

## Formanten als hilfreiche Timbre-Deskriptoren für die Darstellung von Blasinstrumentenklängen

Christoph Reuter<sup>1</sup>, Isabella Czedik-Eysenberg<sup>1</sup>, Saleh Siddiq<sup>1</sup>, und Michael Oehler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Wien, Musikwissenschaftliches Institut, christoph.reuter@univie.ac.at

<sup>2</sup> Hochschule Düsseldorf, Institute of Sound and Vibration Engineering

### Hintergrund

In der Klangfarbenforschung wurden seit Hermann von Helmholtz (1863)[1] die unterschiedlichsten Klassifikationsmodelle für Musikinstrumentenklänge vorgestellt. In den meisten Fällen wurden dabei nur die klanglichen Unterschiede einzelner (häufig synthetischer) Töne bei gleicher Tonhöhe, Dauer und Dynamik ermittelt und von diesen dann auf ganze Instrumente geschlossen (besonders z.B. im Falle der Timbre Spaces, ab [2]). Seit mehr als 90 Jahren wird moniert, dass die Klangfarbe von Einzeltönen etwas anderes ist als die Klangfarbe von ganzen Musikinstrumenten (vergl. [3], S. 393 bis [4], S. 15). Für die klangliche Beschreibung ganzer Musikinstrumente gibt es nur wenige Konzepte. Neben Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs, z.B. [5]) und Modulation Power Spectrum (MPS, z.B. [6]) haben sich für eine umfassendere Beschreibung von ganzen Musikinstrumentenklängen vor allem Formantbereiche bewährt (seit 1929 [7][8][9]). Besonders für Blasinstrumente konnten sowohl ihre Entstehungsursachen geklärt werden [10][11] als auch ihr Beitrag zur Heraushörbarkeit und zur Verschmelzung von Musikinstrumenten im polyphonen und Unisono-Zusammenspiel [12][13]. In Übereinstimmung mit mehr als 70 Instrumentationslehren und ähnlichen Instrumententraktaten kann anhand von Formantposition und Registerlage die Verschmelzungsfähigkeit bzw. Heraushörbarkeit von simultan zusammenspielenden Blasinstrumenten vorausgesagt werden [14], ebenso wie Ausbildung einer homogenen Melodie bei alternierenden Blasinstrumentenklängen mit übereinstimmenden Formantbereichen bzw. die Aufspaltung einer Melodie im Sinne der Stream Segregation bei alternierenden Blasinstrumentenklängen mit unterschiedlichen Formantbereichen [15]. All diese Beobachtungen (und die seit mehr als 90 Jahren [3] bekannten Instrumentalformanten) sprechen dafür, diese auffallenden Klangeigenschaften von Blasinstrumenten auch als Timbre-Deskriptoren im Bereich des Music Information Retrievals einzusetzen.

