

# Charakterisierung musikalischer Klänge mittels psychoakustischer Größen

Gunter Ziegenhals

*Institut für Musikinstrumentenbau (IfM), Zwota; Email: [post@ifm-zwota.de](mailto:post@ifm-zwota.de)*

## Einleitung

Die Analyse der akustischen Eigenschaften von Musikinstrumenten erfolgt völlig analog zu Untersuchungen bzgl. einer Lärmsituationen mit der Zielstellung, Entscheidungen abzuleiten. Dabei kann es um einen Wettbewerb, eine Auftragserteilung, eine Kaufentscheidung oder auch die Bewertung einer technologischen Veränderung gehen. In der Regel sind die Entscheidungsträger „Nicht – Akustiker“, die sich gern auf einfach zu vergleichende Einzahlwerte stützen.

Der von einem Musikinstrument ausgehende Schall ruft beim Menschen Empfindungen hervor, die im wesentlichen auf die Eigenschaften Tonhöhe und Klang des Schallsignals zurückgeführt werden können. Die von einem Instrument produzierte Tonhöhe lässt sich für die meisten Instrumente recht einfach mit einem handelsüblichen Stimmgerät feststellen. Aus den Stimmungswerten aller Töne des Instrumentes kann man z.B. die mittlere Stimmung sowie die Standardabweichung der Stimmung als zwei aussagefähige Einzahlwerte ermitteln. Auch für Klangbewertungen gibt es Verfahren, die im Ergebnis Einzahlwerte liefern, z.B. [1], [2]. Den üblichen Verfahren ist gemeinsam, dass sie ohne Musiker arbeiten, da dieser einen großen Einfluss auf den erzeugten Schall ausüben kann. Die Daten werden über künstliche Erregung (Übertragungskurvenmessung, Anschlagvorrichtung, Gebläse u.a.) gewonnen. Nun realisiert sich der Klang eines Instrumentes weder in der künstlichen Erregung noch im Einzeltonanspiel, sondern in Tonfolgen und Akkorden unter deutlichem Einfluss des Spielers. Die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen sollten klären helfen, ob und in welchem Maße mit den verfügbaren Werkzeugen der Psychoakustik der Klang von real gespielten Einzelinstrumenten in kurzen Musikstücken beurteilt werden kann.

## Instrumente und Melodieanspiele

Unsere grundlegende Methodik bei der Untersuchung von Schallereignissen in Zusammenhang mit Musikinstrumenten besteht darin, zunächst die Ereignisse auf DAT aufzuzeichnen und anschließend diese Klangdatensätze verschiedenen Messungen zu unterziehen. Handelt es sich um Zupf- und Streichinstrumente wird parallel die Frequenzkurve aufgenommen, bei Blasinstrumenten die Eingangsimpedanzverläufe. In die vorliegenden Untersuchungen waren folgende Instrumente einbezogen. Es handelt sich jeweils um Fabrikate verschiedener Bauart und Hersteller:

- 10 Westerngitarren, zwei Melodieanspiele
- 10 Klassikgitarren, Referenzgitarren des IfM, ein Melodieanspiel.
- 5 Lauten + 1 Referenzgitarre, ein Melodieanspiel,
- 2 Zistern, ein Melodieanspiel
- 5 Bandonions, zwei Melodieanspiele
- 1 Violine mit vier verschiedenen Stegen, ein Melodieanspiel

Bei den vier Stegen handelt es sich um den Originalsteg des Instrumentes, zwei nach diesem gefertigte Muster aus PVC bzw. Aluminium und ein nur teilweise ausgearbeiteter Rohling „Einauge“.

Die Musikstücke wählten die beteiligten Musiker nach folgenden Vorgaben aus: Die Zeitdauer soll 20..30 s betragen; das Stück soll nach Meinung des Musikers das Instrument möglichst umfassend charakterisieren. Er sollte es beim schnellen Antesten typischerweise verwenden. Die Aufnahmen erfolgten im reflexionsarmen Raum des IfM. Als Aufnahmemikrofon diente ein Kunstkopf. Spieler und Kunstkopf saßen sich in 1m Abstand gegenüber. Der Kunstkopf wurde auf die Höhe einer sitzenden Person eingestellt.

## Auswertung

Mit einer CF90 von CORTEX wurden mit den darin implementierten Algorithmen die Größen Lautheit (in sone), Schärfe (in deziacum), Rauigkeit (centi-Asper) und Schwankungsstärke (in centi-Vacil) jeweils als Mittelwerte über die Anspiele berechnet. Tabelle 1 stellt einen Teil der Ergebnisse zusammengefasst dar.

