geklärt sind, werden im Folgenden die gebräuchlichsten Stimmungsmethoden vorgestellt und kritisch beleuchtet. Im Zuge des Hörversuches wurden die Versuchspersonen auch nach ihrer bevorzugten Vorgangsweise befragt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.3.2 aufgelistet.

3.3.1 5. Bund-Methode

Sie ist die am meisten verbreitete Methode, Gitarren zu stimmen. FERDINAND CARULLI schreibt in seiner Gitarrenschule:

„Man stimme nach der Stimmgabel oder einem darnach richtig gestimmten Instrumente die 5. Saite in a, setze dann einen Finger fest an den 5. Bund dieser Saite, welche nun das d angibt, mit welchem die vierte Saite in Einklang zu stimmen ist. Hierauf setzt man den 5. Bund dieser vierten Saite, welche nun g angibt, darnach bringt man die dritte Saite in Einklang. Der 4. Bund der dritten Saite gibt sodann h, wonach man die zweite Saite stimmt. Der 5. Bund der zweiten Saite gibt e, mit welchem die 1. Saite in Einklang gestimmt wird. Die sechste (tiefste) Saite stimmt man nun leer mit der 1. Saite, jedoch zwei Octaven tiefer.“⁷⁶

Diese Art zu stimmen ist sehr leicht erlernbar, einfach ausführbar und benötigt keine theoretischen Korrekturen wie andere Stimmungsmethoden. Deshalb wird sie zu Recht auch an Musikschulen unterrichtet.

Vorausgeschickt sei - auch für alle nachfolgenden Methoden -, dass es hilfreich ist, Saiten, die nicht am Stimmvorgang beteiligt sind,

⁷⁶ Carulli, S.8f

abzudämpfen. Diese werden durch Resonanz zum Mitschwingen angeregt und stören den Stimmvorgang unnötig, indem sie den Vergleichston verdecken. Vor allem die leicht anzuregenden Bass-Saiten schwingen gern mit.

Nachteile der 5. Bund-Methode:

Sukzessive Fehlersummutation: Oft stimmt man von der 1. Leersaite weg und geht schrittweise bis zur 6. Saite, oder wie CARULLI es vorschlägt von der 5. zur 1. Saite und anschließend die 6. Saite unisono. Macht man einen Fehler immer in eine bestimmte Richtung, dann setzt sich dieser Fehler bei jedem Stimmvorgang vor und addiert sich bis zur letzten Saite zum 5-fachen Gesamtfehler. Zur Verbesserung empfiehlt es sich daher, Oktavvergleiche⁷⁷ anzustellen (z.B. $e^1 - e - E$) bzw. wie CARULLI zu kontrollieren:

„Um zu prüfen, ob man die Guitarre richtig gestimmt hat, greife man dann im 5. Bund auf dieser 6. Saite, wo der Ton A liegt, welcher, wenn man das Instrument genau gestimmt hat, im Einklang mit der 5. Saite sein muß.“⁷⁸

Ein weiterer Nachteil ergibt sich in tiefen Lagen wegen des ungünstigen Hörbereichs (vgl. Kap. 1.2): Der gerade noch hörbare Frequenzunterschied (jndF) im Frequenzbereich der A-Saite beträgt für Sinustöne laut Tabelle 1 über 40 Cent!

Zusätzlich ist auch auf einen sauberen Fingeraufsatz zu achten, was bei Anfänger nicht immer selbstverständlich ist. In dieser Hinsicht besonders gefährdet sind wegen der geringen Saitenspannung E-Gitarristen und Lautenisten.

⁷⁷ Eine ausgefeiltere Variante ist das Stimmen nach Oktaven, wie sie in Kap. 4.3.2 nachträglich erklärt wird. Das Prinzip ist gleich dem der 5.-Bund-Methode, allerdings wird nicht der Einklang, sondern die Oktave verglichen.

⁷⁸ Carulli, S.8f

3.3.2 Quartenstimmung

„Die Gitarre ist nach reinen Quarten gestimmt, ausgenommen die zweite Saite, die in eine grosse Terz mit der dritten gestimmt wird. Die beste Art ist (wie bei der Violine) die leeren Saiten nach dem Gehör zu stimmen. Diese jedoch lässt sich nicht jedermann beschreiben, deshalb mag die folgende [Anm.: 5. Bund-Methode, Zitat siehe Kap. 3.3.1] für diejenigen dienen, welche die erstere noch nicht anwenden können.“⁷⁹

Quarten (bzw. Quinten als Komplementärintervall) besitzen viele gemeinsame Obertöne zwischen denen sich bei Verstimmung Schwebungen auftreten. Diese kann man zu Stimmen verwenden wie im Kap. 3.3.5 beschrieben wird. Die gleichmäßig temperierte Quart ist nur um 2 Cent tiefer als in der Reinen Stimmung, deshalb kann man es im ersten Schritt vertreten, sie schwebungsfrei zu machen.

Man geht von der leeren e^1 –Saite aus und vergleicht sie mit der leeren A-Saite. Dabei stimmt der 2. Oberton (= Oktave + Quinte = e^1) genau mit der e^1 –Saite überein. Mit etwas Übung lassen sich sehr reine Quinten bzw. Quarten intonieren. Der systematische Fehler beträgt dabei, wie schon erwähnt, 2 Cent.

Anschließend vergleicht man e^1 mit der E- Saite. Diese tiefe Tonhöhe ist ungünstig bezüglich der Frequenzunterscheidungsschwelle (Kap. 1.2). Zur Kontrolle kann man die Quart E-A mit Leersaiten heranziehen.

Von der A-Saite geht es in Quarten aufwärts zum d (4. Saite), von dort in gleicher Weise zum g (3. Saite). Zwischen 3. und 2. Saite liegt eine große Terz, deshalb vergleicht man die h-Saite am besten mit dem fixierten e^1 . Kontrollieren kann man das Ergebnis mit dem Vergleich E-h.

Alles in allem ist diese Stimmungsmethode nach Quarten sehr vielen Unsicherheitsfaktoren unterworfen. Da ist zum Einen der ungünstige Hörbereich zu nennen, das Aufsummieren der Fehler durchs Weiterstimmen mit fehlerbehafteten Tönen. Zum Anderen ist die

⁷⁹ Carulli, S. 8

Intervallempfindung einer Quart sukzessive (Töne nacheinander) gespielt sehr subjektiv und meist um einige Cent von einer reinen oder temperierten Quart entfernt, wie Untersuchungen zeigen.⁸⁰

3.3.3 E-Dur- Kontrolle

Es ist üblich, nach beendetem Stimmvorgang das Ergebnis durch Akkorde zu kontrollieren und sich von deren Brauchbarkeit zu überzeugen. Dafür wird häufig der E-Dur-Akkord herangezogen, der deshalb -stellvertretend für alle anderen Dreiklänge- namensgebend ist.

Wie schon im Kap. 3.2.2 besprochen, ist die Bundsetzung auf die gleichmäßig temperierte Stimmung festgelegt und nur eine Kompromisslösung im Vergleich zur Reinen Stimmung. Hier liegt die große Gefahr der E-Dur-Kontrolle: Beim Anschlag des 6-stimmigen Dreiklanges empfindet man möglicherweise einige Intervalle als „unsauber“ und versucht sie „reiner“ zu stimmen. Im Fall von E-Dur wird man mit der zu großen gleichmäßig temperierten Dur-Terz (gis auf der 3. Saite) unzufrieden sein und diese tiefer drehen. Schlägt man anschließend einen A-Dur-Akkord an, ist aber eben diese 3. Saite (a am 2. Bund) zu tief.

Auch wenn experimentelle Untersuchungen zeigen, dass die sukzessiv gespielte große Terz in der Intervallempfindung recht nahe an der gleichmäßig temperierten Terz liegt,⁸¹ ist von dieser Methode zumindest als Feinjustierung abzuraten.

Zur Kontrolle empfiehlt es sich, einen „leeren Dreiklang“, also nur Grundton und Quint zu verwenden (z.B. E, H, e, h, h, e¹), dann entfällt die angesprochene Terzenproblematik. Da aber auch die gleichmäßig temperierte Quinte um 2 Cent von der reinen Quinte abweicht, ist bei der Kontrolle mit Akkorden stets Kompromissbereitschaft gefragt, d.h. ein Auge, bzw. besser: ein Ohr zudrücken.

⁸⁰ vgl. Geller 1997, S. 84

⁸¹ vgl. ebenda 1997, S. 84

Bei tonalen, einfachen Stücken kann man schon je nach Bedürfnis gewisse Akkorde (z.B. Schlussakkord, exponierte Stellen) etwas reiner als gleichmäßig temperiert einstimmen, sollte sich aber im Klaren sein, dass man sich damit unreine Oktaven einhandelt.

3.3.4 Flageolett-Stimmung

Berührt man eine Saite an ihrer Hälfte/Drittel/Viertel/Fünftel ihrer Länge ganz leicht, entsteht beim Anschlag ein glockenhafter Ton, ein Flageolett.

Im Unterschied zu den gegriffenen, wegen der Bundsetzung gleichmäßig temperierten, Tönen sind Flageoletts von den physikalischen Schwingungsmöglichkeiten einer Saite abhängig (vgl. Kap. 1.1.2) und daher reine Intervalle. So ergibt ein Flageolett am 7. Bund (Saite gedrittelt) den 3. Partialton, also die reine Duodezim (Quint+Oktav, oft -so auch in dieser Arbeit in weiterer Folge- „Quint-Flageolett“ genannt) wie sie in der Naturtonreihe vorkommt.

Die Stimmmethode mit Flageoletts hat zwei wesentliche Vorteile:

- Es kann kein unsauberer Fingeraufsatz verfälschen, weil „Leersaiten“ angezupft werden. Weicht nämlich die Fingerposition vom genauen Knotenpunkt etwas ab, wird der Ton nicht etwa falsch, sondern nur etwas dumpfer.
- Die durch Flageolett erzeugten Töne sind mindestens eine Oktave, Duodezime oder gar Doppeloktave höher als die Leersaiten. Dadurch gelangt man in einen für die Frequenzunterscheidung sehr viel günstigeren Hörbereich (vgl. Kap 1.2). Die Frequenzen der Flageolettöne für die Saiten der Gitarre sind der Tabelle 9 im Anhang zu entnehmen.

Die 1. Saite wird oft als richtig festgesetzt oder tatsächlich nach einem Vergleichston gestimmt. Von dieser Saite aus wendet man nun die Flageolett-Methode auf alle weiteren Saiten an. Grundsätzlich schlägt man beim Vergleich zweier Töne immer zuerst den richtigen Ton an und erst anschließend den zu stimmenden zweiten.

- A) Die 1. Saite wird als Leersaite gezupft. Es klingt das e^1 , welches man mit dem Quint-Flageolett (VII. Bund) der 5. Saite –ebenfalls ein e^1 - vergleicht und zum Einklang bringt.
- B) Im zweiten Schritt dient abermals die leere e^1 -Saite als Ausgangston. Mit ihr vergleicht man das Doppeloktav-Flageolett (5. Bund) auf der 6. Saite.
Von der Richtigkeit der ersten beiden Stimmvorgänge kann man sich durch Kontrolle des Quint-Flageoletts der 5. Saite mit dem Doppeloktav-Flageolett der 6. Saite. Sie sollten einen perfekten Einklang ergeben. Ist das nicht der Fall, muß man Schritt A) und B) nochmals wiederholen.
- C) Das Doppeloktav-Flageolett der gestimmten und kontrollierten A-Saite ist das a^1 . Mit diesem wird das Quint-Flageolett der 4. Saite – ebenfalls a^1 - in Einklang gebracht.
- D) Analog zum Schritt C vergleicht man das Doppeloktav-Flageolett der 4. Saite mit dem Quint-Flageolett der 3. Saite. Aus theoretischer Sicht ist diese gestimmte g-Saite mit dem größten Fehler behaftet, da sie vom Ausgangston schon 3 Stimmvorgänge (Schritt A, B und C) entfernt ist. Ein Fehler, der schon am Anfang begangen wurde, pflanzt sich bei den nächsten Schritten fort und summiert sich sukzessive zu einem großen Gesamtfehler auf.
- E) Auf der ersten Saite wird das Quint-Flageolett angeschlagen. Mit diesem vergleicht man das Doppeloktav-Flageolett der 2. Saite. Es empfiehlt sich, diesen Stimmvorgang besonders genau zu nehmen,

da diese beiden Saiten am häufigsten zusammen gespielt, generell am öftesten verwendet werden.

Übersicht:

- A) 1. Saite leer : 5. Saite VII. Bund⁸²
- B) 1. Saite leer : 6. Saite V. Bund
- C) 5. Saite V. Bund : 4. Saite VII Bund
- D) 4. Saite V. Bund : 3. Saite VII Bund
- E) 1. Saite VII Bund : 2. Saite V. Bund

Betrachtet man die Flageoletts genauer, treten zwei Faktoren hervor, die zu berücksichtigen sind:

1.) Differenz rein/temperiert:

Die vorhergehenden Kapitel haben bereits um den Unterschied reiner und temperierter Intervalle aufgezeigt. Von Interesse ist vor allem die gleichmäßig temperierte Quinte, die um 2 Cent tiefer liegt als die reine (vgl. Tabelle 8) und die Oktaven mit 0 Cent Abweichung. Flageolett-Töne basieren auf der Obertonreihe, sind also aus der reinen Tonskala. Während jetzt alle Quint-Flageolett um 2 Cent höher sind als die gleichmäßig temperierten Quinten, sind die Oktav- und Doppeloktav-Flageoletts gleich wie die temperierten. In Schritt A, C, D und E verwendet man das reine Quint-Flageolett und mit einem gleichmäßig temperierten Intervall verglichen. In all diesen Fällen produziert man trotz gewissenhaftester Intonierung einen systematischen Fehler von 2 Cent.

⁸² Für die Bünde werden auf der Gitarre Römische Ziffern verwendet. V entspricht dem Doppeloktav-Flageolett, VII dem Quint-Flageolett

2.) Inharmonizität der Teiltöne:

Dieses Phänomen der Abweichung von Obertönen von der Naturtonreihe bei realen Saiten wurde bereits in Kap. 1.1.2 theoretisch beschrieben. Hier, bei dieser Stimmungsmethode findet sie auch praktische Konsequenzen. Grundsätzlich werden die Obertöne höher als im idealisierten Modell der natürlichen Obertonreihe. Je höher die Ordnungszahl des Obertones, desto größer ist seine Abweichung.⁸³ Das Oktav-Flageolett ist als erster Oberton noch am geringsten verändert, stärker ist der Effekt beim Quint-Flageolett (2. Oberton) und noch mehr weicht das Doppeloktav-Flageolett (3. Oberton) ab.