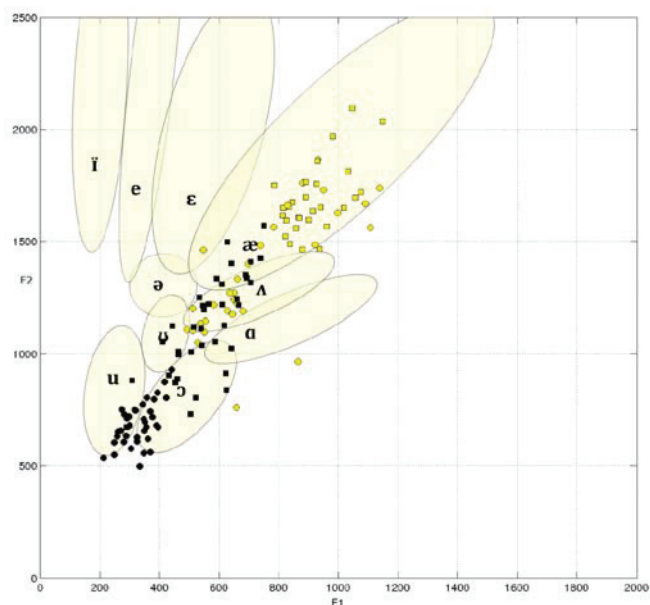
### Interaktives Formantenfeld

Aus diesem Grund wurden für eine formantbasierte Visualisierung von Blasinstrumenten mehr als 650 Klänge der orchestertypischen Blasinstrumente Querflöte, Oboe, Klarinette, Fagott, Horn, Trompete, Posaune und Tuba in jeweils allen erreichbaren Tonhöhen und in zwei Dynamikstufen pro Instrument (in *pp* und *ff*) aus der Vienna Symphonic Library (VSL) mit Hilfe der Phonetik-Software Praat auf ihre ersten beiden Formanten hin untersucht [16]. Die gefundenen Formantbereiche wurden pro Klang innerhalb eines Graphen mit den Achsen erster Formant (F1)

und zweiter Formant (F2) als Punkte aufgetragen, so dass sich nach der Analyse aller Klänge diese als farbige Punktwolken interaktiv für einzelne Register und ganze Instrumente in zwei Dynamikstufen darstellen lassen (*pp* = Kreise, *ff* = Quadrate). Über eine zuschaltbare Vokalformanten-Ansicht lässt sich die Vokalähnlichkeit der Klänge (wie z.B. bei [17] oder auch [9]) direkt visuell einschätzen.

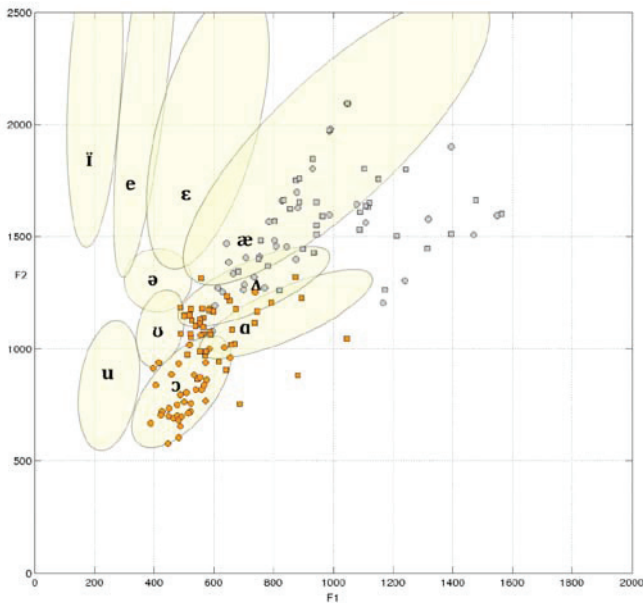
### Formantbasierte Visualisierungen von kompletten Instrumentenklängen

Nach der Analyse zeigt es sich, dass die Instrumentenklänge aufgrund ihrer unterschiedlichen Formantbereiche innerhalb des Formantenfelds mit ihren Punktwolken meist gut unterscheidbare Positionen annehmen. So lassen sich z.B. die Klänge der Tuba hauptsächlich im U- und O-Bereich wiederfinden, während sich die Klänge der Trompete zum größten Teil im A- und Ä-Bereich befinden.



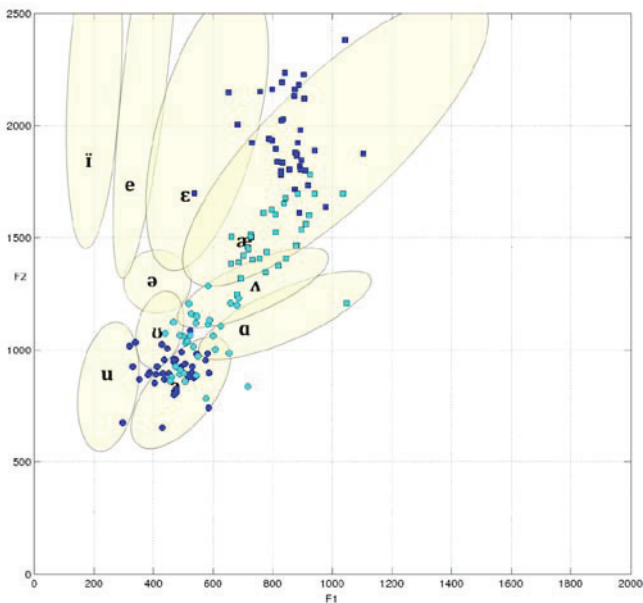
**Abbildung 1:** Formantenfeld mit den Klängen von Trompete (gelb) und Tuba (schwarz) in allen erreichbaren Tonhöhen in *ff* und *pp*.

