BEURTEILUNG VON KLAVIEREN ANHAND MESSTECHNISCH GEWONNENER MERKMALE

Gunter Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau, Zwota
post@ifm-zwota.de

Kurzfassung: Zwei Stichproben von Klavieren (16 und 22 Instrumente) wurden anhand messtechnisch gewonnener Merkmale bewertet. Die Untersuchung der beiden Stichproben erfolgte innerhalb unabhängiger Projekte, in einem zeitlichen Abstand von sechs Jahren jedoch nach einem prinzipiell gleichen Verfahren. Neben den messtechnisch gestützten Untersuchungen fanden jeweils sehr aufwendige Bewertungen mit Musikern sowohl als Hör- als auch als Spieltests statt. Als Primärdatensatz für die akustischen Untersuchungen dienten DAT-Aufzeichnungen von Einzeltonanspielen. Der Tastenanschlag erfolgte mit einer pneumatischen Vorrichtung. Die Aufnahmemikrofone mussten im Nahfeld der Instrumente platziert werden.

1 Einleitung

Im Rahmen von Auftragsmessungen erfolgten in den Jahren 1995 und 2001 durch das Institut für Musikinstrumentenbau, Zwota (IfM) Untersuchungen an zwei Stichproben von Klavieren (Stichprobe 1: 9 Pianos, 4 E-Pianos, 3 Flügel; Stichprobe 2: 17 Pianos, 5 E-Pianos). Ziel der Arbeiten war eine vergleichende Bewertung der Instrumente. Nach Abschluss des Projektes ergab sich die Möglichkeit, die angefallenen Daten nach neuen Gesichtspunkten zu analysieren und die ursprünglich gewählte Verfahrensweise kritisch zu überprüfen. Diese Arbeiten bilden die Grundlage dieses Beitrages.
Im Rahmen der Untersuchungen wurden neben akustischen Merkmalen auch spieltechnische Aspekte wie Tastenniederdruckkraft, Stimmhaltung, Repetitionsfähigkeit u. a. betrachtet. Im Rahmen dieses Beitrages sollen aber nur die akustischen Messungen und deren Ergebnisse diskutiert werden.

2 Rohdatenerfassung

Die im Folgenden beschriebenen Methoden zur Rohdatenerfassung stellen im Wesentlichen eine Weiterentwicklung der Arbeiten von LIEBER im IfM bis 1984 dar. Entsprechende Hinweise zur Literatur findet man in ZIEGENHALS (2002).
Die Arbeiten waren in ein sehr eng terminiertes Gesamtpaket von Untersuchungen eingebunden. Dadurch stand nur sehr wenig Zeit für die Messungen an den Objekten zur Verfügung. Eine sofortige Auswertung der Messungen kam nicht in Frage und so entschlossen wir uns, vor Ort nur definierte Einzeltonanschläge aufzuzeichnen und die Analyse und Auswertung im IfM später „vom Band“ vorzunehmen. Die Instrumente befanden sich jeweils alle in einem größeren Raum, in dem neben unseren messtechnisch gestützten Untersuchungen auch die Spieltests der Musiker stattfanden. Bei den Räumen handelte es sich zum einen um eines größeren Seminarraum, zum andern um eine Art kleinen Konzertsaal im Dachboden eines Bauernhauses. Den letzteren zeigt Abbildung 1. Beide Räume wiesen eine nicht vernachlässigbare äußere Geräuschumgebung auf. Während der Seminarraum durch eine vorbei führende Straße akustisch belastet war, lag das Bauernhaus im Bereich der Einflugschneise eines Großflugplatzes. Es gab deshalb keine Alternative als dass Messmikrofon im Nahfeld der Instrumente zu positionieren. Wir wählten als Mikrofonstandort eine Position 50 cm über dem Zentrum, der beim vollständigen Öffnen des Deckels entstehenden offenen Fläche. Einteilige Deckel wurden komplett abgenommen.

