

Timbre Space reloaded: Tonhöhe und Dynamik als Teil der Klangfarbenempfindung

Saleh Siddiq¹, Christoph Reuter¹, Isabella Czedik-Eysenberg¹, Denis Knauf²

¹ Institut für Musikwissenschaft, Universität Wien, E-Mail: saleh.siddiq@univie.ac.at

² Technische Universität Wien

Einleitung

Zur Definition von Klangfarbe

Ein Problem bei der Untersuchung von (musikalischen) Klangfarben ist, dass der Begriff Klangfarbe nicht hinreichend definiert ist. Auf der Suche nach einer allgemein akzeptierten Definition haben sich bis heute v.a. zwei Konzepte durchgesetzt: (1.) Die von Carl Stumpf (1890) publizierte Beschreibung der Klangfarbe im engeren und im weiteren Sinne [1], und (2.) die 1960 vorgestellte Definition des *American National Standards Institute* (ANSI) [2]. Carl Stumpf bezeichnete das harmonische Spektrum als „Klangfarbe im engeren Sinn“ und bündelte zeitliche Klangeigenschaften wie Ein- und Ausschwingvorgänge, Begleitgeräusche und Mikromodulationen in der „Klangfarbe im weiteren Sinn“ [1]. Stumpfs Definition verdeutlicht den multidimensionalen Charakter von Klangfarbe, indem sie die verschiedenen akustischen Einflussfaktoren benennt. Im Gegensatz dazu besagt die ANSI-Definition, dass Klangfarbe dasjenige Wahrnehmungsattribut sei, an dem zwei Klänge gleicher Tonhöhe und Lautstärke noch unterschieden werden können [2]. Mit anderen Worten: „Klangfarbe ist Klang minus Tonhöhe minus Lautheit“ [3]. Im Grunde ist diese Definition eine Ausschluss- bzw. Negativdefinition, die nur sagt, was Klangfarbe nicht ist [4][5]. Obwohl die Definition nicht ohne Kritik blieb (vgl. v.a. Bregman [6]), setzte sie sich aufgrund der Standardisierung durch das ANSI durch. Infolge des Ausschlusses von Tonhöhe und Lautstärke (sprich: Dynamik) als Einflussfaktoren entwickelte sich die Praxis, Musikinstrumente in Studien auf einen einzigen Ton zu reduzieren und auf der selben Tonhöhe zu vergleichen [3].

Klangfarbenforschung

Ein weiteres Problem ist, dass der Begriff Klangfarbe insofern unscharf ist, als dass er für einfache Töne (Sinustöne), Einzelklänge und komplette Musikinstrumente gleichermaßen verwendet wird. In der Klangfarbenforschung sind i.d.R. die Klangfarben von Musikinstrumenten, also sozusagen Instrumental(-klang-)farben gemeint. Die tragische Konsequenz aus der Entwicklung Instrumente auf einen einzigen Ton zu reduzieren war, dass de facto nur die Beziehungen einzelner Klänge untersucht wurden, die Ergebnisse aber auf komplette Musikinstrumente bezogen wurden.

In einem am Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien angesiedelten Projekt zur Klangfarbenwahrnehmung wird derzeit ein tonhöhen- und dynamikunabhängiges Konzept zur Beschreibung von Instrumentalklangfarben entwickelt. In verschiedenen Metastudien zu den Stärken und Schwächen von Timbre Spaces [7][8] konnte gezeigt

werden, dass die verschiedenen Modelle untereinander inkonsistent sind. Dies konnte auf den Einsatz (re-)synthetisierter bzw. datenreduzierter Stimuli zurückgeführt werden, wobei sich die Eigenarten der verschiedenen Syntheseverfahren als primäre Klangfarbenfaktoren durchsetzten. Obwohl auch reale Instrumentenklänge einer gewissen „datenbankabhängigen Färbung“ zu unterliegen scheinen [9], konnten die Vorteile „natürlicher“ Klänge gegenüber (re-)synthetisierten Klängen mittels einer empirischen Metastudie klar gezeigt werden [10].

Ziele und Annahmen

Die hier vorgestellte empirische Studie stellt den nächsten Schritt des genannten Projekts als work in progress dar. Das Ziel dieser Studie ist, den Einfluss von Tonhöhe und Spieldynamik auf den Klangfarbeneindruck zu untersuchen. Dazu werden Musikinstrumente über weite Bereiche ihrer Ton- und Dynamikumfangs, also mittels mehrerer Töne getestet. Ein weiteres Ziel ist es, die physikalischen Korrelate der empirisch ermittelten Klangfarbendimensionen zu identifizieren.