Betrachten wir zunächst die Ergebnisse der Violinenanspiele. Die verschiedenen Stege stellen doch recht große Eingriffe in das Instrument dar. Dennoch sind die gefundenen Unterschiede relativ gering. Es lassen sich aber Aussagen ableiten, die mit subjektiven Wahrnehmungen gut übereinstimmen: 1. Der Originalsteg ist eindeutig der lauteste, der Aluminium-Steg der leiseste. 2. PVC- und Aluminium-Steg fallen in der Schärfe deutlich ab. Die Differenzierung zwischen PVC- und Aluminium-Steg ist nicht eindeutig. Manche Probanden empfinden den Aluminium-Steg als dumpfer, weniger scharf. 3. Die sich andeutende geringfügige Differenzierung in Bezug auf die Rauigkeit widerspiegelt sich nicht eindeutig in Hörversuchen.

Die Daten wurden nun nach folgenden Gesichtspunkten analysiert: 1. Welches sind die wesentlichen Quellen der einzelnen Größen im Musikstück? Dabei wurden nicht mehr die mittleren Größen, sondern der Verlauf über die Stücke betrachtet. 2. Ergeben sich Korrelationen zwischen den Musikstücken, d.h. beschreiben Unterschiede die Instrumente oder die Stücke? 3. Zeigen sich bei den Zupfinstrumenten Zusammenhänge zu den Ergebnissen der Frequenzkurvenanalyse?

**Fluktuationen** entstehen infolge der zeitlichen Abfolge der Noten, also dem Rhythmus des Stückes. In geringem Maße bilden sie sich bei lang angehaltenen Akkorden infolge von Überlagerungen der Akkordtöne. Korrelationen zwischen den Musikstücken bestehen nicht.

**Rauhigkeiten** entstehen ebenfalls infolge der zeitlichen Abfolge der Noten, also dem Rhythmus des Stückes. Weiterhin verursachen Spielgeräusche, wie das Pfeifen beim Gleiten der Finger über die Saiten, erhebliche Rauhigkeiten. Letztlich sind auch gehaltene Akkorde Quellen. Korrelationen zwischen den Musikstücken bestehen nicht.

Bei Rauhigkeiten und Fluktuationen dominiert offensichtlich der Einfluss des Musikstückes. Sie sind also nicht für die Beurteilung der Instrumente in Musikstücken geeignet.

Rhythmus und Melodie zeichnen sich natürlich ebenfalls im Zeitverlauf von **Lautheit** und **Schärfe** ab. Quellen für Schärfe und Lautheit sind aber insbesondere die Klänge der Instrumente. Für das Bandonion finden wir für Schärfe und Lautheit eindeutige

Korrelationen zwischen den Musikstücken. Daraus folgt, dass hier beide Größen definitiv durch die Instrumente und nicht das Stück geprägt sind, auch wenn jeweils die mittleren Werte kompositionsbedingt verschoben sind. Bei den Gitarren finden wir diese Korrelation nicht. Im Falle der Schärfe nehmen wir als wesentliche Ursache an, dass der für die Schärfe bedeutende Anteil der hohen Frequenzen im Klang bei Gitarren deutlich geringer ausgeprägt ist als bei den Zungeninstrumenten. Die Erfahrungen der Frequenzkurvenanalysen zeigen, dass der Gesamtübertragungspegel innerhalb von Gitarren gleicher Bauart nur sehr wenig schwankt, die Differenzierungen aus Verschiebungen zwischen den einzelnen Frequenzbereichen, insbesondere in den tieferen Regionen resultieren.

Instr.	MS	N/sonne	S / da	R / cA	F / cV
WG 1	1	15,7	7,5	22	83
WG 2	1	14,5	8,1	19	97
WG 3	1	13,0	7,7	20	80
WG 4	1	14,2	7,5	18	86
WG 5	1	12,2	7,3	18	86
WG 6	1	10,7	7,7	20	87
WG 7	1	13,2	8,3	18	79
WG 8	1	12,8	8,2	19	93
WG 9	1	11,7	7,5	17	67
WG 10	1	10,7	8,0	20	72
WG 1	2	11,0	7,5	14	59
WG 2	2	8,5	7,9	15	62
WG 3	2	8,6	7,2	12	61
WG 4	2	10,2	7,5	13	63
WG 5	2	9,8	7,6	14	64
WG 6	2	8,2	7,9	8	59
WG 7	2	8,6	7,4	15	63
WG 8	2	9,0	8,2	16	62
WG 9	2	7,6	6,8	11	57
WG 10	2	8,6	7,5	12	61
Band. 1	1	17,4	11,6	57	346
Band. 2	1	19,8	11,4	48	324
Band. 3	1	19,9	11,9	60	306
Band. 4	1	17,5	11,2	54	325
Band. 5	1	12,8	10,7	44	359
Band. 1	2	19,5	12,2	31	119
Band. 2	2	23,3	12,1	25	132
Band. 3	2	22,7	12,4	26	106
Band. 4	2	20,8	11,8	25	113
Band. 5	2	12,0	11,1	36	110
PVC	Steg	16,1	14,8	9	48
Einauge	Steg	16,1	16,1	8	54
Orig.	Steg	18,6	16,6	7	52
Alu	Steg	15,2	15,6	9	56