Das Anschlagen der Tasten geschah mittels einfach wirkenden pneumatischen Arbeitszylindern. Das Positionieren der Arbeitszylinder und das Auslösen der Anschläge erfolgten manuell. Um eine konstante Kraft über den gesamten Anschlag zu erreichen, wurde die Rückholfeder aus den Arbeitszylindern entfernt. Im Ruhezustand sitzt die Kolbenstange 4 mm von der Vorderkante entfernt auf der Taste auf. Aufgezeichnet wurde bei folgenden Anschlagstärken:

Abbildung 1: Einer der beiden Räume zur Datenerfassung

- Anschlagkraft ≈ 2 N entspricht Anschlagdynamik ***p (piano)***
- Anschlagkraft ≈ 3 N entspricht Anschlagdynamik ***mf (mezzo forte)***
- Anschlagkraft ≈ 7,5 N entspricht Anschlagdynamik ***f (forte).***

Für das Einstellen der Anschlagkräfte wurden verschiedene Arbeitszylinder (Abbildung 2, Bildmitte), sowie variierende Arbeitsdrücke eingesetzt. Die Zuordnung der Anschlagkräfte zu den Dynamikstufen entstand im Ergebnis von Vergleichsversuchen mit Musikern. Pro Ton und Anschlagstärke zeichneten wir jeweils drei Anschläge auf. Die Lautstärkeregler der Elektropianos wurden so eingestellt, dass bei ***mf***-Anschlag des Tones a^1 am Ort des Messmikrofons der mittlere Schalldruckpegel der entsprechenden Anschläge auf den traditionellen Pianos entstand.

Tests des Messregimes im IfM zeigten, dass unter Berücksichtigung aller erforderlichen Messungen die vor Ort verfügbare Zeit nicht für die Aufzeichnung aller jeweils 88 Töne der Klaviere ausreichen würde. Wir mussten deshalb entscheiden, nur die Hälfte der 88 Töne des Klaviers in die Messungen einzubeziehen und zwar die Töne a, b, h, c, $c^{\#}$ und d aller auf dem Klavier vorhandenen Oktaven, wobei jedoch die beiden höchsten Töne (h^4 und c^5) nicht betrachtet wurden. Die Wahl fiel deshalb auf diese nebeneinander liegenden Halbtöne und nicht auf gleichmäßig über die Oktave verteilte Töne, da mehrere Merkmale aus der Differenz von Ton zu Ton gewonnen werden. Als Aufnahmemikrofon diente ein 1‘‘-Messmikrofon MK/MV 102 der Firma Mikrotech Gefell GmbH. Die Aufnahmekette war absolut kalibriert. Aufgezeichnet wurde auf DAT mittels DAT-Decks Pioneer D-07 im DAT-Standard (48 kHz, 16 bit). Um Raumeinflüsse in Grenzen zu halten, wurden die Klaviere für die Aufnahmen jeweils zu einer Gruppe in den Bereich der Raummitte verschoben. Während der ersten Untersuchungsreihe erfassten wir während der Aufnahmen mit einem parallel geschalteten Schallpegelmesser $L_{(A,F)max}$ manuell für jeden Anschlag. Die Listen mit den $L_{(A,F)max}$-Werten sowie die DAT-Bänder mit den Klangaufzeichnungen (im Falle der zweiten Untersuchungsreihe nur die DAT-Bänder) stellen die Rohdaten unserer Untersuchungen dar. Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit wurden nach Abschluss der Aufnahmen und Abbau der Vorrichtungen diese erneut aufgebaut kalibriert und ein Messwert- bzw. Aufnahmesatz, verteilt auf zwei Instrumente, erneut aufgenommen.

Abbildung 2: Anschlagvorrichtung

3 Kreieren von Merkmalen und gewinnen der Merkmalswerte

Die Auswertung der Daten der Messreihen an beiden Stichproben erfolgten zwar prinzipiell nach gleichem Verfahren, jedoch kam es infolge des Abstandes von sechs Jahren verbunden mit Erkenntnis- und Gerätezuwachs zu gewissen Modifikationen in der Auswertung.
Für die Ermittlung eines Teils der Merkmale unterteilten wir den Tonumfang des Klaviers in zwei Bereiche B (B = 1,2):

- Bereich 1 (Bassbereich): $A_2 – g^{\#1}$
- Bereich 2 (Diskantbereich): a^1 - c^5.