Vergleichbares gilt für die Klänge von Oboe und Fagott: auch hier verteilen sie sich gut unterscheidbar im O-Bereich (Fagott) und im Ä-Bereich (Oboe):



**Abbildung 2:** Formantenfeld mit den Klängen von Fagott (orange) und Oboe (grau) in allen erreichbaren Tonhöhen in *ff* und *pp*.

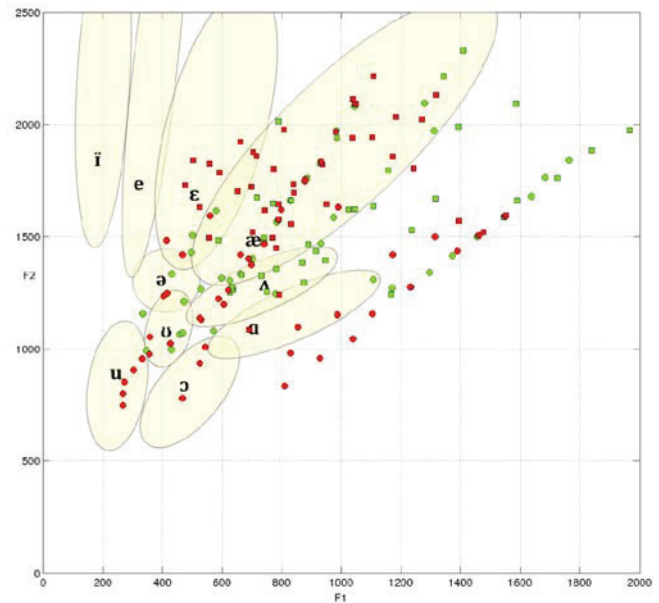
Bei Horn und Posaune findet sich ebenfalls eine deutlich erkennbare Trennbarkeit der Instrumente mit der Besonderheit, dass sich die *pp*-Klänge des Horns im O-Bereich verteilen und die *ff*-Klänge im Ä- und E-Bereich, während die Klänge der Posaune eher im OA/A/AE-Bereich zu finden sind.



**Abbildung 3:** Formantenfeld mit den Klängen von Horn (dunkelblau) und Posaune (hellblau) in allen erreichbaren Tonhöhen in *ff* und *pp*.

Nur bei Querflöte und Klarinette lassen sich solche eindeutigen Konstellationen nicht erkennen. Bei beiden Instrumenten ist die Formantstruktur nicht sehr ausgeprägt: Bei der Flöte kann sich durch die eher chaotische Wirbelbildung am Spalt weniger gut eine eindeutige zyklische spektrale Struktur ausbilden, während bei der

Klarinette die Formantbildung durch die Dominanz der ungeradzahigen Teiltöne im Spektrum erschwert wird (vergl. auch [18], S. 1041):