Weniger drastisch als diese Abhängigkeit von der Ordnungszahl des Teiltones ist allerdings die Unterschiedlichkeit der einzelnen Saiten. Während bei allen getesteten Saitenmarken kaum eine Inharmonizität der Teiltöne für die ersten beiden Saiten und der 4. Saite nachgewiesen werden konnte, wichen die 3., 5. und 6. Saite teilweise dramatisch von den harmonischen Werten ab. Aber auch hier konnte keine eindeutige Tendenz festgestellt werden, eine andere Saitenmarke zeigte wieder ein relativ harmonisches Verhalten, dafür Abweichungen für eine andere Saite (siehe Tab. 5-7 im Anhang).

3.3.5 Stimmen nach Schwebungen⁸⁴

Schwebung ist ein akustisches Phänomen, das bei zwei gleichzeitig gespielten Tönen mit geringfügig unterschiedlichen Tonhöhen auftritt. Dabei verschmelzen die beiden Töne zu einem einzelnen, bei dem die

⁸³ vgl. Baines: 1996, S. 322

⁸⁴ vgl. Roederer 1977, S.28ff

Lautstärke regelmäßig an- und abschwilt. Die Geschwindigkeit, mit der sich laut und leise abwechseln, hängt vom Frequenzunterschied der beiden Töne ab:

$$|f_1 - f_2| = \Delta f$$

Der typische Lautstärken-Effekt kommt durch Interferenz zustande. Die Amplituden der Einzeltöne summieren sich zu einer Gesamtlautstärke, wie in Abb. 18 dargestellt. Die Hüllkurve stellt die Lautstärkenänderung dar und ihre Frequenz ist die Differenz der Einzelfrequenzen f_1, f_2 (s. o.).

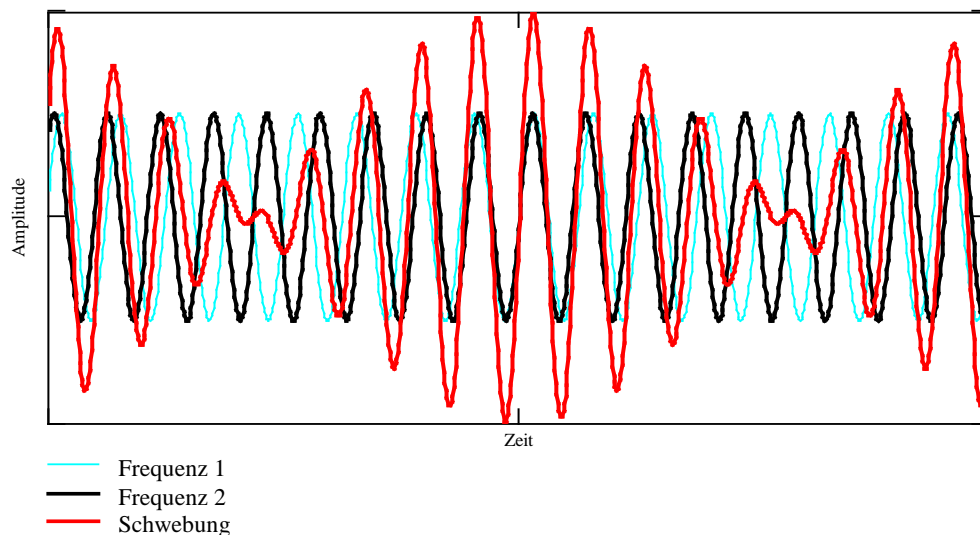


Abb. 18: Schwebungseffekt zweier ähnlicher Frequenzen

Unser Ohr kann die beiden unterschiedlichen Frequenzen nicht mehr auflösen, was mit dem „ortsabhängigen Frequenzhören“ unseres Hörorgans zusammenhängt: Der Luftschall wird mechanisch über Trommelfell, Gehörknöchelchen (Hammer, Ambos, Steigbügel) ans Ovale Fenster weiter transportiert. Dort kommt es zur Umwandlung in Schallimpulse in ein flüssiges Medium, die Perilymphe, welche den Schneckenkanal ausfüllt. Der Schneckenkanal wird geteilt vom sogenannten Basilarmembran, auf dem sich in etwa 30000 feinste Haarzellen als Rezeptoren befinden. Je nach Frequenz, die sich in der

Perilymphe ausbreitet, werden unterschiedliche Haarzellen angeregt, die elektrische Impulse ans Gehirn abfeuern. Für jedes Frequenzband gibt es dabei auf der Basalmembran einen unterschiedlichen Ort, bei einer anderen Frequenz wird wieder eine andere Stelle in der Schnecke angeregt.

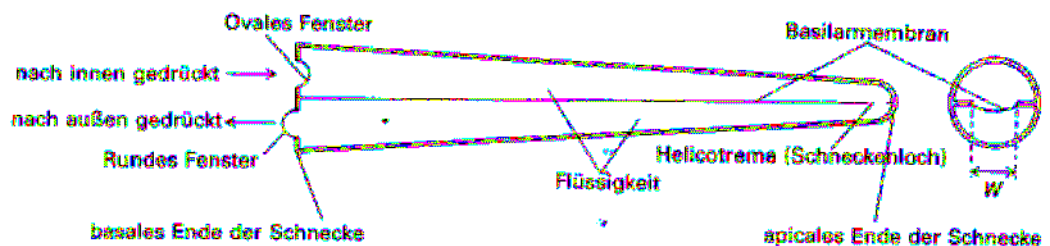


Abb. 19: Schema der menschlichen Schnecke (Innenohr)⁸⁵

Sind zwei Tonhöhen fast gleich groß (wie es bei der Schwebung der Fall ist), liegen auch die angeregten Haarzellen eng nebeneinander. Da diese Haarzellen auch eine räumliche Ausdehnung besitzen und die Härchen dieser Zellen nicht vollkommen lückenlos nebeneinander liegen können, ist irgendwann der Punkt erreicht, wo unser Gehör beide Frequenzen nicht mehr als scharf getrennte Einzeltöne wahrnehmen kann und die beiden Töne verschmelzen zu einem einzigen.

Die empfundene Tonhöhe, die sogenannte Mittenfrequenz befindet sich genau zwischen den beiden Einzelfrequenzen:

$$f_M = (f_1 + f_2) / 2 \quad ^{86}$$

Dass der Schwebungseffekt erst in unserem Ohr auftritt und nicht nachträglich durch unser Gehirn interpretiert wird, zeigt folgender Versuch:

⁸⁵ <http://schreier.free.fr/pages/physik/musik/papers/schwingungslehre.pdf>

⁸⁶ Roederer 1977, S. 31

leitet man die eine Frequenz ausschließlich ans linke und die zweite ans rechte Ohr, verschwinden die Schwebungen.

Aus den erwähnten physiologischen Gründen ist es unmöglich, die beiden Einzelfrequenzen zu unterscheiden, doch der Schwankung der Lautstärke mit einer Frequenz unter 6 Schwebungen pro Sekunde kann man sehr gut folgen und zählen. Darüber kann unser Gehirn dem Wechsel laut/leise nicht mehr folgen und es entsteht ein rauer Klangeindruck. Besonders empfindlich ist unser Ohr bei Schwebungsfrequenzen von 2-5 Hertz.⁸⁷

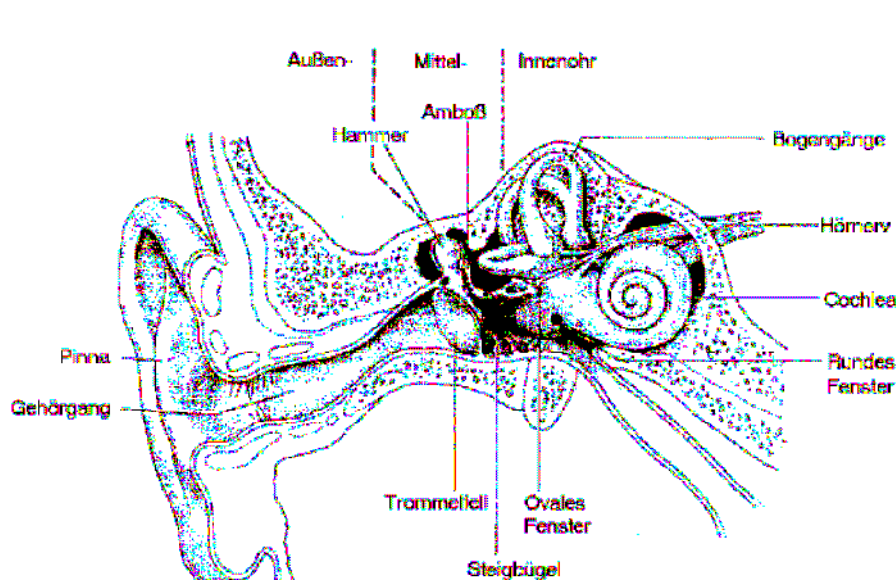


Abb. 19: Schnitt durch das Ohr⁸⁸

Sind die beiden Töne im Einklang, tritt keine Schwebung mehr auf, sie sind „schwebungsfrei“. Diesen Zustand versucht man beim Einstimmen zu erreichen. Viele Musiker der verschiedensten Instrumentengruppen verwenden diese Möglichkeit, sehr exakte Einklänge bzw. Oktaven und Quarten/Quinten zu erhalten (wenn sie auch oft nicht bewusst auf die Anzahl der Schwebestöße achten, sondern eher die auffällige

⁸⁷ vgl. Meyer 1972, S. 19

⁸⁸ <http://eco.psy.ruhr-uni-bochum.de/download/AllgPsy1/Einfuhr7/Einfue7.pdf>

Klangqualität eines schwebefreien Unisonos bemerken). Dieser Klangeindruck wird als „glatt“ bezeichnet, im Gegensatz zur „rauen“ Schwebung.

Jeder musikalischer Ton besteht aus Grundton und seinen Obertönen (vgl. 1.1.1). So kommt Schwebung auch bei allen Obertönen zustande und der Eindruck verstärkt sich. Viele gemeinsame Obertöne besitzen die Prime (alle Obertöne sind gleich), die Oktave (2. und 1., 4. und 2, 6. und 3. Teilton ist identisch) und die Quinte (3. und 2., 6. und 4, usw.).⁸⁹ Diese Intervalle sind es in erster Linie, die man mit der Schwebungsmethode sehr rein einstimmen kann.

Wichtig ist, dass die beiden Töne in etwa die gleiche Lautstärke besitzen. Daraus ergibt sich -in Verbindung mit dem vorigen Absatz- die Schlussfolgerung einer gewissen Abhängigkeit von der Klangfarbe. Denn unterschiedliche Klangfarben bedeutet unterschiedlicher Teiltonaufbau mit unterschiedlich lauten Teiltönen.

Je ähnlicher also die Klangfarben sind, desto mehr Schwebungen können auftreten, desto genauer und einfacher wird der Stimmungsvorgang.

Zum Zählen der Schwebepulse ist auch ein langer, stationärer Ton von Vorteil. Dies ist leider auf der Gitarre nur in sehr geringem Maße gegeben, weshalb es für Gitarristen wesentlich schwerer ist, mit Schwebungen genau einzustimmen, als beispielsweise für Streicher.

Der Simultan-Test in Kapitel 4.2.2.3 soll klären, ob es dennoch sinnvoll ist, nach dieser Methode die Gitarre zu stimmen.

Sehr exakt kann man auch mit Hilfe der sog. Kombinationstöne einstimmen. Diese Methode bleibt der Gitarre aber versagt, weil sie den zur Ausbildung von Kombinationstönen benötigten Mindestschalldruck in hohen Lagen niemals erreicht.⁹⁰

⁸⁹ vgl. Geller 1997, S. 29

⁹⁰ vgl. ebenda 1997, S. 33

4 Hörversuch

4.1 Zielsetzung

In der Literatur bezeichnet man die kleinste feststellbare Änderung für Reizgrößen als „just noticeable difference“, kurz „jnd“.⁹¹ Im Zusammenhang mit der Stimmung ist die Empfindungsgröße Tonhöhe von Interesse (jndF).

Der jndF für Sinustöne ist in der Literatur hinreichend untersucht (Zwicker et al., 1957 oder Rakowski, 1971, Knudsen, Vern Olivier⁹²). Diese Unterscheidungsschwelle wird bei einem realen Klang noch wesentlich verbessert, da zusätzlich zur Grundschwingung auch Oberschwingungen den Toneindruck festigen (Schablonen-Denken des Gehörs/Gehirns).⁹³ Vor allem beim gleichzeitigen Erklängen zweier komplexer Töne fällt es dem Hörer durch die mehrfache Schwebungswirkung viel leichter, zwei fast identische Töne als unterschiedlich zu erkennen.

Im folgenden Hörversuch soll nun die Frequenzunterscheidungsschwelle für Gitarrentöne ermittelt werden. Dabei wird im ersten Teil die Flageolett-Methode verwendet, im zweiten Teil sind Schwebungen zwischen Flageolett-Tönen zu bewerten. Das Ergebnis soll zeigen, wie genau ein geübter Gitarrist zu hören im Stande ist, inwieweit die Fehlerquellen der vorhergehenden Kapitel von Bedeutung sind und abklären, ob ein Stimmen nach Schwebung mit den schnell ausschwingenden Gitarrenklängen möglich ist.

„Für jeden Musiker ist es natürlich interessant, zu erfahren, inwieweit das Publikum seine Bemühungen um eine gute Intonation zu würdigen weiß:

⁹¹ vgl. Roederer 1977, S.11

⁹² vgl. Fischer 1996, S. 52

⁹³ vgl. Roederer, S.26, S.61f

*Ungefähr die Hälfte aller getesteten Konzertbesucher erkennt einen Unterschied von 15c und nur 24% einen von 7c.*⁹⁴

4.2 Versuchsdesign

4.2.1 Versuchspersonen

Als Versuchspersonen (in weiterer Folge kurz als Vpn bezeichnet) stellten sich 13 Studenten bzw. Absolventen einer Gitarrenklasse an der Kunstuniversität Graz zu Verfügung. Sie stimmen mehrmals täglich ihre Gitarre, sind auch mit der charakteristischen Klangfarbe eines gezupften Tones bestens vertraut, besitzen also nahezu optimale Voraussetzungen. Da es sich hier noch dazu um einen passiven⁹⁵ Test handelt, konnten sich die Vpn ganz auf das Vergleichen der Töne konzentrieren und nicht -wie im praktischen Stimmvorgang- zusätzlich auf den Anschlag. Man kann daher bei den Ergebnissen dieses Hörversuches von einer annähernd unteren Grenze für die Frequenzunterscheidung ausgehen.

Statistik der Vpn:

laufender 1. Studienabschnitt:	4
absolvierter 1. Studienabschnitt:	7
absolviertes Mag.-Studium:	2

Das Alter der Vpn liegt zwischen 21-37 Jahren

4.2.2 Aufbau des Tests

Der Hörtest bestand aus 3 Teilen (siehe Testbogen im Anhang):

⁹⁴ Geller 1997, S.82

⁹⁵ Vpn mussten selbst nichts aktiv machen (nicht anzupfen oder gar stimmen), sondern nur bewerten.