Bei der Messreihe mit Stichprobe 1 stützten wir die Merkmale zu Lautstärke und Dynamik auf die Messungen des maximalen (A,F)-bewerteten Schalldruckpegels $L_{max}(A,F)_{D,i,j}$ pro Dynamikstufe D, Ton i und Anschlag j. Die Merkmale und die Gewinnung von Werten im Falle Stichprobe 1 ist ausführlich in ZIEGENHALS (2002) einschließlich Hinweisen zur Literatur beschrieben. Lediglich das Merkmal „mittlerer Pegelabfall“ $L_{Abf.,2,D}$ im Diskantbereich (B = 2) für D = ***p***, ***f*** wird nur benannt. Wir gewinnen dieses Merkmal nach LIEBER über eine lineare Regression anhand folgender Gleichung:

$$L_{max}(A,F)_{D,i,B=2} = L_{Abf.,2,D} * x + \text{Konstante}$$

Dabei ist x die jeweilige Anzahl der Halbtonschritte im Bereich 2 für den betrachteten Ton. Es gilt dabei $x(a^1) = 0$, $x(b^1) = 1$, $x(h^1) = 2$, $x(c^2) = 3$ usw. LIEBER setzt die sich bei der Regression ergebende Konstante aus zwei Teilen zusammen:

$$\text{Konstante} = MW\,(L_{max}(A,F)_{D,i,B=2}) + \Delta L$$

und verwendet ΔL als weiteres Merkmal. ΔL beschreibt in gewisser Weise, wie der Übergang zwischen dem Pegel in Bereich 1 (beschrieben durch den mittleren Pegel) und dem Pegelabfall in Bereich 2 ausfällt. Wir verwenden dieses Merkmal nicht.
Stichprobe 2 wurde vollständig off-line „vom Band“ ausgewertet. Zunächst erfolgte das Überspielen der insgesamt 16,5 h Aufzeichung (9768 Einzelanschläge) auf Festplatte. Die typische Struktur der Aufnahmen zeigt Abbildung 3, einen einzelnen Anschlag Abbildung 4.

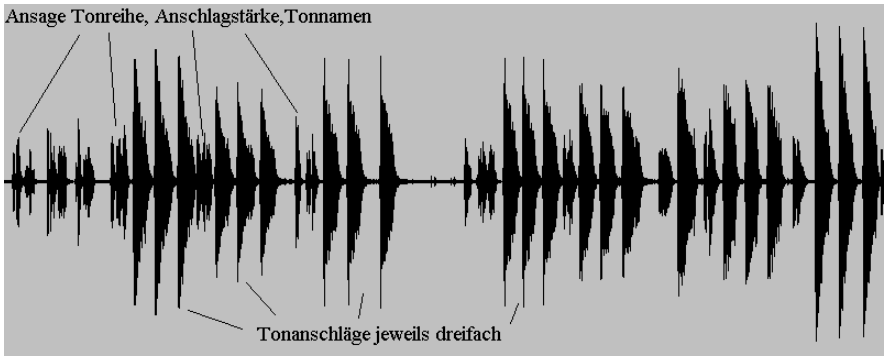
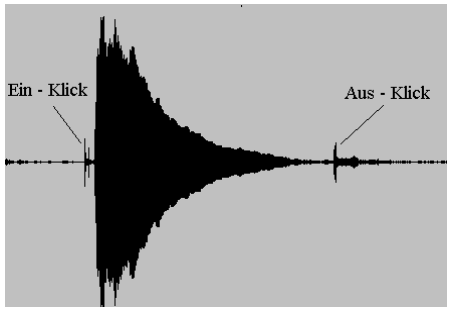


Abbildung 3: Grafische Darstellung des Signalverlaufes der Aufzeichnung der Einzeltonanschläge eines Pianos

Im nächsten Verarbeitungsschritt vereinzelten wir die Einzelanschläge, d. h. sie wurden aus der Gesamtaufzeichnung herauskopiert und einzeln erneut abgespeichert. Dabei wurden Ansagen sowie die Ein- und Aus- Klicks der Anschlagvorrichtung ausgeblendet. Die Ermittlung der eigentlichen Messwerte erfolgte dann auf einer Akustik-Workstation CORTEX CF 90. Diese Arbeiten dauerten aufgrund der großen Zahl von Einzeltönen mehrere Wochen.