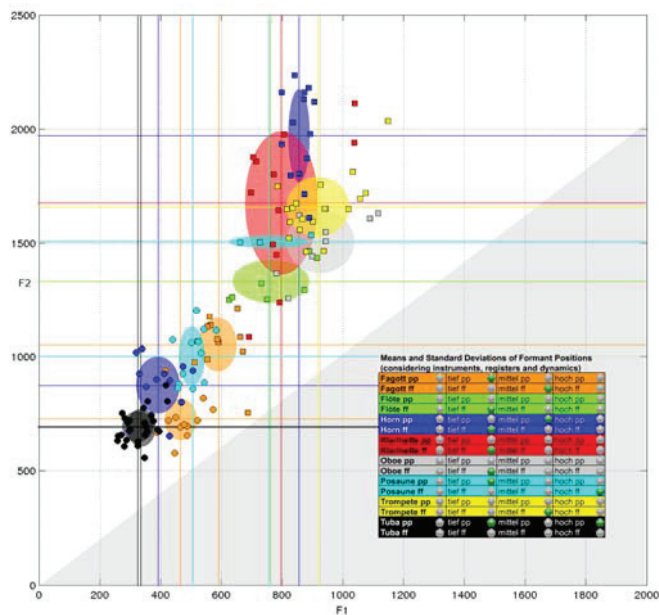
**Abbildung 4:** Formantenfeld mit den Klängen von Flöte (grün) und Klarinette (rot) in allen erreichbaren Tonhöhen in *ff* und *pp*.

### Formantbasierte Visualisierungen von Registern und Dynamikstufen

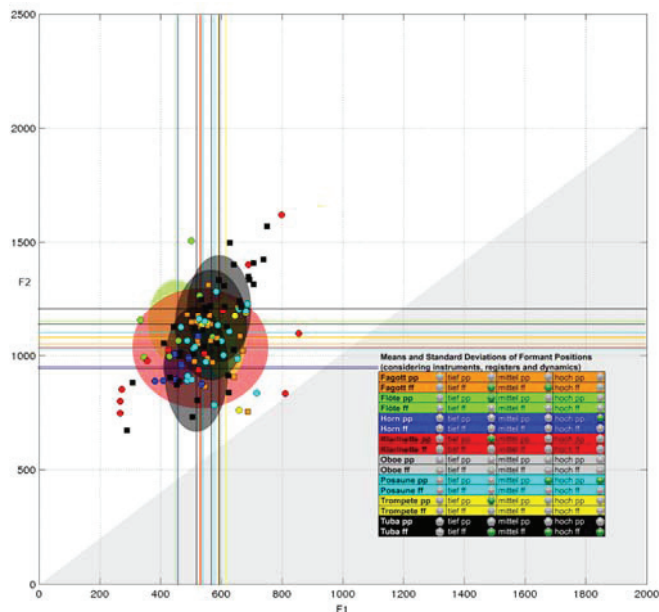
Es ist bei den Doppelrohrblatt- und Blechblasinstrumenten insgesamt deutlich erkennbar, dass sie sich nicht nur in ihren Formantpositionen voneinander abheben, sondern auch in Abhängigkeit von ihren Dynamikstufen (besonders beim Horn). Wenn man bedenkt, dass Musikinstrumente sowohl in verschiedenen Dynamikstufen als auch in verschiedenen Registern unterschiedlich klingen, ergibt sich ein aufschlussreiches Bild, wenn man die Mittelwerte und Standardabweichungen der Formantbereiche bei verschiedenen Registern in *ff* und *pp* miteinander in Beziehung setzt: So lassen sich nach der formantbasierten Theorie der Verschmelzung und partiellen Verdeckung [12][13] register- und dynamikbezogen auditiv gut separierbare Instrumentenkombinationen zusammenstellen (bei nicht überlappenden Formantbereichen zwischen den beteiligten Instrumenten), ebenso wie gut verschmelzende d.h. auditiv schwer bzw. so gut wie nicht separierbare Instrumentenkombinationen (bei stark überlappenden Formantbereichen).