4.2.2.1 Sukzessiv-Test

Zwei hintereinander gespielte Flageolett-Töne sollen von den Vpn verglichen werden. Der erste Ton wird als gestimmt deklariert, das zweite Flageolett ist einer der Kategorien

- zu tief
- sauber
- zu hoch

zuzuordnen. Es handelt sich hier also um einen passiven Hörtest. Die anfängliche Versuchsanordnung mit „forced choice“ (zu tief/zu hoch) wurde um die Kategorie „sauber“ erweitert, da es in der Praxis oft vorkommt, dass man zwar spürt, dass etwas nicht sauber ist, die Richtung aber nicht genau bestimmen kann. Dieses Unbehagen ist für das Stimmen wichtiger als das Wissen, ob der Ton zu hoch oder zu tief war. In der Regel dreht der Gitarrist hier auf gut Glück am Wirbel: Falls der Ton in der Tendenz noch schlechter wird, probiert er es dann mit der anderen Richtung, bis sich ein Empfindung einstellt, die er als „sauber“ empfindet.

Dennoch musste nicht auf die Daten für die Auswertung nach dem Prinzip „forced choice“ verzichtet werden, aus allen Testbeispielen wurden bei der Auswertung nur diejenigen mit den Stimuli „zu hoch“ bzw. „zu tief“ verwendet.

Da die Hörleistung in unterschiedlichen Lagen verschieden ist, wurde der Test in zwei Klassen eingeteilt:

- *hohe Lage*: Das Quint-Flageolett der 1. Saite wurde als Stimmtone gesetzt. Als zweiten Ton wurde das Doppeloktav-Flageolett der 2. Saite präsentiert. Dies entspricht auch der Vorgehensweise nach der Flageolett-Methode (Kap. 3.3.4).
- *tiefe Lage*: Das Doppeloktav-Flageolett der 5. Saite diente als richtig definierter Ton, das Quint-Flageolett der 4. Saite war zu beurteilen. Es wurde bewusst nicht die 6. Saite mit der 5. als tiefstmögliche Lage verglichen, da nach der Flageolett-Methode die 6. Saite einerseits ohnehin nur zur Kontrolle

mit der 5. verglichen wird (original mit der 1. Leersaite), andererseits die Verbindung 5./4. Saite wegen der Fehlerfortpflanzung von der 4. auf die 3. Saite am brenzlichsten ist.

Jede der Lagen teilt sich selbst in unterschiedliche Abweichungsstufen auf.

„Nur ungefähr die Hälfte aller Laien-Musiker nimmt einen 7c-Unterschied wahr, und noch nicht einmal ein Drittel der besten „Hörspezialisten“, der Tonmeister, hört unter besten Bedingungen einen Abstand von 2c.“⁹⁶

Da es sich bei den Testpersonen um „Fachmusiker“ handelt, wurde angenommen, dass unter guten Umständen auch Frequenzabweichungen unter 5 Cent unterschieden werden können. Die erste Stufe, eine Abweichung von +/- 12 Cent, sollte also von allen Vpn zugeordnet werden können. Sie diente hauptsächlich zum Eingewöhnen und Konzentrationsschärfung. Dementsprechend geringer war auch die Anzahl der Beispiele dieser Kategorie (5 Beispiele pro Person). Die weitere Abstufung betrug 7, 5, 4, 3 und 2 Cent. Bei ihnen betrug die Zahl der Beispiele 6, 7, 8, 8 und 10.

Dieser erster Test (hohe + tiefe Lage) nahm etwa 15 Minuten in Anspruch.

4.2.2.2 Umfrage Stimm-Technik

Zwischen hoher und tiefer Lage des Sukzessiv-Tests wurden die Vpn nach der von ihnen verwendeten Stimm-Technik befragt. Zur Auswahl standen die Methoden aus dem Kapitel 3, es wurde aber auch ein Feld für nichtgenannte Verfahren reserviert. Mehrfachnennungen waren zulässig.

⁹⁶ Geller 1997, S. 82

Neben dem informativen Charakter hatte diese Umfrage auch den Zweck, die angespannte Konzentration der Vpn abzubauen, der Ermüdung nach etwa 5 Minuten Anstrengung mit etwas Abwechslung und Smalltalk entgegenzuwirken.

4.2.2.3 Simultan-Test

Dieser Versuch sollte zeigen, ob es sinnvoll ist, die Gitarre nach Schwebungen zu stimmen. Die Kurzlebigkeit von gezupften Tönen macht es verständlicherweise schwieriger, Schwebungen zu verfolgen, auf der anderen Seite wäre ein viel feineres Einstimmen möglich.

Zwei gleichzeitig gespielte Flageolett-Töne wurden den Vpn präsentiert. Die entstehende Schwebungswirkung sollte nach dem Schulnoten-System beurteilt werden: 1 für sehr gute Übereinstimmung (unisono), 2 bis zu 5 als größte Abweichung.

Auch hier galt es, tiefe und hohe Lage zu unterscheiden. Die Flageolett-Töne waren die gleichen wie im Sukzessiv-Test.

Die Dauer dieses Testabschnitts betrug in etwa 4 Minuten, pro Lage gab es 15 Beispiele zu beurteilen.

Vorweg wurde allen Versuchspersonen vom Versuchsleiter gesagt:

Bei auftretenden Fragen konnte jederzeit der Versuchsleiter (bei jedem Test anwesend) befragt werden.

- Stell dir vor, du bist im Vorbereitungsraum und stimmst dir deine Gitarre fürs Konzert

Seite 1 und 2

- Es werden pro Beispiel 2 Töne kurz hintereinander vorgespielt: der erste (1.Saite Quintflageolett) ist als gestimmt festgesetzt, der zweite Ton (2. Saite Doppeloktav-Flageolett) ist entweder:

zu tief,

sauber oder

zu hoch.

Bitte die gehörte Empfindung beim richtigen Kästchen ankreuzen.

- Jedes Beispiel (a,b,c,...) wird nur einmal vorgespielt
- Die einzelnen Hörbeispiele sind unterteilt in unterschiedliche Abweichungsbereiche z.B. 12 Cent bedeutet, -12 Cent , 0 Cent, oder + 12 Cent Tonhöhenunterschied.
- Die Beispiele sind per Zufallsprinzip ausgewählt worden, d.h. in einer Abweichungskategorie muss nicht jede Aussage (zu tief, sauber, zu hoch) vorkommen. So könnten rein theoretisch auch alle Beispiele gleich sein.
- Vor Beginn des Hörversuchs werden zur Demonstration 12 Cent zu tief, sauber, 7 Cent zu hoch, 5 Cent zu tief, 2 Cent zu hoch, sauber als Anhaltspunkt für die ungefähre Größe der Tonhöhenunterschiede vorgespielt. Weil für den Stimmtton die 1. Saite, für den zu bestimmenden Ton aber die 2. Saite verwendet wurde , kommen bei „sauber“ trotz gleicher Tonhöhe Klangfarbenunterschiede vor.

Seite 3 und 4

Analog zu Seite 1 und 2, allerdings in tiefer Lage: 5. Saite Doppeloktav-Flageolett als fixe Tonhöhe verglichen mit 4. Saite Quintflageolett.

Es folgt kein Demonstrationsbeispiel mehr.

Seite 5

- Zwei Töne (zuerst in hoher und anschließend in tiefer Lage) werden gleichzeitig angespielt. Beurteile, wie gut sie gestimmt sind auf einer Skala von 1 bis 5 (in Schulnoten, 1 heißt unisono gestimmt, 5 schlecht gestimmt.).
- Der Effekt der Schwebung und die Möglichkeit danach zu stimmen, wird bei Bedarf der Testperson vom Versuchsleiter erklärt.
- Es werden zur Orientierung je 2 Hörproben (hohe + tiefe Lage) für keine bzw. größte Tonhöhenabweichung vorgespielt.
- Die Beispiele sind wieder per Zufallsprinzip ausgewählt worden.

4.2.3 Zusammenstellung der Testbeispiele

Die Aufnahme der Gitarrentöne erfolgte im Lehrstudio am Institut für Nachrichtentechnik Graz und im Tonstudio Romes in Hartberg. Als Mikrophone waren ein KM 140 bzw. ein LD Systems D 1120 im Einsatz. Auf zusätzlichen Hall wurde bewusst verzichtet, nur der trockene Gitarrenklang aufgenommen.

Bei der Aufnahme wurde auch auf eine gleichmäßige Lautstärke und gleichbleibend, helle Klangfarbe (vgl. Kap. 1.3) geachtet. Trotzdem war aufgrund der Tatsache, dass 2 verschiedene Saiten bzw. Flageolets verwendet wurden, ein Unterschied der Klangfarbe nicht zu vermeiden. Ein störendes Grundrauschen war ebenfalls nicht zu eliminieren, der entstehende Fehler kann als Ausgleich für die zusätzliche Konzentrationssteigerung durch den passiven Versuchsaufbau betrachtet werden.

Die Bearbeitung der Einzeltöne erfolgte über das Computerprogramm „Cool Edit Pro 2“, ebenso die Frequenzanalyse. Als Analyseparameter für die Fourier-Transformation wurden eine FFT-Größe von 65536 und als Verfahren Blackmann-Harris verwendet. Zur Ermittlung der Grundfrequenzen der Töne wurde ein Scan des Testtones

durchgeführt. Auf eine parabolische Interpolation wurde verzichtet, die daraus Abweichungen sind zu klein, um Einfluss auf die Aussagekraft des Test zu nehmen.

Die beiden Stimmtöne (Quint-Flageolett der 1. Saite für die hohe, Doppeloktav-Flageolett der 5. Saite für die tiefe Lage) wurden analysiert und vermessen. Mit Hilfe des Strech-Tools (Effects-Time/Pitch-Strech mit Resample) konnten die zu vergleichenden Töne (Doppeloktav-Flageolett [kurz D5] der 2. und Quint-Flageolett [kurz Q7] der 4. Saite) auf die exakt gleiche Frequenz wie ihre Referenztöne gestimmt werden. Sie besitzen 0 Cent Abweichung zum Stimmtone. Durch wiederholtes Dehnen bzw. Komprimierung dieser Wav-Datei entstanden die gewünschten Cent-Abstände. Sie sind in Tabelle 3 und 4 angeführt.

Hohe Lage:

e¹ (leer): gemessen (Scan) 0,1-1s : 988,05 Hz als Stimmtone definiert
 h (D5): gemessen bei 0.1-1s (Scan): 986,74 Hz

Tiefe Lage:

A (D5) : gemessen (Scan) 0,1-1s : 439,58 Hz als Stimmtone definiert
 D (Q7): gemessen bei 0.1-1s (Scan): 440,87Hz

Umrechnung Cent-Abweichung in Hertz mittels Taschenrechner über die Formel (Gl. 8, Kap. 3.2.2):

$$f_1 = 2^{((+/-)x/1200)*f_2}$$

- 0 Cent: Datei h D5 (0 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 988,1/ 988,1 Hz
- 2 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 989,2/ 989,3 Hz
- -2 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 986,9/ 986,9 Hz
- 3 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 989,8/ 989,7 Hz
- -3 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 986,3/ 986,3 Hz
- 4 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 990,3/ 990,3Hz
- -4 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 985,8/ 985,7 Hz
- 5 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 990,9/ 990,9 Hz

- -5 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 985,2/ 985,3 Hz
- 7 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 992,1/ 992,1 Hz
- -7 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 984,1/ 984,1 Hz
- 12 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 994,9/ 994,9Hz
- -12 Cent: Datei h D5 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 981,2/ 981,2Hz

Tabelle 3: Theoretisch berechnete Cent-Abweichungen in Hertz mit tatsächlich eingestimmten Frequenzen in hoher Lage

- 0 Cent: Datei D Q7 (0 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 439,6/ 439,6 Hz
- 2 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 440,1/440,0 Hz
- -2 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 439,1/439,1 Hz
- 3 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 440,3/ 440,3 Hz
- -3 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 438,8/438,9 Hz
- 4 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 440,6/440,6 Hz
- -4 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 438,6/438,6 Hz
- 5 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 440,9 /440,9 Hz
- -5 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 438,3/438,3 Hz
- 7 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 441,4/441,3 Hz
- -7 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 437,8/437,8 Hz
- 12 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 442,6/442,6 Hz
- -12 Cent: Datei D Q7 (2 Cent): berechnet auf/gestimmt auf: 436,5/436,5 Hz

Tabelle 4: Theoretisch berechnete Cent-Abweichungen in Hertz mit tatsächlich eingestimmten Frequenzen in tiefer Lage

Die Verteilung der 3 Urteils Kategorien in die einzelnen Abweichungsstufen wurden zufällig zusammengewürfelt und dieser Umstand auch den Versuchspersonen so mitgeteilt, um zu vermeiden, dass Urteile angewählt werden, nur weil sie noch nie/selten vorgekommen sind. Tatsächlich sind allerdings im Vorfeld einige wenige Beispiele zugunsten von „sauber“ vom Versuchsleiter korrigiert worden.

Das Zusammenschneiden der Beispiele erfolgte im Multitrack-Modus von Cool Edit Pro mit einer Pause von 2 Sekunden zwischen den

einzelnen Beispielen. Der abschließende Mixdown für den Sukzessiv-Test ist unter dem Namen:

Bsp [die jeweilige Abweichung] ([hohe/tiefe Lage]).wav (z.B.: „Bsp 12 Cent (hohe Lage).wav“) auf der Begleit-CD im Ordner „\Hörversuch\Seite 1_2 bzw Seite 3_4“ gespeichert.

Der Stimmtton soll beim Sukzessiv-Test nicht ganz ausklingen und ist deshalb (im Gegensatz zum Simultantest) abgedämpft und mit einer kleinen Pause zum vergleichenden Ton versehen.

„The pause between the two sounds to be compared does not reduce the sensitivity, on the contrary, it increases it!”⁹⁷

Der abschließende Mixdown für den Simultan-Test ist unter dem Namen:

Schwebung [hoch/tief].wav auf der Begleit-CD im Ordner „\Hörversuch\Seite 5“ gespeichert.

Im Gegensatz zum Sukzessiv-Test ist der Mixdown hier in Mono, um eine Reduzierung des Schwebungseffektes durch die Stereo-Wirkung von Boxen oder Kopfhörer zu unterbinden (vgl. Kap 3.3.5).