Abbildung 4: Vergrößerter Einzeltonanschlag



Die für die zweite Stichprobe verwendeten zehn **Lautstärkemerkmale** entsprechen im Wesentlichen den für Stichprobe 1 verwendeten. Jedoch basieren sie nicht auf dem maximalen Pegel $L_{max}(A,F)_{D,i,j}$ des Einzelanspiels sondern auf dessen maximaler Lautheit $N_{max,D,i,j}$. Gleiches trifft für die verwendeten sechs **Dynamikmerkmale** zu.

Zur Bestimmung der Merkmalswerte zur Beurteilung der **Klangdauer** wurde der Verlauf der Gesamtlautheit der Einzeltöne betrachtet. Als Maß für die Klangdauer wird die Verweilzeit des Signals oberhalb einer bestimmten Lautheitsschwelle ermittelt. Die Messung der Verweilzeit erfolgt in ms. Der Schwellwert wurde anhand der konkreten Messsituation (z. B. Störgeräusche) nach Vorliegen der Aufzeichnungen festgelegt. Da die Messkette absolut kalibriert wurde, war damit keine Ergebnisverfälschung verbunden. Abbildung 5 stellt ein Beispiel des Lautheitverlaufes eines Einzeltonklavierklanges dar. Eine Lautheitsschwelle und die daraus resultierende Verweilzeit oberhalb der Schwelle sind markiert.

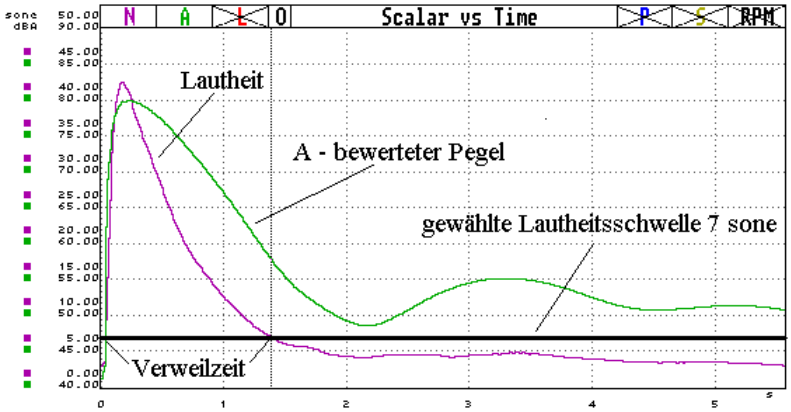


Abbildung 5: Beispiel für die Ermittlung der Klangdauer aus dem Lautheitsverlauf

Nach Auswertung der Aufzeichnungen wurde als Schwelle eine absolute Lautheit von 7 sone gewählt. Der Messwert für die Beurteilung der Klangdauer ist also die Zeit, in der die Lautheit des gespielten Tones oberhalb 7 sone verweilt.

Die **Klangfarbe** bewerteten wir über sechs, wiederum auf der Lautheit basierende Merkmale. Volumen, Klarheit, Helligkeit und Nasalität entsprechen prinzipiell den Klangmerkmalen für Stichprobe 1. Zwei Merkmale auf der Basis Schärfe kommen jedoch hinzu:

- **Volumen** - Summenlautheit im Bereich 100...400 Hz, $\mathbf{N_U(0{,}1..0{,}4)}$
- **Klarheit** - Summenlautheit im Bereich 800...1200 Hz, $\mathbf{N_A(0{,}8..1{,}2)}$
- **Helligkeit** - Summenlautheit im Bereich 2000...4000 Hz, $\mathbf{N_E(2..4)}$
- **Nasalität** - Mittelung zwischen Überhöhung der Summenlautheit im Bereich 400...600 Hz gegenüber der Summenlautheit in den Bereichen 100...400 Hz und 800...1200 Hz, und der Überhöhung der Summenlautheit im Bereich 1200...2000 Hz gegenüber der Summenlautheit in den Bereichen 800...1200 Hz und 2000...2800 Hz, $\mathbf{\Delta N_Ä}$
- **Schärfe** (nach Zwicker/Fastl) - Als Messwert diente der Perzentilwert 95 % über dem Einzelton, d. h. der Schärfewert, der in 95 % aller Abtastwerte über den Einzelton (Auswertefenster 2 ms) überschritten wird. Merkmale zur Bewertung der Schärfe sind die mittlere **Schärfe im Bassbereich** $A_2...g^{\#1}$ ($\mathbf{S_{95,\ Bass}}$) sowie die mittlere **Schärfe im Diskantbereich** ($\mathbf{S_{95,\ Disk.}}$).

4 Fragebogen gestützte Bewertung

Die Fragebogen gestützten Tests wurden nicht vom IfM und ohne Einfluss durch das IfM vorgenommen. Am **Hörtest** zu Stichprobe 1 nahmen 57 Testpersonen, zu Stichprobe 2 45 Testpersonen mit musikalischer Ausbildung teil. Neben Pianisten waren auch Spieler anderer Instrumente sowie Orchesterleiter vertreten. Er fand als Blind-Test mit Live-Anspiel in einem kleinen Theatersaal statt. Vier Pianisten spielten im Wechsel, wobei für jedes subjektive Merkmal (z. B. Repetitionsfähigkeit, Pedalfunktion, Dynamik usw.) spezielle Stücke ausgewählt wurden.
Die **Spieltests** zu beiden Stichproben fanden jeweils im gleichen Raum statt, indem auch die akustischen Messungen abliefen. Die Testpersonen, Stichprobe 1 29, Stichprobe 2 37 Berufspianisten, hatten jeweils einen Tag Zeit, alle Instrumente anhand eines Fragebogens zu beurteilen. Alle Herstellerkennzeichen waren mit Aufklebern unkenntlich gemacht. Ein Testleiter achtete darauf, dass die Testpersonen diese nicht entfernten.
Für die hier vorgestellte Auswertung wurden nur die Urteile zu Volumen, Dynamik und Klangfarbe aus den umfangreicheren Fragebogen gestützten Tests verwendet.

5 Korrelation der Merkmale mit den Urteilen der Testpersonen

Zunächst wollen wir an je zwei Merkmalspaaren die Verteilung für beide Stichproben betrachten (Abbildung 6). Man erkennt, dass sich die einzelnen Pianotypen in den dargestellten Merkmalsverteilungen deutlich voneinander abheben. Betrachtet man nur die Pianos, so verändern sich z. T. Trends in den Merkmalsverteilungen oder stellen sich deutlich abgeschwächt dar. Es erschien deshalb sinnvoll, die Auswertungen sowohl mit den Gesamtstichproben als auch mit den auf die Pianos reduzierten Stichproben vorzunehmen. Tabelle 1 stellt die Korrelationen der Merkmale mit den Urteilen der Testpersonen zusammen. Die Symbole haben dabei folgende Bedeutung:

+ Es wurde ein Zusammenhang nachgewiesen. Der Gut-Trend geht zu hohen Merkmalswerten.
- Es wurde ein Zusammenhang nachgewiesen. Der Gut-Trend geht zu niedrigen Merkmalswerten.
0 Es wurde kein Zusammenhang nachgewiesen.