Studien, welche mehrere Töne pro Instrument einbezogen haben [11][12] legen nahe, dass sich andere globale Dimensionen herausbilden als bei Studien, denen nur ein Ton pro Instrument zugrunde liegt. So ist Schärfe bzw. Helligkeit – auf Klangebene in den bisherigen Studien übereinstimmend als der wichtigste Faktor ermittelt – ungeeignet, da der Klang der meisten Instrumente so gespielt werden kann, dass er mehr oder weniger scharf wird [13]. Vielmehr liegt die Vermutung nahe, dass (1.) die Tonhöhe und (2.) die Spektraldynamik im Sinne der *Schumannschen Klangfarbengesetze* [14] je eine Dimension dominieren werden.

Eine weitere Annahme ist, dass die Klänge eines Instruments über weitere Bereiche streuen werden und keine punktuellen Cluster bilden, wie dies klassische Timbre Spaces suggerieren. Dabei ist fraglich, ob sich überhaupt signifikante Instrumentencluster bilden oder andere Klangmerkmale die Gruppierung der Stimuli im virtuellen Raum dominieren.

Methode

In der derzeit laufenden Studie über den Einfluss von Tonhöhe und Dynamik auf die Klangfarbenwahrnehmung wurde bisher etwa die Hälfte der geplanten Menge an Datensätzen erhoben, so dass an dieser Stelle nur eine Teilauswertung vorgestellt werden kann. Das methodische Grundgerüst wurde von den Timbre-Space-Studien übernommen [15]. Im Hörversuch (Paarvergleich) werden

die subjektiven Unähnlichkeiten der verwendeten Instrumentalklänge erhoben. Die so entstandenen Unähnlichkeitsmatrizen werden einer Ähnlichkeitsstrukturanalyse (Multidimensionale Skalierung, MDS) unterzogen. Das Ergebnis ist ein n-dimensionaler Raum, in dem die Unähnlichkeiten der getesteten Klänge als Distanzen zwischen den Raumkoordinaten der Klänge repräsentiert werden.

Stimuli

Ausgehend von der oben genannten Zielsetzung unterlag die Auswahl der Stimuli grundsätzlich den beiden folgenden Forderungen: (1.) Die Auswahl der Instrumente soll möglichst viele verschiedene Instrumententypen, d.h. verschiedene Anregungsmechanismen abdecken. (2.) Jedes Musikinstrument sollte über weite Bereiche seines musikalischen Tonumfangs sowie seiner Dynamikspanne getestet werden. Demgegenüber stehen folgende methodische Einschränkungen: (1.) Mit jedem hinzukommenden Stimulus wächst die Dauer des Paarvergleichs exponentiell an. (2.) Durch die Berücksichtigung von Tonhöhe und Dynamik entstehen neue Variablen. Dies erhöht die Komplexität der Interpretation der Testergebnisse, weshalb die Zahl weiterer Variablen möglichst klein gehalten werden sollte.

Vor dem Hintergrund dieser Vorgaben wurden fünf nicht-perkussive Orchesterinstrumente ausgewählt: Querflöte, B-Klarinette, Violoncello, Fagott, Tenorposaune. Die Instrumente wurden auf jeweils drei verschiedenen Tonhöhen in je drei Dynamikstufen (*pp*, *mf*, *ff*), insgesamt also mit neun Tönen pro Instrument getestet. Die Auswahl der konkreten Tonhöhen unterlag folgenden Faktoren: (1.) dem „natürlichen“ Tonumfang des Instruments, (2.) der gleichmäßigen Belegung der Oktavbänder im gesamten Testspektrum. (3.) Um überdies den Einfluss des Tonchromas auszuschließen, wurde die Tonauswahl auf ‚e‘ eingeschränkt. Die folgende Tabelle zeigt die Stimuliauswahl im Überblick.

Tabelle 1: Übersicht über die getesteten Instrumente und die Tonmatrix der getesteten Tonhöhen pro Instrument.