4.3 Versuchsauswertung

4.3.1 Ergebnisse des Sukzessiv-Tests

4.3.1.1 Hohe Lage

12 Cent: 58 richtige von 63 möglichen Antworten = 92%

7 Cent: 67 richtige von 76 möglichen Antworten = 88%

5 Cent: 69 richtige von 87 möglichen Antworten = 79%

4 Cent: 66 richtige von 102 möglichen Antworten = 65%

3 Cent: 60 richtige von 96 möglichen Antworten = 63%

2 Cent: 66 richtige von 128 möglichen Antworten = 52%

⁹⁷ Zwicker/Fastl 1990, S.166

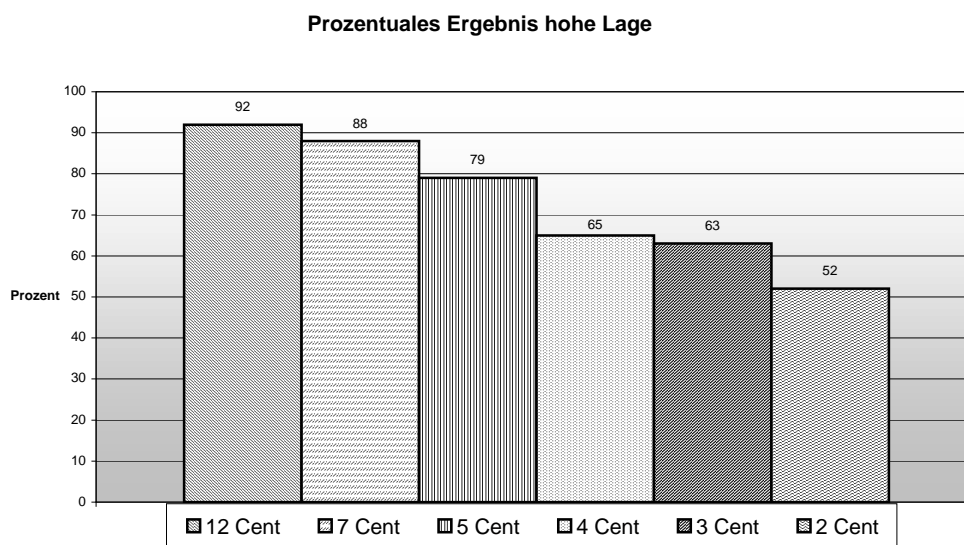


Abb.20 : Ergebnis des Sukzessiv-Test in hoher Lage

Der Sukzessiv-Test ergab, dass alle Testpersonen eine Frequenzabweichung von 12 Cent eindeutig von einer sauberen Intonation unterscheiden konnten (92%). Sogar die Richtung wurde erkannt. Selbst das Problem des Gewöhnungseffekts konnten die Vpn nicht verunsichern.

Ähnliches gilt für die Kategorie 7 und 5 Cent, von denen ohne Bedenken behauptet werden darf, dass fast alle Studenten diesen Unterschied richtig zuordnen konnten.

Schwieriger wird die eindeutige Beurteilung der 4- und 3-Cent-Abweichungen. So schwankt die prozentuelle Richtigkeit einzelner Testpersonen stark von 25%-88% (sowohl bei Kategorie 4 als auch 3). Es kann angenommen werden, dass ein Großteil der Vpn diese Frequenzen sehr wohl noch zu unterscheiden können, im Mittel waren 65% bzw. 63% der Urteile richtig.

Als ich einen Studenten nach der 2-Cent-Kategorie fragte, wie es ihm dabei gegangen sei, antwortete er resignierend: „*Da hättest gleich einen Affen ankreuzln lassen können!*“.

In seinem Fall (30% Richtige) sogar zutreffend, bei 3 Antwortmöglichkeiten beträgt die Wahrscheinlichkeit, zufällig die richtige

Kategorie zu wählen etwa 33%. Im Durchschnitt lag die gesamte Trefferquote jedoch bei 52%. Spitzenwerte über 80% waren allerdings nicht mehr zu finden. Zieht man den Ermüdungseffekt hinzu, kann man einzelnen Personen eine Frequenzunterscheidung von 2 Cent nicht absprechen, im allgemeinen Fall ist aber die Auflösungsgrenze erreicht. Interessant wäre noch ein weiterer Durchgang mit 1 Cent Abweichung gewesen, dieser wurde jedoch nicht durchgeführt, da ich zugegebenermaßen die Hörfähigkeit der Gitarristen unterschätzt hatte (Annahme: 4 Cent) und in einem Vorversuch selbst Primaten-solidarisch nach der 3 Cent-Hürde (30%) gescheitert war.⁹⁸

4.3.1.2 Tiefe Lage

12 Cent: 51 richtige von 62 möglichen Antworten = 82%

7 Cent: 43 richtige von 75 möglichen Antworten = 57%

5 Cent: 65 richtige von 88 möglichen Antworten = 74%

4 Cent: 60 richtige von 93 möglichen Antworten = 65%

3 Cent: 66 richtige von 101 möglichen Antworten = 65%

2 Cent: 64 richtige von 127 möglichen Antworten = 50%

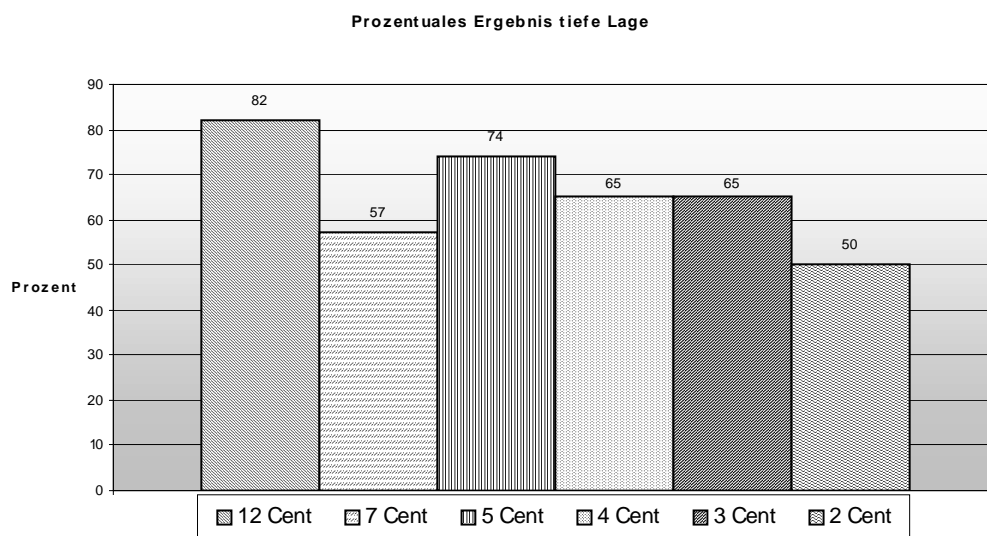


Abb. 21: Ergebnis des Sukzessiv-Test in tiefer Lage

⁹⁸ Ich entschuldige mich für die ungebührlichen Formulierungen der letzten beiden Absätze in einer wissenschaftlichen Arbeit.

Erwartungsgemäß war auch eine Abweichung von 12 Cent in der tiefen Lage von allen Vpn deutlich erkannt worden.

Auffallend in dieser Statistik ist der plötzliche Einbruch auf 57% in der Kategorie 7 Cent, noch dazu, wo der Wert für 5 Cent wieder auf 74% steigt. Der Grund dafür liegt in der Anordnung der Beispiele (methodischer Fehler): Beispiel a) aus 7 Cent (tiefe Lage) war zu hoch. Dies hatten 90% der Vpn richtig eingeschätzt. Der 2. Ton war ebenfalls zu hoch, 62% stimmten überein. Das Beispiel c) tiefer als Beispiele a und b, allerdings nicht zu tief, wie es 69% votierten, sondern sauber. Die Richtung „tiefer“ war von 92% richtig erkannt worden (die fehlenden 8% hatten bei b „sauber“ und bei c die richtige Antwort „sauber“, also gleichbleibende Tendenz angekreuzt). Das legt die Vermutung nahe, dass ein Großteil der Vpn die Qualität des vorhergehenden Beispiels in die Beurteilung des Aktuellen miteinbezieht.

Die Reihenfolge war zwar ausgewürfelt worden, aber für alle 13 Tests immer die gleiche. Um den oben genannten Fehler statistisch auszugleichen, hätte jeder Test eine andere Zusammenstellung der Beispiele aufweisen müssen.

Für die Kategorien 4, 3 und 2 gilt prinzipiell analoges wie in der hohen Lage.

Als Quintessenz des Sukzessiv-Tests in hoher und tiefer Lage kann ohne Bedenken formuliert werden:

Geübte Gitarristen können unterscheiden, ob ein Ton 3 Cent zu tief, sauber, oder 3 Cent zu hoch ist.
--

Das schließt aber einen kleineren jndF nicht aus. Es könnte möglich sein, Frequenzunterschiede unter 2 Cent mit der Flageolett-Methode zu bestimmen.

Generell lässt sich die Tendenz ablesen, dass die hohe Lage um eine Spur genauer beurteilt wurde als die tiefe. Der Unterschied ist jedoch zu gering, um diese Hypothese zu verifizieren.

4.3.1.3 Sukzessiv-Test mit Forced-Choice

Aus der Fülle der Testbeispiele wurde für den Forced Choice-Test (Erzwungene Wahl-Test) diejenigen herausgestrichen, bei denen als Stimulus „Sauber“ präsentiert wurde. Die Zahl der Beispiele (und damit auch die Güte des Tests) ist dadurch niedriger als in den oben genannten Hörversuchen. Diese Vorgehensweise weicht vom klassischen Forced choice-Verfahren insofern ab, als den Testpersonen zusätzlich die „Möglichkeit“ gegeben wurde, sich für die falsche Kategorie „Sauber“ zu entscheiden. In Summe standen für die einzelnen Kategorien jeweils an die 40 Daten für die Auswertung zu Verfügung (Details im Anhang).

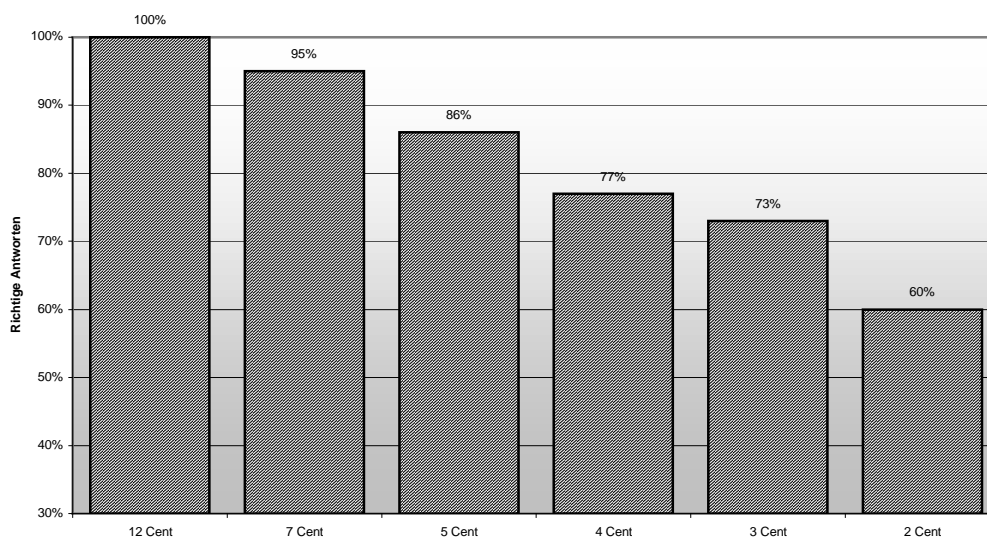


Abb. 22: Prozentuelle Ergebnisse der Forced-Choice-Variante in hoher Lage

Die Ergebnisse der Kategorien 12 Cent bis 3 Cent zeigen, dass im Großteil der Fälle die Abweichungen eindeutig erkannt wurden.

Die einzige stärkere Abweichung ergab sich bei der Kategorie 2 Cent. Aber auch hier sind die Vpn mit 60% richtigen Antworten noch weit von der Ratewahrscheinlichkeit (33%) entfernt.

Etwas bescheidener fällt das Ergebnis für die tiefe Lage aus:

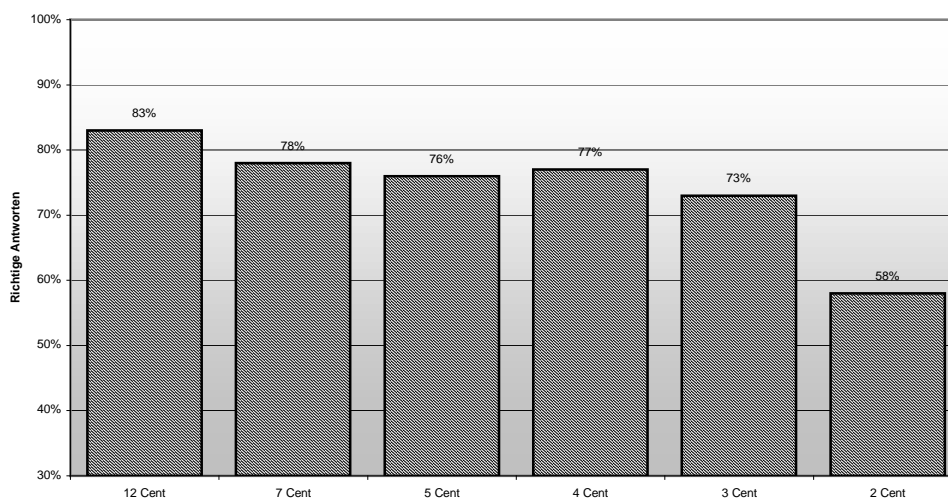


Abb. 23: Prozentuelle Ergebnisse der Forced-Choice-Variante in tiefer Lage

Wieder sind bis zur 3-Cent-Kategorie die Beispiele signifikant erkannt worden, der Sprung von 73% auf 58% lässt vermuten, dass bei einem Teil der Testpersonen zwischen 2 und 3 Cent die Frequenzunterscheidungsgrenze liegt. Wie schon in hoher Lage gilt, dass es immer noch genügend richtige Antworten gegeben wurden für die zusammenfassende Aussage:

Geübte Gitarristen erkennen, ob ein Ton zu hoch oder zu tief ist, solange die Abweichung nicht weniger als 3 Cent beträgt.

Natürlich kann auch hier nicht ausgeschlossen werden, dass auch noch kleinere Abweichungen erkannt werden, allerdings endet das Auflösungsvermögen dieses Test an der 2 Cent-Grenze.

4.3.2 Ergebnisse der Umfrage Stimm-Technik

Die Auswertung der Testbögen ergab folgende Verteilung (Mehrfachnennungen waren erlaubt):

- 5. Bund-Methode: 7
- Quartenstimmung: 2
- Akkordeinstimmung (E-Dur-Methode): 8
- Flageolett-Methode: 10
- Schwebungen: 1
- andere: Oktavenvergleich: 6

Bei der Akkordeinstimmung wurde nachgefragt, ob sie von den Vpn zum Einstimmen, oder nur zum Kontrollieren verwendet wird. Das Urteil fiel einstimmig zugunsten der Kontrolle aus, größtenteils mit E-Dur, aber auch A-Dur/Moll und C-Dur oder die gerade benötigten Tonart. Fällt das Ergebnis der Akkorde nicht zufriedenstellend aus, wird mit einer anderen Methode nachgestimmt.