**Tabelle 1 : Psychoakustikdaten der Instrumente gemittelt über die Musikstücke**

Aus diesen Ergebnissen ergibt sich die Folgerung, dass die traditionellen psychoakustischen Größen für eine hinreichende Differenzierung von Instrumenten gleichen Typs in Melodieanspielen zwar eine Reihe von Ansätzen bieten, insgesamt aber nicht ausreichend sind.

In der Frequenzkurvenanalyse arbeiten wir im unteren und mittleren Frequenzbereich mit zwei stabilen Merkmalen: Die mittlere Übertragung um 1 kHz liefert ein gutes Maß für die Klarheit des Klanges der Instrumente. Die mittlere Übertragung unter 400 Hz insbesondere unterhalb 200 Hz beschreibt gut das Volumen bzw. den Baßbereich der Instrumente. VALENZUELA [3] kreierte im Ergebnis von Klang und Höranalysen das Offenheitsmaß, das ebenfalls den Bereich um 1 kHz besonders beachtet. Als Beschrei-

bung für den Volumeneindruck gibt TERHARDT [4] an, dass dieser mit sinkender Frequenz und wachsendem Pegel steigt. Die durchgeführten Analysen lieferten als Zwischenwerte immer auch die spezifischen Lautheiten  $N'$  der Signale. Wir ermittelten aus diesen ein Maß für die Offenheit, mit einem vereinfachten Algorithmus nach [3]. Ein Maß für das Klangvolumen wurde durch Summation der spezifischen Lautheiten ab 400 Hz nach unten mit der Gewichtsfunktion nach Gleichung 1 berechnet.

$$g_{Vol}(z) = 30 \exp(-z / \text{Bark}) \quad \text{Gleichung 1}$$

Instr.	N/sonne	S / da	Volumen	Offenh.
Laute 1	5,4	6,8	2,7	1,5
Laute 2	5,6	6,6	3,1	1,5
Laute 3	5,3	6,7	2,9	1,5
Laute 4	5,7	6,8	2,9	1,7
Laute 5	4,9	7,0	2	1,5
Git. 3	5,5	6,6	4,9	1,4

**Tabelle 2: Erweiterte Psychoakustikdaten - Beispiel Laute**

In Tabelle 2 sind Lautheit, Schärfe, Volumen und Offenheit für das Lautenanspiel dargestellt. Zu den fünf Lauten kam eine Klassikgitarre hinzu. Man sieht, dass man nur mit Lautheit und Schärfe die Gitarre nicht von den Lauten trennen kann, obwohl der Unterschied deutlich hörbar ist. Auch die Differenzierung innerhalb der Lauten ist unter Hinzunahme der neuen Größen besser. Es zeigt sich ferner, dass für Gitarren die Offenheit gut mit der aus den Frequenzkurven gewonnenen Klarheit korreliert.

### Zusammenfassung

Die dargelegten Untersuchungen sollten zeigen, ob die traditionellen vier Psychoakustikmerkmale, die wie immer wieder in der Literatur betont, für technische Geräusche entwickelt wurden, den Klang von Musikinstrumenten in Melodieanspielen differenzierend beschreiben können. Schwankungsstärke und Rauigkeit erwiesen sich als ungeeignet. Lautheit und Schärfe liefern verwertbare Beiträge, doch erst die Hinzunahme zweier weiterer Merkmale bringt eine hinreichende Differenzierungsmöglichkeit. Eines der neuen Merkmale ist die Offenheit. Sie ist bereits definiert. Ein zweites neues Merkmal, das Volumen, beschreibt vorrangig den Einfluss des unteren Frequenzbereiches. Ein Ansatz zur Berechnung des Volumen-Merkmals wird genannt, doch muss dieser zweifellos noch über weitere subjektive Tests angepasst werden.

Andere Versuche ergaben, dass Schwankungsstärke und Rauigkeit bei der Untersuchung von nicht perkussiven Einzeltönen, wie bei Zungeninstrumenten, brauchbare Aussagen zum Klangeindruck liefern.

- [1] Ziegenhals, G.: Zur objektiven Beurteilung von Klavieren Fortschritte der Akustik DAGA 2002
- [2] Ziegenhals, G.: Beurteilung objektiver Merkmale von Musikinstrumenten Fortschritte der Akustik DAGA 2000
- [3] Valenzuela, M.: Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Klangqualität von Klaviertönen Diss. TU München 1998
- [4] Terhardt, E.: Akustische Kommunikation Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1998

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.