Unter Hypothese (Hyp.) wird der Gut-Trend angegeben, den wir vor Beginn der Arbeiten auf der Basis der Arbeiten von LIEBER und aus Erfahrungen vergleichbarer Untersuchungen an anderen Instrumententypen annahmen. In der Spalte Fehler sind die Merkmale markiert **(■)**, für die die Streubreite des Merkmals innerhalb der Stichprobe im Verhältnis zum typischen Fehler des Merkmals zu gering ausfällt (siehe ZIEGENHALS 2000). Nur vier Merkmale erfüllen dieses Kriterium nicht. Die folgenden Spalten kennzeichnen den Gut-Trend im Ergebnis der Korrelationsanalyse. Die Entscheidung „kein Zusammenhang“ wurde getroffen, wenn im Signifikanztest der Korrelationskoeffizient den Grenzwert für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (unter Berücksichtigung der Stichprobengröße) nicht erreicht.
Für fünf der insgesamt 24 messtechnisch gestützten Merkmale (≈ 21 %) konnte kein Zusammenhang zu den Bewertungen der Testpersonen nachgewiesen werden. Sechs Merkmale (25 %) zeigen bei der Betrachtung verschiedener Stichproben widersprüchliche Gut-Tendenzen. Die verbleibenden 13 Merkmale (54 %) weisen zumindest für einen Testteil eine eindeutige, widerspruchfreie Gut-Tendenz auf. Eindeutig tritt zu Tage, dass bei Beschränkung auf Pianos die Korrelationen deutlich abnehmen, da die Streubreite der messtechnisch gestützten Merkmale natürlich geringer ausfällt.

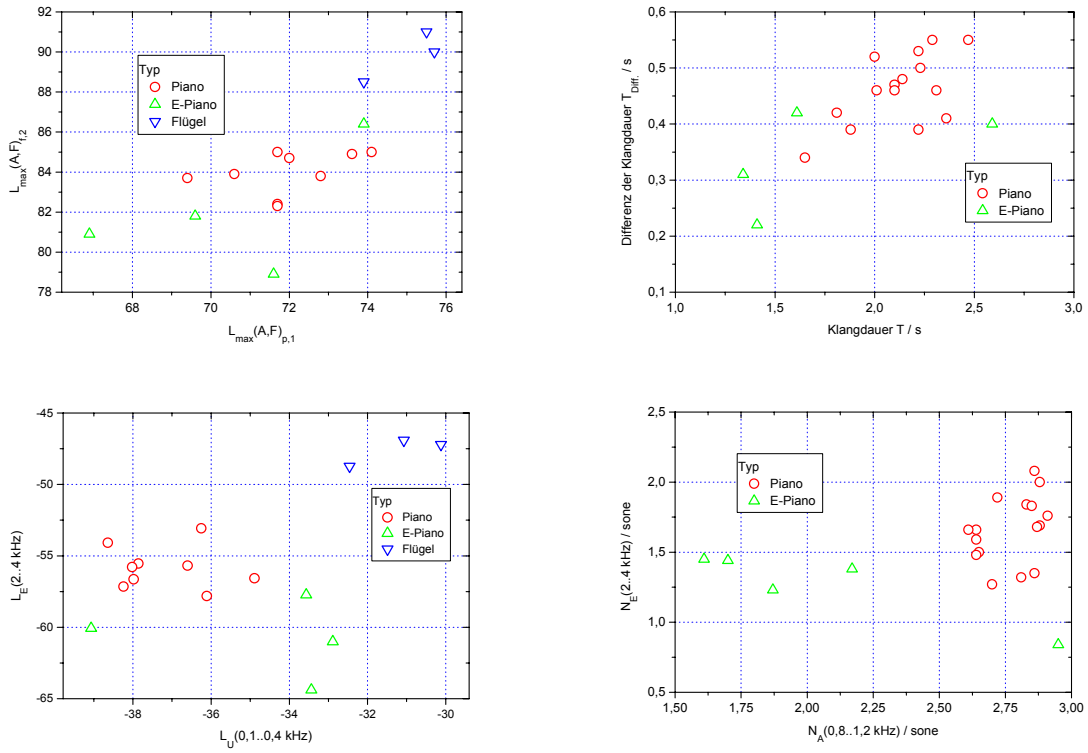


Abbildung 6: Beispiele für die Verteilung der Merkmale Stichprobe 1 links, Stichprobe 2 rechts