Instrumente		Oktaven				
Instrumente	Anregung	2	3	4	5	6
Flöte	Wirbel am Spalt			e'	e''	e'''
Klarinette	Rohrblatt		e		e''	e'''
Cello	Bogenstrich	E		e'		e'''
Fagott	Doppelrohrblatt	E	e		e''	
Posaune	Kesselmundstück	E	e	e'		

Die verwendeten Instrumentalklänge stammen aus der *Vienna Symphonic Library* (VSL). Durch den Einsatz der VSL bestand die Möglichkeit, qualitativ hochwertige, nach einem standardisierten Verfahren produzierte Aufnahmen von Musikinstrumenten in allen Tonhöhen und Dynamikstufen einzusetzen.

Versuchspersonen

Insgesamt sollen 50 Versuchspersonen (Vpn) getestet werden. Aktuell haben 22 Vpn ($w = 10$; 17–68 Jahre, $\bar{O} = 42,5$, $SD = 11,12$) teilgenommen, wovon 14 aktive Musiker,

6 ehemals musikalisch aktiv und zwei Nichtmusiker waren (2–60 Jahre Erfahrung, $\bar{O} = 31$, $SD = 13,96$).

Prozedere

Die Vpn wurden zuerst instruiert, konnten sich dann mit den Stimuli und schließlich in einer Testphase mit dem genauen Ablauf vertraut machen. Die Klänge wurden im Paarvergleich ($(45 \times 44) / 2 = 990$ Paare) auf einer 7-stufigen Skala subjektiv bewertet. Die Reihenfolge der Klänge im Paar sowie der Klangpaare selbst war randomisiert. Pausen und Wiederholungen waren jederzeit unbegrenzt möglich, eine Halbzeitpause war jedoch festgelegt. Der Versuch dauerte etwa 120 Minuten und wurde auf einer eigens entwickelten browserbasierten Software über externe Soundkarten (Roland Quad-Capture UA55) und Kopfhörer (Philips Fidelio X2) durchgeführt.

Auswertung

Die subjektiven Daten wurden in symmetrischen Unähnlichkeitsmatrizen (Halbmatrizen) festgehalten und zu einer Gesamtmatrix aggregiert (Median). Mittels einer nichtmetrischen MDS (PROXSCAL) wurde aus den Daten eine vierdimensionale Konfiguration berechnet. Die Dimensionalität ist ein Kompromiss zwischen einer möglichst geringen Verzerrung der Unähnlichkeitsurteile durch den MDS-Algorithmus (geringerer Stresswert, mehr Dimensionen) und einer möglichst guten Interpretierbarkeit der Daten (weniger Dimensionen). Im untenstehenden Graphen sind die Stresswerte für alle möglichen Dimensionalitäten ($n-1$) eingetragen.

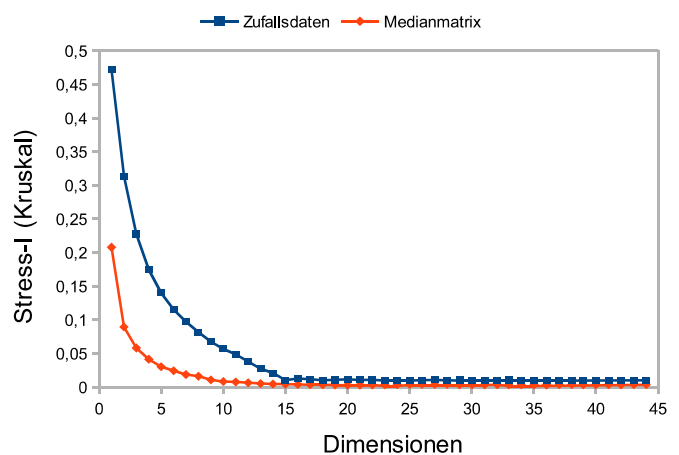


Abbildung 1: Stress Scree-Plot: X-Achse: Dimensionszahl der MDS-Lösung, Y-Achse: Stress nach Kruskal, Blau: Plot für Zufallsdaten, Rot: Plot für die Unähnlichkeitsdaten der Gesamtmatrix.

Im Plot ist zu erkennen, dass ab etwa vier Dimensionen die Hinzunahme weiterer Dimensionen den Stress nicht mehr nennenswert reduziert. Aus diesem Grund, und weil die Konfiguration so noch darstellbar und überschaubar ist, wurden vier Dimensionen mit einem Stresswert von 0,04124 nach Kruskal gewählt.