Die Schwebungsmethode war einigen Vpn völlig unbekannt, bei der einzigen Nennungen wurde auch sicherheitshalber nachgefragt, ob er die Schwebepulse auch tatsächlich nachverfolge, was die Vpn bestätigte. Die betreffende Person schnitt im Simultantest (vor allem in der tiefen Lage) auffallend gut ab.

Während der Befragung votierten einige Studenten für ein Stimmen mit Oktaven. Diese Kategorie stand nicht explizit zur Auswahl, ist aber als erweiterte 5.Bund-Methode anzusehen: man vergleicht zwei Töne im Oktav-Abstand (z.B. A-a, fis-fis¹). Der Vorteil dabei ist, dass man beliebige Saiten miteinander kombinieren kann und so die im Kapitel 3.3.1 beschriebene Fehlersummation umgehen kann. Nachteilig wirkt sich der Oktavabstand aus, der nicht so exakt intonierbar ist, wie ein Einklang (Intervallskala ist subjektiv) und ein möglicher unsauberer Fingeraufsatz.

Die Kombinationsmöglichkeiten sind vielfältig, als Beispiel meines Gitarrenprofessors : a^1 (1. Saite) - a (3. Saite); fis^1 (1. Saite) – fis (4. Saite); d^1 (2. Saite) – d (4. Saite); a (3. Saite) – A (5. Saite); e (4. Saite) – E (6. Saite); e^1 - E (6. Saite). Oft hilft es auch, Oktaven auf einem höheren Bund zu spielen (z. B.: cis^2 (1. Saite) – cis^1 (3. Saite)). Durch die mehrfache Kontrolle einzelner Saiten, wird das Ergebnis sicherer, aber auch umständlicher. Vor allem ist darauf zu achten, welche Saite bereits gestimmt und welche noch falsch ist, eine Akkordkontrolle ist in diesem Fall sicher hilfreich.

Den Nachteil des ungünstigen Hörbereichs der tiefen Saiten und den Oktavenabstand kann man mit „künstlichen Flageolets“ mindern: Die tiefere Saite des Vergleichspaares wird als „artificial harmonic⁹⁹“ erzeugt.

4.3.3 Ergebnisse des Simultan-Tests

Die Ergebnisse der Umfrage nach der Stimm-Technik lässt an der Aussagekraft dieses Tests schon von vorn herein Zweifel aufkommen: Kaum jemand aus der Versuchsgruppe hatte zuvor Schwebungen auf der Gitarre bewusst wahrgenommen, geschweige denn nach ihnen gestimmt. Sollte der Test also negativ ausgehen (d.h. Schwebungen werden nicht den passenden Kategorien zugeordnet), lässt sich dadurch nicht ableiten, dass ein Stimmen nach Schwebungen unmöglich wäre.

Unter diesen unvoreilhaften Vorzeichen war auch anzunehmen, dass in den Daten einige „Ausreißer“ (extrem falsche Urteile) zu finden sein werden. Eine statistische Methode, die solch falsche Messpunkte

⁹⁹ künstliches Flageolett: Die linke Hand greift einen Ton, der rechte Zeigefinger berührt die Saite genau in ihrer Mitte und der rechte Ringfinger oder Daumen zupfen an. Die Saitenmitte liegt jetzt nicht mehr am 12. Bund wie beim natürlichen Oktavflageolett, sondern ist um diejenige Bundanzahl verschoben, die mit der linken Hand gerade gegriffen wird (z.B. 4. Bund → $12+4=16$. Bund).

abschwächt¹⁰⁰, ist die Berechnung eines Medianes¹⁰¹. Als weitere statistische Kenngrößen werden auch der Modalwert, Varianz, Standardabweichung und arithmetischer Mittelwert angegeben.

4.3.3.1 Hohe Lage

Dieser Test löste unter einigen Testpersonen reichlich Verwirrung aus, ich wurde oft gebeten, noch etwas mehr Zeit zwischen den einzelnen Beispiel zu lassen, um das Gehörte einer Schulnote zuordnen zu können (Zitat Vpn: „*Wie ist das jetzt noch mal? Wenn ich viele ‘Whoas’ hör, ist das dann gut oder schlecht?*“).

Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass nicht nur die Tendenz, sondern auch die Qualität der Abweichungen überraschend gut eingeschätzt wurde.

Legende zu den folgenden Tabellen:

Note...Schulnoten, die den Vpn zur Auswahl standen

Abs. H... Absolute Häufigkeit (Anzahl der Urteile pro Klasse)

rel. H... relative Häufigkeit (Absolute Häufigkeit dividiert durch die Anzahl der Beispiele in Prozent)

Note	Abs. H.	rel. H/ %
1	25	33
2	37	49
3	10	13
4	3	4
5	1	1
Beispiele	76	

Tabelle 11: Schwebungsbeurteilung bei 0 Cent Abweichung in hoher Lage

¹⁰⁰ vgl. Krengel 2005, S. 169

¹⁰¹ „Der **Median** oder **Zentralwert** ist dadurch charakterisiert, daß jeweils mindestens 50% der Beobachtungen x_1, \dots, x_n einen Wert größer oder gleich bzw. kleiner oder gleich dem Median annehmen.“: Hartung 1993, S 32

Median:	2
Modalwert:	2
arithmetischer Mittelwert :	1,8
Varianz:	0,50
Standardabweichung ¹⁰² :	0,71

Bei den Beispielen mit 0 Cent Unterschied zwischen den beiden Tönen wurde im Test 25x ebenfalls die Note 1 verliehen aber noch viel häufiger, nämlich 37x die 2. Die Tendenz war also eher, beim schwebungsfreien Klang Schulnote 2 zu geben.

Relativierend muss man jedoch anmerken, dass mit der Note 1 allgemein recht geizig umgegangen wurde, nur 35 Urteile lauteten so (davon allein mehr als 70% bei der Abweichung von 0 Cent). Tatsächlich waren sogar 76 Beispiele mit 0 Cent Abweichung gestimmt, sodass eigentlich eine „sehr gute“ Stimmung vorliegen müsste. Offensichtlich votierte man bei Unsicherheit eher für die gemäßigtere Variante „2“ (71 Nennungen). Die Ergebnisse sind also vermutlich etwas zu größeren Abweichungen verschoben.

Dennoch, aufgrund fehlender Signifikanz,

wird die Hypothese nicht bestätigt, dass ein Unterschied zwischen 0 und 2 Cent mit der Schwebungsmethode erkannt werden kann.

Allerdings wird sie durch die Ergebnisse auch nicht widerlegt: aufgrund der ungünstigen Vorbedingungen der Vpn (s.o.) darf man hoffen, dass mit etwas Übung die Unterscheidungsgrenze weiter gesenkt werden kann. Zwei Personen aus der Testgruppe waren bereits mit dieser Stimmungsmethode vertraut (einer zum Stimmen der Gitarre, die andere zum Stimmen des E-Basses) und ihre Ergebnisse bei Schulnote 1

¹⁰² Zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts, Varianz und Standardabweichung musste eine Person als Ausreißer aus dem Datensatz genommen werden.

ergaben einen Medianwert von 0,8 Cent, bei der Note 2 den Median 1,7 also insgesamt eine drastische Verbesserung in Richtung tatsächlicher Werte.

Interessant fürs Stimmen ist auch die einigermaßen korrekte Zuordnung einer Schwebung zur Schulnote 2: Verwendet man zum Stimmen ein Quintflageolet, ist dieses um eben diese 2 Cent zu hoch (vgl. Kap. 3.3.4). Will man die Saiten der Gitarre temperiert einstimmen, ist zwischen Quintflageolet und Doppeloktavflageolet eine Schwebung von 2 Cent zu konstruieren.

Note	Abs. H.	rel. H / %
1	6	15
2	19	49
3	9	23
4	1	3
5	4	10
Beispiele	<u>39</u>	

Tabelle 12: Schwebungsbeurteilung bei 2 Cent Abweichung in hoher Lage

Median:	2
Modalwert:	2
arithmetischer Mittelwert :	2,4
Varianz:	1,13
Standardabweichung:	1,06

Die 2 Cent Abweichung wurde im Mittel sehr oft mit der Schulnote 2 bewertet (Median und Modalwert liegen bei 2, arithmetische Mittelwert bei 2,4), nur sind die Streuwerte Varianz und Standardabweichung schon sehr groß.

Eine noch viel breitere Streuung zeigen die Klassen 3-5, 43% der Urteile haben 4 Cent Unterschied noch als Note 1 oder 2 beurteilt.

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	3	11
2	9	32
3	8	28
4	5	18
5	3	11
Beispiele	<u>28</u>	

Tabelle 13: Schwebungsbeurteilung bei 4 Cent Abweichung in hoher Lage

Median:	3
Modalwert:	2
arithmetischer Mittelwert :	2,7
Varianz:	1,59
Standardabweichung:	1,26

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	0	0
2	3	23
3	3	23
4	6	46
5	1	8
Beispiele	<u>13</u>	

Tabelle 14: Schwebungsbeurteilung bei 7 Cent Abweichung in hoher Lage

Median:	4
Modalwert:	4
arithmetischer Mittelwert :	3,3
Varianz:	0,69
Standardabweichung:	0,83

Hier ist hinzuweisen, dass insgesamt für 7 Cent nur 13 (bzw. 12 ohne Ausreißer) Daten zur Verfügung standen.

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	1	3
2	3	8
3	9	23
4	13	33
5	13	33
Beispiele	39	

Tabelle 15: Schwebungsbeurteilung bei 12 Cent Abweichung in hoher Lage

Median:	4
Modalwert:	4
arithmetischer Mittelwert :	3,8
Varianz:	1,10
Standardabweichung:	1,05

Zusammenfassend kann für den Simultantest in hoher Lage resümiert werden, dass eine Auflösung von 2 Cent nicht unterschritten werden konnte, aber noch viel Potential für Verbesserung vorhanden ist.

4.3.3.2 Tiefe Lage

Positiv überraschend waren die Ergebnisse des Simultan-Tests in tiefer Lage:

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	27	69
2	9	23
3	3	8
4	0	0
5	0	0
Beispiele	39	

Tabelle 16: Schwebungsbeurteilung bei 0 Cent Abweichung in tiefer Lage

Median:	1
Modalwert:	1
arithmetischer Mittelwert :	1,25
Varianz:	0,19
Standardabweichung:	0,43

War in hoher Lage bei 0 Cent Abweichung die Hälfte der Testpersonen für die Schulnote 2, ist in tiefer Lage 69% für die 1. Auch die Streuung ist äußerst gering.

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	18	35
2	23	45
3	8	16
4	1	2
5	1	2
Beispiele	<u>51</u>	

Tabelle 17: Schwabungsbeurteilung bei 2 Cent Abweichung in tiefer Lage

Median:	2
Modalwert:	2
arithmetischer Mittelwert :	2,3
Varianz:	0,75
Standardabweichung:	0,87

Die Abweichung von 2 Cent wurde ebenfalls recht eindeutig der Schulnote 2 zugeteilt, die Streuung um diesen Wert ist gering.

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	11	28
2	10	25
3	12	31
4	5	13
5	1	3
Beispiele	<u>39</u>	

Tabelle 18: Schwabungsbeurteilung bei 4 Cent Abweichung in tiefer Lage

Median:	2
Modalwert:	3
arithmetischer Mittelwert :	2,3
Varianz:	1,08
Standardabweichung:	1,04

Weniger einheitlich wurde die Einteilung in Klasse 3 erkannt. Zwar stimmt der Modalwert perfekt überein, doch täuscht die Eintracht: nicht einmal ein Drittel hatte auch die Note 3 vergeben, fast ebenso viele waren für eine 1. Dementsprechend zeigen die Mittelwerte die Tendenz zu geringeren Abweichungskategorien.

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	2	4
2	12	23
3	22	42
4	9	17
5	7	14
Beispiele	<u>52</u>	

Tabelle 19: Schwebungsbeurteilung bei 7 Cent Abweichung in tiefer Lage

Median:	3
Modalwert:	3
arithmetischer Mittelwert :	3
Varianz:	0,85
Standardabweichung:	0,92

Note	Abs. H.	rel. H. / %
1	0	0
2	2	15
3	5	39
4	2	15
5	4	31
Beispiele	<u>13</u>	

Tabelle 20: Schwebungsbeurteilung bei 12 Cent Abweichung in tiefer Lage

Median:	3
Modalwert:	3
arithmetischer Mittelwert :	3,5
Varianz:	1,04
Standardabweichung:	1,08

Die erhöhte Anzahl der Beispiele in den vorhergegangenen Klassen ging auf Kosten der 12-Cent-Abweichung. Wegen der geringen Anzahl der Daten ist hier keine aussagekräftige Statistik vorhanden.

Allgemein gilt in tiefer Lage ähnliches wie in hoher Lage, nämlich dass mit etwas mehr Erfahrung im Stimmen mit Schwebungen das Unterscheidungsvermögen sicher noch verbessert werden kann.

Zusätzlich bestärkt durch dieses vorgeschossene Vertrauen gilt als Interpretation der Ergebnisse in tiefer Lage:

Gitarristen können in tiefer Lage mit Hilfe von Schwebungen Unterschiede vom Einklang unter 2 Cent auflösen.

Begründet ist dieses deutlich bessere Auflösungsvermögen in tiefer Lage durch den wesentlich länger ausklingenden Ton, bei dem man mehrere Schwebungsperioden problemlos verfolgen kann. Die Töne der hohen Lage sind von so kurzer Dauer, dass eine Beurteilung der Schwebefrequenz erschwert wird.

Resümee des Simultantests: Stimmen nach Schwebungen ist in der tiefen Lage möglich.

5 Zusammenfassung

5.1 Versuch einer Anweisung zum Stimmen der Gitarre

Zu Recht verwirrt angesichts der Vielzahl an Fehlerquellen, schwächelnden Stimmmethoden und zu berücksichtigende Faktoren mag der Leser mit Recht fragen, wie er denn jetzt tatsächlich stimmen solle.

Ich möchte, aufbauend auf die Ergebnisse dieser Arbeit, versuchen, eine Anleitung zum Stimmen der Gitarre zu geben. War ich im Vorwort noch erstaunt über die Unzahl an Stimmungsmethoden, so ist mein Vorschlag ein Mix aus beinahe allen Varianten:

(Die Begründungen zu den einzelnen Schritten werden in der Fußnote gegeben).

Als Ausgangston verwende man die 1 Saite (e^1), die als gestimmt definiert wird.