6 Beurteilung

Die Merkmale wurden nun nach dem von ZIEGENHALS 2000 veröffentlichten Verfahren beurteilt. Die Beurteilung wurde für jede Stichprobe zunächst je zweimal durchgeführt, einmal mit allen Merkmalen und den der Hypothese entsprechenden Gut-Tendenzen (Hyp.) und einmal nur anhand der 13 Merkmale mit nachgewiesenen und widerspruchsfreien Gut-Tendenzen (Korr.). Die Ergebnisse der Beurteilungen sowohl durch die Testpersonen als auch anhand der Messungen sind in Tabelle 2 für beide Stichproben in Form der sich ergebenden Rangfolgen der Instrumente zusammengestellt. Zunächst fällt auf, dass die Tendenzen der Bewertung hinsichtlich der drei Typengruppen, Piano, E-Piano und Flügel sehr gut übereinstimmen. Auch innerhalb der Typgruppen E-Piano und Flügel herrscht eine gute Übereinstimmung. Eine Ausnahme bildet lediglich Instrument Nr. 18 aus Stichprobe 2. Innerhalb der Pianos treten aber einzelne deutliche Diskrepanzen und zwar zwischen allen Beurteilungen auf. Insgesamt korrelieren jedoch alle Beurteilungen untereinander sicher. Die Hinzunahme einer Gesamtbewertung aus Hör- und Spieltest verändert das Ergebnis nur unwesentlich. Auch die beiden messtechnischen Beurteilungen einmal auf der Basis der hypothetischen Gut-Trends der Merkmale und einmal entsprechend dem Ergebnis der Korrelationsbetrachtungen unterschieden sich nicht gravierend. Die beiden Varianten der messtechnisch gestützten Beurteilung korrelieren sicher.

In einer zweiten Auswertung wurden nun nur die Pianos in den beiden Stichproben betrachtet. D. h. die Merkmalswerte der Flügel und E-Pianos gehen nicht in die Auswertung ein. Das Ergebnis der Korrelationsbetrachtungen ändert sich gravierend. Wir finden nunmehr bis auf eine Ausnahme keinen Zusammenhang mehr zwischen messtechnischer Beurteilung und Beurteilung durch Testpersonen! Aber auch zwischen Hör- und Spieltest verschwindet der Zusammenhang. Lediglich in einem Fall korrelieren die messtechnische Bewertung nach hypothetischen Trends und der Spieltest. Gehen wir davon aus, dass bei den Bewertungen keine grundsätzlichen Fehler begangen wurden, so kann dieses Ergebnis nur damit erklärt

werden, dass der Einfluss der beteiligten Musiker, den Einfluss der Instrumente vom Typ Piano überwiegt. Erst die Vergrößerung der Eigenschaftsvariation durch die Hinzunahme der pianoähnlichen Instrumente E-Piano und Flügel lässt den Einfluss der Instrumente den der Musiker überwiegen. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit den Resultaten einer entsprechenden Untersuchung des IfM an Gitarren, Geigen, Trompeten und Klarinetten (ZIEGENHALS 2008). Dies bedeutet aber auch, dass bei aller Wertschätzung der Musiker als Experten und Endkunden des Musikinstrumentenbaus nach entsprechender Lernphase der rein messtechnisch gestützten Beurteilung von Musikinstrumenten der Vorzug gegeben werden sollte.