Ergebnisse

In zweierlei Hinsicht sind die Ergebnisse eindeutig: (1.) Die Tonhöhe hat einen immensen Einfluss auf die Klangfarbe. Sie scheint sogar einer der wichtigsten Faktoren zu sein. (2.) Die Klänge eines Instruments streuen über weite Bereiche, wobei sich die verschiedenen Instrumente derart überlappen, dass sich vordergründig keine Instrumentencluster bilden.

Bezüglich der physikalischen Korrelate der einzelnen Dimensionen zeigt die Auswertung folgenden Befund:

Dimension 1 ist eindeutig eine Dimension der Tonhöhe. Die Rangordnung der Klänge ist bis auf drei Ausnahmen exakt nach aufsteigender Tonhöhe sortiert, entsprechend stark ist die Korrelation ($r = 0,971$; $p = 0,01$). Die Korrelation der Rangordnung mit der f_0 der Klänge ($r = 0,855$; $p = 0,01$) ist ebenfalls signifikant.

Dimension 2 scheint umgekehrt mit der Helligkeit (brightness) zusammenzuhängen. Möglicherweise ist die Spektraldynamik der bestimmende Faktor dieser Dimension. Augenscheinlich sammeln sich die *pp*-Klänge mehrheitlich am einen und die *ff*-Klänge am anderen Ende der Skala, wobei die *mf*-Klänge gleichmäßiger verstreut sind und die Verteilung insgesamt nicht signifikant ist. Mit der Helligkeit korrelieren die Koordinaten der Klänge allerdings negativ signifikant ($r = -0,731$; $p = 0,01$). Die Korrelation mit den Rängen der Klänge ist sogar noch stärker ($r = -0,885$; $p = 0,01$).

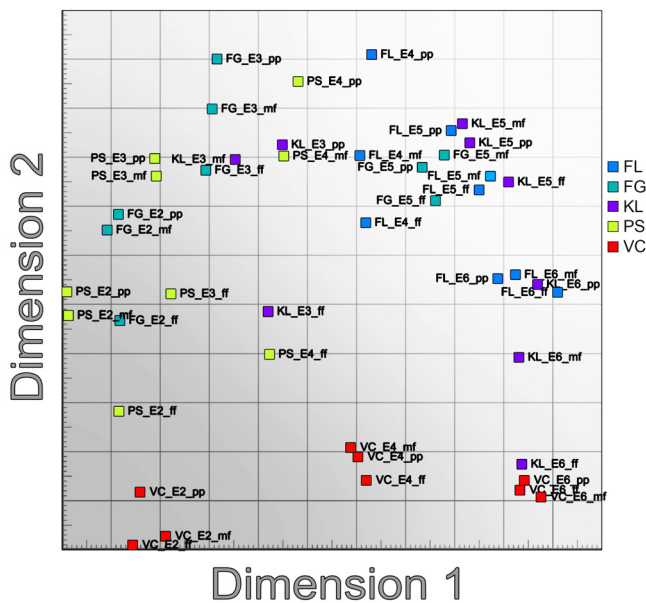


Abbildung 2: Plot von Dimension 1 und Dimension 2. Klänge: FG = Fagott (türkis), FL = Flöte (blau), KL = Klarinette (violett), PS = Posaune (hellgrün), VC = Cello (rot).

Die Auswertung von Dimension 3 und 4 gestaltet sich schwieriger. Beide könnten Dimensionen der Klangfarbe im weiteren Sinn sein. Dies liegt besonders für Dimension 4 nahe. Entlang von Dimension 4 verteilen sich die Klänge in etwa nach der Stärke der Begleitgeräusche (Anblasgeräusch, Bogenstrichgeräusch). Die Achse der Klangfarbe im weiteren Sinn könnte allerdings auch

diagonal über beide Dimensionen verlaufen. Hier ist die Auswertung noch nicht abgeschlossen.