A) Die 4. Saite stimme man zur 1. wie folgt:

Auf der 1. Saite erzeuge man am 12. Bund ein künstliches Flageolett mit dem Daumen¹⁰³ und lasse es ausklingen. Währenddessen greift der 2. Finger¹⁰⁴ am II. Bund¹⁰⁵ der 4. Saite das e, die Rechte erzeugt am VII. Bund ein künstliches Doppeloktavflageolett¹⁰⁶, das mit dem ersten Ton einen perfekten Einklang¹⁰⁷ bilden soll. Hierfür muss man auf die

¹⁰³ Das anschließende künstliche Flageolett auf der

¹⁰⁴ Der Greif-Fehler wird minimiert durch die Verwendung des 2. Fingers, der sich gegenüber des Daumens befindet und deshalb kaum transversale Verzerrungen vollführt.

¹⁰⁵ Diese tiefe Griffbrettlage ist noch relativ sicher was den unsauberer Fingeraufsatz betrifft.

¹⁰⁶ Der Inharmonizitätsunterschied zwischen Oktav- und Doppeloktavflageolett ist angesichts des jndF vernachlässigbar klein.

¹⁰⁷ Da kein Quintflageolett gebildet wird, tritt keine Differenz rein/temperiert auf.

Schwebung achten und die 4. Saite solange verändern, bis die Schwebung völlig verschwindet.

Dabei zu beachten ist auf einen sauberer Fingeraufsatz zu achten, und ein Abdämpfen der Basssaiten mit dem freien Zeigefinger und der unbeteiligten Diskantsaiten mit dem i (Zeigefinger der Rechten) und m-Finger (Mittelfinger der Rechten). Die Anschlaglautstärke ist wegen der Verwendung künstlicher Flageolets ohnehin auf piano beschränkt.

Diesen Schritt A muss man besonders sorgfältig einstimmen, da sich der Fehler sonst auf alle Basssaiten überträgt.

B) Die 5. Saite wird mit der nun gestimmten 4. Saite gleich gestimmt, wie es im Simultan-Test der Fall war: Ein gleichzeitiger, heller¹⁰⁸, Forte¹⁰⁹-Anschlag der 4. Saite Quintflageolett (VII. Bund) mit „i“ und 5. Saite Doppeloktavflageolett (V. Bund) mit „m“ erzeugt eine Schwebung, die vorerst schwebungsfrei in den Einklang¹¹⁰ gestimmt werden muss. Anschließend ist die 5. Saite soweit zu erniedrigen¹¹¹, dass die Lautstärkenpulse der Schwebung ein „Metronom“¹¹² von etwa 25¹¹³ Schlägen pro Minute vollführen. Praktikabler ist ein Denken in 16-tel, also im Tempo 100 folgt nach jeder 4. 16-tel ein Lautstärkenmaximum.

Die 6. Saite kann mit dem Daumen abgedämpft werden, i, m und a-Finger legen sich nach dem Anschlag auf die Saiten 3, 2 und 1.

¹⁰⁸ Mehrere Obertöne schweben untereinander und verstärken so den Schwebungseffekt.

¹⁰⁹ Lange ausgehaltene Töne erleichtern das Zählen der Schwebung.

¹¹⁰ Das Ohr kann nicht unterscheiden, welcher der beiden Töne zu tief ist, was fürs Einstellen einer Schwebungsfrequenz im Folgenden aber wichtig zu wissen ist.

¹¹¹ Das auf der d-Saite durch ein Quintflageolett erzeugte a^1 ist als reines Intervall um 2 Cent höher als das temperierte. würde man das a^1 auf der 5. Saite nach diesem schwebungsfrei stimmen, wäre es fälschlicherweise ebenfalls um 2 Cent zu hoch.

¹¹² Die Berechnung der Schwebefrequenzen von 2 Cent sind im Anhang einzusehen.

¹¹³ Der Inharmonizitätsunterschied der Teiltöne (Funktion der Obertonordnungszahl) der beiden Flageolettöne ging quantitativ geschätzt mit $0,1 \text{ Hz} = 0,4 \text{ Cent}$ ein.

C) Das Verfahren für die 6. Saite ist analog zu Schritt B, alles um eine Saite in Richtung 6. Saite verschoben. (5. Saite Flag. am VII, 6. Saite Flag am V. Bund). Die Schwebepulse besitzen hier allerdings eine Frequenz von 20 Schläge pro Minute. Auch hier ist die Unterteilung in 4er Gruppen mit $4 \times 20 = 80$ als Metronomzahl praktikabler.

Zur Kontrolle kann man einen Vergleich mit dem e auf 4. Saite (II. Bund) mit dem Oktavflageolett der 6. Saite heranziehen, die im Einklang sein müssen.¹¹⁴

D) Auch die Stimmvorschrift für die 3. Saite ist ähnlich wie in B und C: 4. Saite Doppeloktavflageolett (V. Bund) wird mit 3. Saite Quintflageolett (VII. Bund) verglichen. Nur ist diesmal die 3. Saite vom schwebungsfreien Einklang aus um 2 Cent zu erhöhen!¹¹⁵ Die einzustellende Schwebungsfrequenz ist hier 48 Schläge pro Minute. Hier empfiehlt sich ein Zählen in 2er-Gruppen, also Metronomzahl 96 und bei jedem 2. Schlag erfolgt ein Lautstärkenmaximum.

E) Die 2. Saite wird als Doppeloktav-Flageolett¹¹⁶ (V. Bund) mit der 1. Saite Quintflageolett (VII. Bund) verglichen, wie schon in den Schritten zuvor. Vom Einklang ausgehend muss man die 2. Saite um 2 Cent

¹¹⁴ Hier ist man schon 3 Stimmungsschritte vom Ausgangston entfernt, der Fehler könnte sich angesammelt haben. Ähnliche Vergleiche könnten bei allen Saiten unternommen werden!

¹¹⁵ Diesmal wird die Saite des Quintflageoletts nach der Saite des Doppeloktavflageoletts gestimmt, weshalb die 2 Cent diesmal ein anderes Vorzeichen besitzen.

¹¹⁶ Da man bei der Schwebungsmethode nur indirekt auf Frequenzunterschiede achtet, sondern auf Lautstärkeschwankungen, gilt das Argument des günstigen Hörbereichs aus Kap. 1.2 nicht. Allerdings ist auch die Geschwindigkeit der Schwebung frequenzabhängig, bei tiefen Tönen (z.B. A-Saite = 110Hz) würde sich kleinere Schwebungsfrequenzen (0,1Hz, also alle 10 Sekunden ein Lautstärkenhub) ergeben, was nicht mehr nachvollziehbar ist. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass nach dem Anschlag die linke Hand zum Drehen an den Wirbeln frei ist.

erniedrigen. Das ist bei einer Schwebung von 60 Schlägen pro Minute, also jede Sekunde, der Fall.

Am Ende angelangt kontrolliert man mit dem Akkord E-H-e-h-h-e¹.

Gitarrenanfängern rate ich zu einer erweiterten 5. Bundmethode (Kap. 3.3.1 und 4.3.2). Zum Stimmen vor Publikum sollte man dem Zuhörer schrill, forte und ewig ausgehaltene Töne beim Einstimmen ersparen, deshalb ist die Flageolett-Methode eine angebrachte Kompromisslösung.

5.2 Resümee

Die Basis für die Diskussion über das Stimmen der Gitarre wurde im ersten Kapitel mit Grundlagen der Akustik geschaffen: Ein musikalischer Ton besteht aus Grundschiwingung und Obertönen deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen (Gl. 4).

Die Eigenschaft der Steifigkeit einer realen Saite führte zum Effekt der Inharmonizität der Teiltöne. Qualitativ erhöht sich dadurch die Frequenz höherer Obertöne. Abhängigkeiten von geometrischen Faktoren, Ordnungszahl des Teiltönen, Materialkonstanten und Spannkraft wurden angeführt. Größenmäßig ist der Einfluss schwer fassbar, die Literatur und Saitenexperten¹¹⁷ sprechen von „vernachlässigbar“. Eigene Messungen erreichten nicht die notwendige Genauigkeit für eine quantitative Aussage.

Das Messsystem „menschliches Ohr“ ist evolutionär und physiologisch auf bestimmte Frequenzen sensibilisiert. Sowohl in Lautstärke, als auch im Auflösungsvermögen von Frequenzen hört der Mensch besonders gut zwischen 2 und 5 kHz. Das führte zur Forderung möglichst hoher Töne (Flageoletts!) zum Stimmen.

¹¹⁷ Mail-Korrespondenz mit Franz Klanner, Thomastik-Infeld

Kapitel 1.3 führte die physikalischen Messgrößen Frequenz, Schalldruck, Dauer, Spektrum und Hüllkurve als Einflussfaktoren für die Tonhöhenwahrnehmung an: Eine vergrößerte Lautstärke macht die empfundenen Tonhöhen für Frequenzen über 2 kHz höher, unter 2 kHz tiefer. Zu kurze Töne lassen keine eindeutige Tonhöhe erkennen. Mehr und stärkere Obertöne (bis 1 kHz) erzeugen einen tieferen Klangeindruck. Die Veränderung der Lautstärke mit der Zeit (Hüllkurve) lassen die Tonhöhe im Ausschwingvorgang subjektiv steigen (Klangfarbenwirkung), die Frequenz aber sinken.

Dies alles beachtend wurde für den Stimmanschlag gefordert:

Beide Töne sollen möglichst ähnlich in Lautstärke, Klangfarbe, Tonhöhe sein und in etwa 2 Sekunden lang erklingen. Dafür ist eine helle Klangfarbe, mf-Anschlag eine kurze Pause zwischen 1. und 2. Ton, ein Abdämpfen nicht beteiligter Saiten und die Verwendung von Leersaiten oder Flageolets von Vorteil. Für ein Stimmen mit Schwebung wird der Ton so lang wie möglich ausgehalten und die Lautstärke auf forte gesteigert.

Gitarrenspezifische Fehlerquellen und unbeabsichtigtes Verziehen und Spannen der Saiten wurde in Abschnitt 2 beleuchtet. Nylon und Carbon haben mittlerweile Darm als Saitenmaterial abgelöst, dennoch bleibt eine häufige Fehlerquelle „kaputte“ und unterschiedliche Saiten.

Das Einrichten des Griffbretts auf die gleichmäßig temperierte Stimmung wurde diskutiert und die Spannungserhöhung beim Greifen thematisiert: Dieser Hiatus wird vom Steg berücksichtigt, einige Stegarten beachten sogar die Unterschiedlichkeit der Saitensteifigkeiten und Saitenlage. Spielt man dagegen eine Leersaite, fällt die Greifspannung weg, und es wird eine geringfügige Sattelkompensation theoretisch nötig, weil der Fehler allerdings sehr klein ist, wird oft darauf verzichtet.

Weniger wegen der Fehleranfälligkeit, sondern eher aus stimmpraktischen Gründen ist eine gute Mechanik (Übersetzungsverhältnis, Leichtgängigkeit) hilfreich.

Mit dem Thema Stimmtone beschäftigt sich Kapitel 3.1, mit dem Ergebnis, einen hohen Stimmtone, am besten von einer anderen Gitarre zu

verwenden. Einerseits wegen des günstigen Hörbereichs, andererseits aufgrund der besseren Vergleichbarkeit von Tönen mit dem selben Teiltonaufbau.

Im folgenden wurden die Reine Stimmung, gleichmäßige und ungleichmäßige Temperatur gegenübergestellt und deren unterschiedliche Intervalle (v.a. Terzen und Quinten) verglichen.

Mittels musiktheoretischer Schriften konnte belegt werden, dass für die Gitarrenliteratur (mit kleinen Einschränkungen) stets die gleichmäßige Temperatur zu verwenden ist. Die praktikable Intervalleinheit Cent wurde eingeführt.

Kapitel 3.3 stellte die gängigen Stimmungsmethoden vor und wog deren Vor- und Nachteile ab: Bei der 5. Bund-Methode stimmt man den Einklang mit gegriffenen Tönen. Diese wurde im Hörversuch erweitert zur Stimmen nach Oktaven. Vorteile sind die einfache Ausführungsweise ohne Korrekturverpflichtung, nachteilig wirkt sich die ungünstige Frequenzauflösung, das Aufsummieren der Fehler (oder bei der Oktaven-Variante stattdessen der Oktavabstand) aus.

Die Quartenstimmung ist mit einem systematischen Fehler von 2 Cent (aus der Differenz reiner zu temperierter Quint) behaftet, der Hörbereich ist ungünstig, im Gesamten ist diese Methode nicht empfehlenswert.

Auch die Einstimmung nach E-Dur wurde schon im Titel zur bloßen Kontrolle degradiert, zu subjektiv ist die Beurteilung einer gleichmäßigen großen Terz.

Die Flageolett-Methode beseitigt viele Nachteile der Vorgänger, allerdings bleiben die Faktoren Differenz rein/temperiert und das Phänomen der Inharmonizität der Teiltöne.

Für die Stimmungsmethode nach Schwebungen war es vorerst nötig, das An- und Abschwellen der Lautstärke an sich zu erklären und dabei auf die Physiologie des Ohres näher einzugehen. Die Frage, ob ein Stimmen der Gitarre mittels Schwebung vorteilhaft sei, wurde erst in der Auswertung des Hörversuchs für die tiefe Lage mit „ja“ beantwortet.

Der Sukzessiv-Test an Gitarre-Studenten zeigte, dass der Durchschnitt einen Unterschied von 3 Cent mit Flageolett-Tönen richtig zuordnen kann. +/- 2 Cent konnten nicht bestätigt, aber auch nicht ausgeschlossen werden, einige Vpn erreichten hier sehr hohe Trefferquoten. Ein Unterschied zwischen hoher und tiefer Lage war nicht nachzuweisen. Die Forced-Choice-Variante bestätigte die vorangegangenen Resultate des Sukzessiv-Tests, ohne dass eine sichere Aussage für die Frequenzunterscheidung auf 2 Cent getroffen werden konnte.

Die Umfrage nach der verwendeten Stimmtechnik brachte eine Präferenz für die Flageolett- und Oktav-Methode (=erweiterte 5. Bund-Methode). Mit Stimmen nach Schwebungen waren die wenigsten aus der Versuchsgruppe vertraut, dementsprechend positiv überraschend waren die Ergebnisse des Simultan-Tests: in tiefer Lage konnten 2 Cent Abweichung vom Einklang unterschieden werden, für die hohe Lage fehlte die nötige Signifikanz für diese Aussage.

In einer Anleitung zum Stimmen der Gitarre wurde die Methode der Schwebungen bevorzugt, pickte sich aber auch Elemente aus Flageolett- und erweiterter 5. Bund-Methode heraus und vereinte ihre Stärken.