Merkmal	**Hyp.**	**Fehler**	**alle Instrumente**				**nur Pianos**			
			STP 1		**STP 2**		**STP 1**		**STP 2**	
			HT	**ST**	**HT**	**ST**	**HT**	**ST**	**HT**	**ST**
$L_{1,p}$	+		+	+	+	+	**0**	**0**	**0**	+
$L_{Diff.,1,p}$	-		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$L_{2,p}$	+		+	+	+	+	**0**	**0**	**0**	+
$L_{Abf.,2,p}$	-		+	+	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$L_{Diff.,2,p}$	-		-	-	+	+	**0**	-	**0**	+
$L_{1,f}$	+		+	+	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	+
$L_{Diff.,1,f}$	-	■	**0**	**0**	-	**0**	**0**	**0**	**0**	+
$L_{2,f}$	+		+	+	+	+	-	**0**	**0**	**0**
$L_{Abf.,2,f}$	-		+	+	**0**	**0**	**0**	**0**	-	**0**
$L_{Diff.,2,f}$	-	■	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	-	**0**	**0**
$\Delta L(1)$	+		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$\Delta L_{Diff.}(1)$	-	■	-	-	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$\Delta L(2)$	+		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$\Delta L_{Diff.}(2)$	-	■	-	-	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$\Delta L(3)$	-		-	-	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$\Delta L_{Diff.}(3)$	-		-	-	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
T	+		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$T_{Diff.}$	-		-	**0**	**0**	-	**0**	**0**	+	**0**
L_U (0,1..0,4 kHz)	+		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	+	**0**	**0**
L_A (0,8..1,2 kHz)	+		+	+	+	+	**0**	**0**	**0**	**0**
L_E (2..4 kHz)	+		+	+	+	+	**0**	-	**0**	**0**
$\Delta L_Ä$	-		-	-	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$S_{95,\ Bass}$	-				+	+			**0**	+
$S_{95,\ Diskant}$	+				**0**	**0**			**0**	**0**

Tabelle 1: Korrelationen der Merkmale mit den Urteilen der Testpersonen für beide Stichproben (STP); HT-Hörtest, ST-Spieltest

Stichprobe 1					
Nr.	**Typ**	**HT**	**ST**	**Hyp.**	**Korr.**
1	P	10	6	8	6
2	P	8	12	11	12
3	P	7	8	6	4
4	P	9	5	6	7
5	P	11	11	14	12
6	P	6	7	5	5
7	P	5	9	13	10
8	P	1	4	11	8
9	P	12	10	9	8
10	E-P	16	16	15	15
11	E-P	14	14	16	16
12	E-P	15	15	10	14
13	E-P	13	13	4	10
14	F	2	1	2	1
15	F	3	2	1	2
16	F	4	3	3	3

Stichprobe 2					
Nr.	**Typ**	**HT**	**ST**	**Hyp.**	**Korr.**
1	P	12	13	16	12
2	P	4	4	4	4
3	P	12	4	13	4
4	P	1	1	9	17
5	P	7	13	17	14
6	P	12	4	7	7
7	P	8	15	15	9
8	P	8	15	13	12
9	P	12	4	7	7
10	P	1	4	3	4
11	P	8	15	10	9
12	P	6	4	10	14
13	P	4	4	10	14
14	P	1	1	4	9
15	P	8	1	4	2
16	P	12	4	2	1
17	P	12	4	22	19
18	E-P	18	19	1	2
19	E-P	18	19	17	19
20	E-P	21	19	19	18
21	E-P	18	18	19	21
22	E-P	22	22	19	22

Tabelle 2: Rangfolge der Instrumente im Ergebnis der einzelnen Bewertungen, HT-Hörtest, ST-Spieltest, Hyp.- mit Merkmalstendenzen nach Ausgangshypothese, Korr.- mit Merkmalstendenzen entsprechend den Ergebnissen der Korrelationsbetrachtungen

Auf zwei Dinge sei noch hingewiesen: 1. Die Beschränkung auf die Pianos in der zweiten Auswertung veränderte die Situation hinsichtlich der Streubreite der Merkmale in Bezug auf den Messfehler nicht. 2. Bei Messung der E-Pianos ist eine merkliche Schwachstelle die Positionierung der Mikrofone. Die E-Pianos verfügten über eigene Lautsprecher, die für die Messung verwendet wurden. Diese weisen aber keinen einheitlich Einbauort auf. Es wäre also für jedes Instrument die Optimierung der Mikrofonposition erforderlich. Dies wurde jedoch als nicht im Sinne des ursprünglichen Tests verworfen.

Literatur

Ziegenhals, G.: Beurteilung objektiver Merkmale von Musikinstrumenten. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2000

Ziegenhals, G.: Zur objektiven Beurteilung von Klavieren. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2002

Ziegenhals, G.: Analyse von Musikinstrumentenschallen mittels psychoakustischem Merkmalssatz. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2008