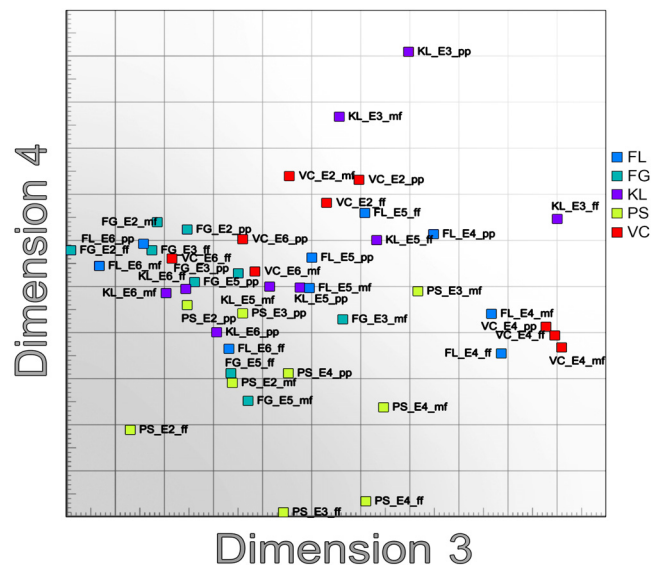


Abbildung 3: Plot von Dimension 3 und Dimension 4. Klänge: FG = Fagott (türkis), FL = Flöte (blau), KL = Klarinette (violett), PS = Posaune (hellgrün), VC = Cello (rot).

Diskussion

Der gewichtige Einfluss der Tonhöhe war zu erwarten. Tonhöhe und Klangfarbe können nicht unabhängig voneinander wahrgenommen werden [16][5]. Wie Töne werden auch Klänge mit steigender Grundfrequenz perceptiv immer heller und gleichzeitig immer weniger rau [1]. Speziell für formanhaltige Klänge, d.h. für die meisten Blasinstrumente, sind sprunghafte Änderungen des Klangfarbeneindrucks beschrieben, sobald der Grundton den ersten Formantbereich überschreitet, was i.d.R. auch mit den in Instrumentationslehren beschriebenen Registergrenzen zusammenfällt [17].

Obwohl Klangfarbe und Tonhöhe perceptiv untrennbar sind und v.a. der Einfluss der Tonhöhe auf die Klangfarbe unstrittig ist, besteht die Möglichkeit, dass ein Paarvergleich den Einfluss der Tonhöhe überbewertet, da sie als stärkstes Unterscheidungsmerkmal auftritt. Der Tonhöhen einfluss ist demnach noch in einem anderen Setup empirisch zu überprüfen.

Der a priori stark eingeschätzte Einfluss der Dynamik ist in der aktuellen Auswertung nicht erwartungsgemäß ausgeprägt. Ein Grund dafür könnte sein, dass nur die Spektraldynamik getestet wurde, während die Lautheitsdynamik im Zuge der Lautheitsangleichung der Stimuli praktisch „gelöscht“ wurde. Eine weitere Erklärung könnte im multidimensionalen Wesen der Spektraldynamik liegen. Neben der Verschiebung spektraler Energieanteile in höhere Frequenzbereiche (= stärkere Ausprägung höherer Teiltöne bei stärkerer Anregung) kommt es auch zu Verstärkungen der Nebengeräusche wie z.B. Blasgeräuschen und zu Veränderungen des Einschwingvorgangs. Möglicherweise wurden diese verschiedenen Faktoren durch die multidimensionale Skalierung auf verschiedene Dimensionen (Helligkeit,

Begleitgeräusche, etc.; Dimensionen 3 und 4) aufgeteilt, so dass der Gesamteinfluss der Dynamik nicht mehr offensichtlich zu Tage tritt.

Dass sich keine (klaren) Instrumentencluster bilden, ist angesichts der Heterogenität der Instrumentalklangfarben keine allzu große Überraschung. Klänge mit z.B. ähnlicher Tonhöhe und ähnlicher spektraler Energieverteilung (grundtonbezogene, relative Helligkeit/Schärfe) sind sich akustisch und folglich auch perceptiv ähnlicher als Klänge, die sehr unterschiedliche akustische Strukturen aufweisen (z.B. große Tonhöhenunterschiede), aber vom selben Instrument produziert wurden. Hierbei dürfte die Klangfarbe im engeren Sinn, also Spektraldynamik unter Einbeziehung von Tonhöhe bzw. Register entscheidend sein, während Begleitgeräusche und andere Merkmale der Klangfarbe im weiteren Sinn hingegen eher eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen.

Die hier vorgestellten vorläufigen Ergebnisse stehen im Einklang zu den bisherigen Erkenntnissen der Musikwissenschaft und der musikalischen Akustik. Allerdings darf dabei die Tatsache nicht aus dem Blickfeld geraten, dass es sich dabei nur ein Zwischenergebnis handelt, da die Datenerhebung noch nicht abgeschlossen ist. Bedeutsame Veränderungen sind derzeit also noch nicht auszuschließen.