Ausblick:

Eine Wiederholung des Simultantests mit Schwebungserfahrenen Gitarristen könnte die 2-Cent-Grenze weiter drücken. Die 2-Tonlagen-Anordnung sollte auf alle möglichen Stimmtöne erweitert werden und so die Lücke zwischen tiefer und hoher Lage schließen.

Die schwer greifbare Größe der Inharmonizität für Gitarrensaiten bedarf genauerer Untersuchungsmethoden, sowie die Tonveränderung im Ausschwingvorgang.

Erweiterungen und Varianten zu den einzelnen Grundtypen der Stimmungsmethoden sind noch zu evaluieren, Einstimmen von Skordaturen zu überlegen, u.v.m.

Es gibt also noch genug zu tun auf dem Weg zur „perfekten Stimmung“

Das Streben nach dem Einklang ist wie die Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur: Je näher man ihm kommen möchte, desto größer wird der Aufwand. Vernachlässigbare Effekte bekommen plötzlich Relevanz, summieren sich, heben sich gegenseitig wieder auf, kurz: die Angelegenheit wird nahe des Nullpunktes (sowohl jener der Intonation als auch der Temperatur) sehr komplex.

Eine Unzahl an Variablen und Kompromissen macht das Stimmen zu einer schier endlosen Sisyphosarbeit, kaum wähnt man sich am Ziel, rollt der Stein auch wieder zu Tal und der Stimmvorgang beginnt aufs Neue.

Ich hoffe, durch diese Prüfungsarbeit den leidgeplagten Gitarristen zumindest einige Wegweiser Richtung Gipfel gesetzt zu haben.

Wie hat es der deutsche Konzertgitarrist MICHAEL TRÖSTER treffend formuliert:

„Eine Gitarre stimmt nie.

Ein Gitarrist immer.“

e1 (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		329,2		
Oktave	658,4	657,7	0,7	1,8
Oktave+Quinte	987,6	985,4	2,2	3,9
Doppeloktave	1316,8	1317,2	-0,4	-0,5

h (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		246,8		
Oktave	493,6	493,2	0,4	1,4
Oktave+Quinte	740,4	739,7	0,7	1,6
Doppeloktave	987,2	985,6	1,6	2,8

g (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		195,4		
Oktave	390,8	390,5	0,3	1,3

Oktave+Quinte	586,2	585,7	0,5	1,5
Doppeloktave	781,6	781	0,6	1,3
d (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		146,7		
Oktave	293,4	293,6	-0,2	-1,2
Oktave+Quinte	440,1	439,7	0,4	1,6
Doppeloktave	586,8	587,1	-0,3	-0,9
A (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		110,1		
Oktave	220,2	219,7	0,5	3,9
Oktave+Quinte	330,3	329,6	0,7	3,7
Doppeloktave	440,4	439,7	0,7	2,8
E (Tröster)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		81,7		
Oktave	163,4	164,7	-1,3	-13,7
Oktave+Quinte	245,1	247,5	-2,4	-16,9
Doppeloktave	326,8	330,1	-3,3	-17,4

Tabelle 5: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 1

e1 (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		328,4		
Oktave	656,8	656,6	0,2	0,5
Oktave+Quinte	985,2	985,4	-0,2	-0,4
Doppeloktave	1313,6	1313,4	0,2	0,3
h (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		246,8		
Oktave	493,6	492,8	0,8	2,8
Oktave+Quinte	740,4	739,4	1	2,3
Doppeloktave	987,2	986,1	1,1	1,9
g (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		195,2		
Oktave	390,4	390,7	-0,3	-1,3
Oktave+Quinte	585,6	586,4	-0,8	-2,4

Doppeloktave	780,8	782	-1,2	-2,7
d (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		146,1		
Oktave	292,2	292,3	-0,1	-0,6
Oktave+Quinte	438,3	438,9	-0,6	-2,4
Doppeloktave	584,4	584,6	-0,2	-0,6
A (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		110,1		
Oktave	220,2	220,2	0	0,0
Oktave+Quinte	330,3	329,2	1,1	5,8
Doppeloktave	440,4	438,6	1,8	7,1
E (Savarez)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		81,9		
Oktave	163,8	163,6	0,2	2,1
Oktave+Quinte	245,7	245,6	0,1	0,7
Doppeloktave	327,6	327,5	0,1	0,5

Tabelle 6: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 2

e1 (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		329,6		
Oktave	659,2	659,1	0,1	0,3
Oktave+Quinte	988,8	987,6	1,2	2,1
Doppeloktave	1318,4	1317,4	1	1,3
h (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		246,8		
Oktave	493,6	493,2	0,4	1,4
Oktave+Quinte	740,4	740,2	0,2	0,5
Doppeloktave	987,2	986,7	0,5	0,9
g (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		195,3		
Oktave	390,6	392	-1,4	-6,2

Oktave+Quinte	585,9	588,3	-2,4	-7,1
Doppeloktave	781,2	784,3	-3,1	-6,9
d (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		147,4		
Oktave	294,8	294,2	0,6	3,5
Oktave+Quinte	442,2	440,9	1,3	5,1
Doppeloktave	589,6	588	1,6	4,7
A (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		109,5		
Oktave	219	219,9	-0,9	-7,1
Oktave+Quinte	328,5	329,6	-1,1	-5,8
Doppeloktave	438	439,6	-1,6	-6,3
E (Augustine)	theoretischer Wert (Hz)	gemessener Wert(Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (Cent)
Grundton		82,4		
Oktave	164,8	164,6	0,2	2,1
Oktave+Quinte	247,2	248,5	-1,3	-9,1
Doppeloktave	329,6	330	-0,4	-2,1

Tabelle 7: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 3

Intervall	Intervall in gleichmäßig temperierter Stimmung (Cent)	Intervall in Reiner Stimmung (Cent)	Unterschied Reiner-gleichmäßig temperierter Stimmung (Cent)
Prime	0	0	0
kl. Sekunde	100	112	-12
gr. Sekunde	200	204	-4
kl. Terz	300	315,6	-15,6

gr. Terz	400	386,3	+13,7
Quarte	500	498	+2
Tritonus	600	603	-3
Quinte	700	702	-2
kl. Sexte	800	813,7	-13,7
gr. Sexte	900	884,4	+15,6
kl. Septime	1000	1017,6	-17,6
gr. Septime	1100	1088	+12
Oktave	1200	1200	0

Tabelle 9: Intervalle in gleichmäßig temperierter und Reiner Stimmung und deren Unterschied in Cent zueinander.

Fragebogen Hörversuch

NAME:
STUDIENSTAND:
DATUM:

hohe Lage**12 Cent**

Bsp.	zu tief	sauber	zu hoch
a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3 Cent

	zu tief	sauber	zu hoch
a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
j)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

verwendete Stimmtechnik? (Mehrfachnennung möglich)

5. Bund-Methode Quartenstimmung Akkordeinstimmung
 Flageolett-Methode Schwebung andere

Anmerkungen:

tiefe Lage**12 Cent**

Bsp.	zu tief	sauber	zu hoch
a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3 Cent

	zu tief	sauber	zu hoch
a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2 Cent

a)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
j)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

HÖRVERSUCH SCHWEBUNG**hohe Lage**

Beurteilungskriterien: 1-5 (Schulnoten: 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, 4 = genügend, 5 = nicht genügend)

A)
B)
C)
D)
E)
F)
G)
H)
I)
J)
K)
L)
M)
N)
O)

tiefe Lage

Beurteilungskriterien: 1-5 (Schulnoten: 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, 4 = genügend, 5 = nicht genügend)

A)
B)
C)
D)
E)
F)
G)
H)
I)
J)
K)
L)
M)
N)
O)

Auflösung Hörversuch:**hohe Lage**

12 Cent: zu hoch, sauber, zu tief, zu tief, sauber

7 Cent: zu hoch, zu tief, sauber, zu hoch, sauber, zu tief

5 Cent: zu tief, sauber, zu hoch, zu hoch, zu tief, zu hoch, sauber

4 Cent: sauber, sauber, zu tief, sauber, zu tief, zu hoch, zu hoch, sauber

3 Cent: zu hoch, zu tief, zu tief, zu hoch, sauber, sauber, sauber, zu hoch

2 Cent: zu tief, sauber, zu hoch, zu hoch, sauber, zu hoch, sauber, zu hoch, zu tief, sauber

tiefe Lage

12 Cent: zu hoch, zu tief, zu hoch, sauber, sauber

7 Cent: zu hoch, zu hoch, sauber, sauber, zu hoch, sauber

5 Cent: sauber, sauber, zu hoch, zu tief, sauber, zu hoch, zu tief

4 Cent: sauber, zu hoch, sauber, sauber, zu tief, sauber, zu hoch, zu tief

3 Cent: zu hoch, zu tief, sauber, zu tief, zu hoch, sauber, zu tief, zu hoch

2 Cent: zu hoch, zu hoch, sauber, zu tief, sauber, sauber, zu hoch, sauber, sauber, zu tief

Hörversuch Schwebung

hohe Lage: 1,5,1,3,2,2,5,1,3,1,1,4,2,5,1

tiefe Lage: 2,4,4,4,3,2,5,3,2,4,1,3,1,1,2

Töne	Frequenz /Hz	Cents	Oktavflageolett	Quintflageolett	Doppeloktavflag.
E	82,41	700	164,81	247,22	329,63
F	87,31	800			
Fis	92,50	900			
G	98,00	1000			
Gis	103,83	1100			
A	110,00		220,00	330,00	440,00
B	116,54	100			
H	123,47	200			
c	130,81	300			
cis	138,59	400			
d	146,83	500	293,66	440,50	587,33
dis	155,56	600			
e	164,81	700			
f	174,61	800			
fis	185,00	900			
g	196,00	1000	392,00	587,99	783,99
gis	207,65	1100			
a	220,00				
b	233,08	100			
h	246,94	200	493,88	740,83	987,77
c1	261,63	300			
cis1	277,18	400			
d1	293,66	500			
dis1	311,13	600			
e1	329,63	700	659,26	988,88	1318,51
f1	349,23	800			
fis1	369,99	900			
g1	392,00	1000			
gis1	415,30	1100			
a	440,00				

Tabelle 9: Gitarrentöne in Frequenzen

hohe Lage:

		richtige Antworten	falsche
Prozente	12 Cent	39	0
	100%		
	7 Cent	53	3
	95%		
	5 Cent	50	8
	86%		
	4 Cent	41	12
	77%		
	3 Cent	47	17
	73%		
	2 Cent	46	31
	60%		

tiefe Lage:

		richtige Antworten	falsche
Prozente	12 Cent	32	4
	83%		
	7 Cent	29	8
	78%		
	5 Cent	44	8
	76%		
	4 Cent	42	7
	77%		
	3 Cent	52	21
	73%		
	2 Cent	38	17
	58%		

Tabelle 10: Auswertung des Sukzessiv-Tests - Forced-Choice-Modus

Zeit /ms	Frequenz /Hz	Abweichung	A (322,9/y1)	B (333,7/y2)	C (344,5/y3)
		in Cent	y1 in dB	y2 in dB	y3 in dB
50	328,84	0,00	-18,56	-18,21	-24,74
150	328,76	-0,42	-17,54	-17,25	-23,74
250	328,78	-0,32	-18,47	-18,17	-24,69
350	328,81	-0,16	-20,47	-20,15	-26,65
450	328,87	0,16	-22,48	-22,12	-28,57
550	328,92	0,42	-24,22	-23,83	-30,27
650	328,86	0,11	-25,58	-25,23	-31,69
750	328,81	-0,16	-26,74	-26,42	-32,91
850	328,81	-0,16	-28,01	-27,69	-34,18
950	328,84	0,00	-29,4	-29,06	-35,54
1050	328,86	0,11	-30,67	-30,32	-36,78
1150	328,85	0,05	-31,65	-31,3	-37,78
1250	328,79	-0,26	-32,34	-32,03	-38,54
1350	328,79	-0,26	-32,84	-32,56	-39,1
1450	328,68	-0,84	-33,55	-33,31	-39,9
1550	328,66	-0,95	-34,44	-34,21	-40,79
1650	328,65	-1,00	-35,61	-35,38	-41,98
1750	328,66	-0,95	-36,96	-36,74	-43,34
1850	328,69	-0,79	-38,61	-38,36	-44,95
1950	328,71	-0,68	-40,32	-40,06	-46,62
2050	328,78	-0,32	-42,14	-41,84	-48,36
2150	328,81	-0,16	-43,98	-43,66	-50,15
2250	328,84	0,00	-45,81	-45,47	-51,95
2350	328,9	0,32	-47,38	-47	-53,43
2450	328,92	0,42	-48,27	-47,88	-54,31
2550	328,84	0,00	-48,85	-48,51	-54,99
2650	328,78	-0,32	-49,13	-48,83	-55,32
2750	328,71	-0,68	-49,43	-49,17	-55,72
2850	328,63	-1,11	-49,87	-49,66	-56,29
2950	328,57	-1,42	-50,52	-50,35	-56,96
3050	328,61	-1,21	-51,49	-51,29	-57,95
3150	328,52	-1,69	-52,48	-52,34	-59,02
3250	328,62	-1,16	-53,94	-53,74	-60,39
3350	328,47	-1,95	-55,81	-55,7	-62,4
3450	328,57	-1,42	-58,18	-57,93	-67,51
3550	328,94	0,53	-60,59	-60,2	-66,43
3650	328,8	-0,21	-62,96	-62,65	-69,02
3750	327,33	-7,97	-65,58	-66,09	-72,26

Tabelle 21: Scheitelfrequenzen aus der Parabolischen Interpolation durch 3 Punkte.