Ausblick

Nach dem Abschluss der derzeit laufenden Datenerhebung und Auswertung aller Datensätze mit den oben beschriebenen Verfahren werden die ermittelten perceptiven Dimensionen auf ihre Korrelation mit einer Reihe von Timbre Features getestet, um die Verknüpfung der Wahrnehmungsdimensionen mit physikalischen Merkmalen auf eine belastbarere und allgemeingültigere Grundlage zu stellen. Zur weiteren Auswertung gehört auch die Bildung von Sub-Kategorien (z.B. Instrumentengruppen, Registergruppen, etc.), da anzunehmen ist, dass sich die bestimmenden Merkmalssets je nach Klangkontext unterscheiden.

In weiterer Folge steht ein neuerlicher empirischer Versuch mit dem Zweck an, die Ergebnisse der hier vorgestellten Studie zu überprüfen und zu verfeinern, um auf dieser Basis ein psychoakustisches Modell der Klangfarbenwahrnehmung zu erstellen.

Dank

Diese Studie wurde gefördert durch den *Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank* (OeNB, Projektnr. 16473). Vielen Dank an die *Vienna Symphonic Library* für die Unterstützung in Form von zwei kostenfrei zur Verfügung gestellten *Vienna Super Package* Lizenzen.

Literatur

- [1] Stumpf, C. Tonpsychologie Bd.2, Hirzel, Stuttgart, 1890
- [2] American National Standards Institute: American Standard. Acoustical Terminology (Including Mechanical Shock and Vibration), ASA, New York, 1960
- [3] Reuter, C.: Wie und warum in der Geschichte der Klangfarbenforschung meistens am Klang vorbeigeforscht wurde. Festschrift zum 65. Geburtstag von Jobst Fricke, Lang, Frankfurt/M, 2003, 293–302
- [4] Krumhansl C.: Why is Musical Timbre so hard to understand? Nielzen, S.; Olsson, O. (Ed.): Structure and Perception of electroacoustic Sound and Music. Elsevier, Amsterdam 1989, 43-53
- [5] Houtsma, A.J.M.: Pitch and Timbre. Definition, Meaning and Use. Journal of New Music Research 26 (1997), 751–763
- [6] Bregman, A.S. Auditory Scene Analysis. The Perceptual Organization of Sound, MIT Press, Cambridge, 1990
- [7] Siddiq, S.: Timbre Space revisited – Was ist Fakt, was ist Mythos? Tagungsband zum Seminar des FAMA in der DEGA (2014) 51–52
- [8] Siddiq, S. et al.: Kein Raum für Klangfarben – Timbre Spaces im Vergleich. Fortschritte der Akustik. DAGA 40 (2014), 56–57
- [9] Hansen, M.; Wöllner, C.: Multimodale Klangfarbenwahrnehmung: Einflüsse von Haptik, Instrumentengruppen und Klangdatenbanken. DGM Jahrestagung, Wien, 2016
- [10] Siddiq, S. et al.: Vergleichende Untersuchungen zu Timbre Space Studien. Fortschritte der Akustik. DAGA 41 (2015), 811–813
- [11] Marozeau, J. et al.: The dependency of timbre on fundamental frequency. Journal of the Acoustical Society of America 114 (2003), 2946–2957
- [12] Handel, S.; Erickson, M.L.: Sound Source Identification: The Possible Role of Timbre Transformations. Music Perception. 21 (2004), 587–610
- [13] Fricke, J.P.: Klang und Klangfarbe – gestern, heute (und morgen). Schmidhofer, A.; Jena S. (Ed.): Klangfarbe. Vergleichend-systematische und musikhistorische Perspektiven. Lang, Frankfurt/M, 2011, 9–42
- [14] Schumann, K.E. Physik der Klangfarben Bd. 2, Breitkopf & Hertel, Leipzig, 1929
- [15] McAdams, S.: Perspectives on the Contribution of Timbre to Musical Structure. Computer Music Journal 23 (1999), 85–102
- [16] Krumhansl, C.; Iverson, P.: Perceptual Interactions Between Musical Pitch and Timbre. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 18 (1992), 739–751
- [17] Reuter, C. Klangfarbe und Instrumentation. Geschichte – Ursachen – Wirkung, Lang, Frankfurt/M, 2002