Berechnung der Schwebefrequenzen:

$$[\text{Gl 8}] \quad f_1/f_2 = 2^{x/1200}$$

für 2 Cent Differenz gilt:

$$f_1 = 2^{2/1200} * f_2$$

Die Schwebungsfrequenz ist (Kap. 3.3.5) gegeben durch:

$$|f_1 - f_2| = \Delta f$$

Schritt B) $f_1 = 440 \text{ Hz} \Rightarrow f_2 = 439,5 \text{ Hz}$

d.h. die Einhüllende erreicht alle 2 Sekunden das Maximum an Lautstärke erreicht.

in Metronomzahlen wäre das 30 bpm, bzw. alle 2 Sekunden ein „Whoa“

Schritt C) $f_1 = 330 \text{ Hz} \Rightarrow f_2 = 330,4 \text{ Hz}$

$$\Delta f = 0,4 \text{ Hz} = 24 \text{ bpm}$$

Schritt D) $f_1 = 588 \text{ Hz} \Rightarrow f_2 = 587,3 \text{ Hz}$

$$\Delta f = 0,7 \text{ Hz} = 42 \text{ bpm}$$

Schritt E) $f_1 = 988 \text{ Hz} \Rightarrow f_2 = 986,9 \text{ Hz}$

$$\Delta f = 1,1 \text{ Hz} = 66 \text{ bpm}$$

Literaturverzeichnis

Selbständige Werke

Baines, Anthony: Lexikon der Musikinstrumente. Aus dem Engl. übers. und für die dt. Ausgabe bearb. von Martin Elste. Stuttgart/Kassel, Metzler/Bärenreiter, 1996

Békésy, Georg von: Experiments in hearing. translated and edited by E. G. Wever. New York, Mc Graw-Hill, 1960

Brüderlin, Rene: Akustik für Musiker. Eine Einführung für Lernende, Ausübende und Musikliebhaber. Regensburg, Gustav Bosse, 1978

Denis, Jean: Traité de l'accord de l'épinette. 2. Auflage. Paris, 1650

Fischer, Matthias: Der Intonationstest. Seine Anfänge, seine Ziele, seine Methodik. Europäische Hochschulschriften. Reihe 36, Musikwissenschaft. Bd. 155. Frankfurt am Main/Wien, Lang, 1996

Frosch, Reinhart: Mitteltönig ist schöner!. Studien über Stimmungen von Musikinstrumenten. Bern, Europäischer Verlag der Wissenschaften, 1993

Geller, Doris: Praktische Intonationslehre für Instrumentalisten und Sänger. Mit Übungsteil. Kassel/Basel/London/New York/Prag, Bärenreiter, 1997

Hartung, Joachim/ Elpelt, Bärbel/Klösener, Karl-Heinz: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 9. Aufl. München/Wien, R. Oldenbourg, 1993

Hartung, Joachim/ Heine, Barbara: Statistik-Übungen. Deskriptive Statistik. 6. Aufl. München/Wien, R. Oldenbourg, 1999

Jahnel, Franz: Die Gitarre und ihr Bau. 3. Aufl. Frankfurt/Main, Das Musikinstrument, 1977

Krengel, Ulrich: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik. 8 Aufl. Wiesbaden, Vieweg, 2005

Le Blanc, Hubert: Defense de la basse de Viole. Amsterdam, 1740

Lindley, Mark: Lauten, Gamben & Stimmungen. Wilsingen, Tre Fontane, 1990.

Meyer, Erwin/ Neumann, Ernst-Georg: Physikalische und Technische Akustik. Eine Einführung mit zahlreichen Versuchsbeschreibungen. 2.,

berichtigte und erweiterte Auflage. Braunschweig, Friedr. Vieweg + Sohn, 1974

Meyer, Jürgen: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten. Frankfurt/Main, Das Musikinstrument, 1972

Mersenne, Marin: Nouvelles observations physiques et mathematiques (Anhang zu Harmonie universelle). Bd. III. Paris, 1637

Pierce, John R.: Klang. Musik mit den Ohren der Physik. Aus d. Amerikan. übers. von Klaus Winkler. Heidelberg, Spektrum der Wissenschaft, 1985.

Pinksterboer, Hugo: Pocket-Info. Akustische Gitarre, Mainz: Schott, 2000

Roederer, Juan G.: Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik. Berlin/Heidelberg, Springer, 1977

Rossing, Thomas D: The science of sound. Reprinted with corrections. Reading/Menlo Park/London/Amsterdam/Sydney, Addison-Wesley, 1983

Vincentino, Nicola: L'antica musica ridotta alla moderna prattica. Rom, 1555

Warnke, Krista/Reinecke, Hans-Peter/Droysen, Dagmar: Experimentelle Untersuchung zur Tonhöhenwahrnehmung. VIII. Köln, Arno Volk, 1976

Witoszynskyj, Leo: Cantabile e ritmico. Über die Kunst des Gitarrespiels. Wien, Doblinger, 2003

Zwicker, E./ Fastl, Hugo: Psychoacoustics. Facts and Models. Berlin/Heidelberg, Springer, 1990

Unselbstständige/Zeitschriften/Noten/Skripten

Carulli, Ferdinand: Gitarre-Schule. Neu bearb. u. erweitert von Jos. Kreml. Wien, Universal-Edition

Fletcher, Neville. H.: Nonlinear dynamics and chaos in musical instruments. in: Green, D.G Bossomaier (Hrsg) *Complex systems: from biology to computation*, Amsterdam, IOS Press, 1993, S. 106-17

Haynes, Bruce: Stimmton. übers. v. Thomas M. Höpfner. in: Fischer, Ludwig (Hrsg): Die Musik in Geschichte und Gegenwart. Allgemeine Enzyklopädie der Musik. begründet von Friedrich Blume. 2., neubearb.

Ausgabe. Sachteil 8. Quer-Swi. Kassel/Basel/London/New York/Prag, Bärenreiter, 1998, S. 1813-1831

Höldrich, Robert: Akustik der Musikinstrumente. Teil 1+2. Graz. Vorlesungsskriptum Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 1994

Järveläinen, Hanna: Applying perceptual knowledge in string instrument synthesis . in: Proc. MOSART Workshop on current research directions in computer music. Barcelona 2001, S. 187-195

Järveläinen, Hanna/Välimäki, Vesa: Audibility of initial pitch glides in string instrument sounds. In: Proceedings Int. Computer Music Conf. ICMC01. Havana, 2001, S. 282-285

Klickstein, Gerald: Tuning the guitar. in: American String Teacher. Summer 1993 Vol. XLIII, No. 3. Dallas S. 55-59

Klößner, Dieter: Gitarre. Das heutige Instrument, in: Fischer, Ludwig (Hrsg): Die Musik in Geschichte und Gegenwart. Allgemeine Enzyklopädie der Musik. begründet von Friedrich Blume. 2., neubearb. Ausgabe. Sachteil 3. Eng-Hamb. Kassel/Basel/London/New York/Prag, Bärenreiter, 1995, S. 1330-1334

Meyer, Jürgen: Gitarre. Akustik, in: Fischer, Ludwig (Hrsg): Die Musik in Geschichte und Gegenwart. Allgemeine Enzyklopädie der Musik. begründet von Friedrich Blume. 2., neubearb. Ausgabe. Sachteil 3. Eng-Hamb. Kassel/Basel/London/New York/Prag, Bärenreiter, 1995, S. 1368-1374

Stenzel, Sebastian: Verbesserung der Intonation und Bespielbarkeit von Gitarrengriffbrettern. in: Gitarre & Laute 5/1997, S. 15f

Internetquellen

1. <http://schreier.free.fr/pages/physik/musik/papers/schwingungslehre.pdf>
2. <http://www.musica.at/musiklehre/gesamt.htm>
3. http://www.pepiderzweite.de/pageID_1108049.html
4. <http://www.chouard.de/>
5. Gross R./Marx A: URL: www.wmi.badw.de/E23/lehre/skript/Physik1/Gross_Physik_I_Kap_4.pdf

-
6. Järveläinen, Hanna: Applying perceptual knowledge to string instrument synthesis. URL: <http://www.iaa.upf.es/mtg/mosart/papers/p09.pdf>
 7. Järveläinen, Hanna/Välimäki, Vesa: Audibility of Initial Pitch Glides in String Instrument Sounds. URL: <http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512263149/article3.pdf> 2001
 8. Fletcher, Neville H.: Nonlinear Dynamics and Chaos in Musical Instruments. <http://www.complexity.org.au/ci/vol01/fletch01/html/> 1994
 9. <http://www.experimentalchemie.de/02-e-06.htm>
 10. http://de.wikibooks.org/wiki/Gitarre:_Saiten
 11. <http://eco.psy.ruhr-uni-bochum.de/download/AllgPsy1/Einfuhr7/Einfue7.pdf>

Abbildungen

- ABBILDUNG 1: schematische Darstellung der ersten fünf Schwingungsformen einer Saite
 ABBILDUNG 2: Teilton-Reihe über C
 ABBILDUNG 3: Steifigkeit von idealer und realer Saite
 ABBILDUNG 3A: ideale Saite
 ABBILDUNG 3B: reale Saite
 ABBILDUNG 4: Kurven gleicher Lautstärkenempfindung
 ABBILDUNG 5: Pitch shift eines Sinustones als Funktion des Schalldrucks
 ABBILDUNG 6: Frequenzunterscheidung von Sinustönen bei kurzen Dauern
 ABBILDUNG 7: Relativer Frequenzunterschied eines komplexen Tones im Vergleich mit einem Sinustones der selben Tonhöhe
 ABBILDUNG 8: Schema einer Hüllkurve
 ABBILDUNG 9: oben: Wellenform eines Einzeltones auf der E-Gitarre, unten: Absinken der Frequenz mit fortschreitender Zeit
 ABBILDUNG 10: Abweichungen der Frequenz im Laufe eines Gitarrentones ($e^1=328,84$ Hz)
 ABBILDUNG 11: Schematische Darstellung eines Griffbretts von der Seite
 ABBILDUNG 12: unterbrochener Steg
 ABBILDUNG 13: Schräger Steg
 ABBILDUNG 14: Schräge, zweiteilige Steg-Konstruktion
 ABBILDUNG 15: Sattelkompensation für die 3. Saite
 ABBILDUNG 16: Keilförmige Sattelkompensation
 ABBILDUNG 17: Frequenzverhältnisse zwischen den einzelnen Noten in der reinen Stimmung
 ABBILDUNG 18: Schwebungseffekt zweier ähnlicher Frequenzen
 ABBILDUNG 19: Schema der menschlichen Schnecke (Innenohr)
 ABBILDUNG 20: Ergebnis des Sukzessiv-Test in hoher Lage
 ABBILDUNG 21: Ergebnis des Sukzessiv-Test in tiefer Lage
 ABBILDUNG 22: Prozentuelle Ergebnisse der Forced-Choice-Variante in hoher Lage
 ABBILDUNG 23: Prozentuelle Ergebnisse der Forced-Choice-Variante in tiefer Lage

Tabellen

- TABELLE 1: Der kleinste erkennbare Frequenzunterschied für Sinuswellen in Cent
 TABELLE 2: Natur- und Kunststoff-Fasern im Vergleich
 TABELLE 3: Theoretisch berechnete Cent-Abweichungen in Hertz mit tatsächlich eingestimmten Frequenzen in hoher Lage
 TABELLE 4: Theoretisch berechnete Cent-Abweichungen in Hertz mit tatsächlich eingestimmten Frequenzen in tiefer Lage
 TABELLE 5: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 1
 TABELLE 6: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 2
 TABELLE 7: Inharmonizitätsmessung Saitentyp 3
 TABELLE 8: Intervalle in gleichmäßig temperierter und Reiner Stimmung und deren Unterschied in Cent zueinander
 TABELLE 9: Gitarrentöne in Frequenzen
 TABELLE 10: Auswertung des Sukzessiv-Tests im Forced-Choice-Modus
 TABELLE 11: Schwebungsbeurteilung bei 0 Cent Abweichung in hoher Lage
 TABELLE 12: Schwebungsbeurteilung bei 2 Cent Abweichung in hoher Lage
 TABELLE 13: Schwebungsbeurteilung bei 4 Cent Abweichung in hoher Lage
 TABELLE 14: Schwebungsbeurteilung bei 7 Cent Abweichung in hoher Lage
 TABELLE 15: Schwebungsbeurteilung bei 12 Cent Abweichung in hoher Lage
 TABELLE 16: Schwebungsbeurteilung bei 0 Cent Abweichung in tiefer Lage
 TABELLE 17: Schwebungsbeurteilung bei 2 Cent Abweichung in tiefer Lage
 TABELLE 18: Schwebungsbeurteilung bei 4 Cent Abweichung in tiefer Lage
 TABELLE 19: Schwebungsbeurteilung bei 7 Cent Abweichung in tiefer Lage
 TABELLE 20: Schwebungsbeurteilung bei 12 Cent Abweichung in tiefer Lage
 TABELLE 21: Scheitelfrequenzen aus der Parabolischen Interpolation durch 3 Punkte

CD-Inhalte

\

Fehler beim Stimmen der Gitarre.doc	Gesamte Diplomarbeit als Word-Dokument
Fehler beim Stimmen der Gitarre.pdf	Gesamte Diplomarbeit als PDF-File
CD-Inhalte	auf der CD gespeicherte Dateien

\Hörversuch

Fragebogen Hörversuch.doc	
Auflösung Hörversuch.doc	
Versuchspersonen wurde gesagt.doc	Infos vorm Hörtest

\Hörversuch\Seite 1_2

Bsp 12 Cent (hohe Lage).wav	Testbeispiele für Sukzessiv-Test (Fragebogen Seite 1, 2) in hoher Lage
Bsp 7 Cent (hohe Lage).wav	
Bsp 5 Cent (hohe Lage).wav	
Bsp 4 Cent (hohe Lage).wav	
Bsp 3 Cent (hohe Lage).wav	
Bsp 2 Cent (hohe Lage).wav	
Demonstrationsbeispiele.wav	Hörbeispiele für Sukzessiv-Test zum Eingewöhnen

\Hörversuch\Seite 3_4

Bsp 12 Cent (tiefe Lage).wav	Testbeispiele für Sukzessiv-Test (Fragebogen Seite 3, 4) in tiefer Lage
Bsp 7 Cent (tiefe Lage).wav	
Bsp 5 Cent (tiefe Lage).wav	
Bsp 4 Cent (tiefe Lage).wav	
Bsp 3 Cent (tiefe Lage).wav	
Bsp 2 Cent (tiefe Lage).wav	

\Hörversuch\Seite 5

Demonstration Schwebung.wav	Hörbeispiele zum Eingewöhnen von Schwebung
Bsp Schwebung hoch.wav	Testbeispiele für Simultan-Test in hoher Lage
Bsp Schwebung tief.wav	Testbeispiele für Simultan-Test in tiefer Lage

Internet-Sites

Datei-Name (*.pdf)	Nummer im Literaturverzeichnis
Schwingungslehre	1
www.musiklehre.at	2
www.pepiderzweite.de	3
www.chouard.de	4
Gross_Physik_I_Kap_4	5
p09	6
article3	7
www.complexity.org.au	8
www.experimentalchemie.de	9
de.wikibooks.org	10
Einfue7	11

Aufnahmen

Schwebung 220_221.wav	Beispiel einer (Sinuston-)Schwebung zweier Töne mit den Frequenzen 220 Hz und 221 Hz
Schwebung 440_442.wav	Beispiel einer (Sinuston-)Schwebung zweier Töne mit den Frequenzen 440 Hz und 442 Hz
Rauhigkeit 440_455.wav	Hörbeispiel eines „rauen“ Klanges zweier Töne mit den Frequenzen 440 Hz und 455 Hz
Zweitonerlebnis 440_470.wav	Hörbeispiel zweier getrennt erkennbarer Töne mit den Frequenzen 440 Hz und 470 Hz
Tröster_Saiten.wav	Töne für Inharmonizitätsmessung
Savarez_Saiten.wav	Töne für Inharmonizitätsmessung und Hörtest
Augustine_Saiten.wav	Töne für Inharmonizitätsmessung