Bei einem zweiseitigen t-Test über alle Instrumente in allen Tonhöhen und in beiden Dynamikstufen zeigten sich die Formanten 1 und 2 in den meisten Fällen als im Mittel signifikant unterschiedliche Klangfarbenmerkmale (Formant 1: bei 100 von 120 ( $p < 0,05$ ) bzw. 87 von 120 möglichen Kombinationen ( $p < 0,01$ ); Formant 2: bei 107 von 120 ( $p < 0,05$ ) bzw. 100 von 120 möglichen Kombinationen ( $p < 0,01$ ). Eine formantbasierte Separierbarkeit konnte vor allem bei den Flöten und Klarinetten aufgrund der dort so gut wie nicht vorhandenen Formantstrukturen nur wenig ermittelt werden. Bei den Blechblas- und Doppelrohrblatt-

instrumenten hingegen zeigten sich die Formanten als ausgeprägt gut separierende Klangfarben-Deskriptoren.

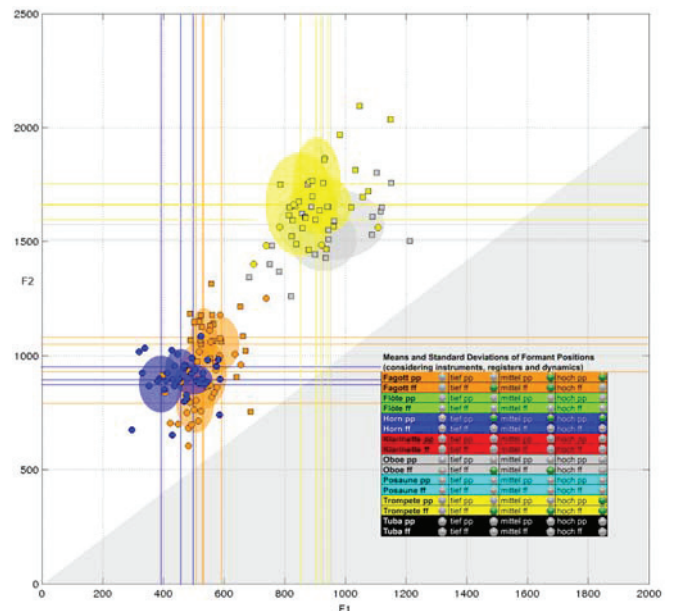


**Abbildung 5:** Aufgrund von unterschiedlichen Formantebereichen in den verschiedenen Registern und Dynamikstufen gut separierbare Instrumentenklänge von (v.l.n.r., v.u.n.o): Tuba (schwarz, Mittelregister, *pp*); Fagott (orange, tiefes Register, *pp*); Horn (blau, hohes Register, *pp*); Posaune (hellblau, tiefes Register, *pp*); Fagott (orange, Mittelregister, *ff*); Flöte (grün, tiefes Register, *ff*); Klarinette (rot, tiefes Register, *ff*); Oboe (grau, tiefes Register, *ff*); Posaune (hellblau, hohes Register, *ff*), Trompete (gelb, Mittelregister, *ff*); Horn (blau, Mittelregister, *ff*).



**Abbildung 6:** Aufgrund von übereinstimmenden Formantebereichen in den verschiedenen Registern und Dynamikstufen schlecht separierbare Instrumentenklänge von: Tuba (schwarz, Mittel- und hohes Register, *ff*); Trompete (gelb, tiefes Register, *pp*); Posaune (hellblau, Mittel- und hohes Register, *pp*), Klarinette (rot, tiefes Register, *pp*); Horn (blau, hohes Register, *pp*), Flöte (grün, tiefes Register, *pp*); Fagott (orange, tiefes und Mittelregister, *ff*).

Auch die in den Instrumentationslehren immer wieder zu findende Beobachtung/Anweisung, dass Horn und Fagott besonders gut miteinander verschmelzen ebenso wie Trompete und Oboe, während Horn und Oboe oder Trompete und Fagott nie als klanglich verschmelzende Kombinationen in Betracht gezogen werden und eher als hervorragend separierbar gelten [14], lässt sich mit Hilfe des Formantenfelds nicht nur sehr gut wiederfinden sondern auch noch genauer auf bestimmte, besonders günstige Dynamik- und Registerbereiche zurückführen:



**Abbildung 7:** Überlappende Formantebereiche bei Fagott (orange, tiefes Register, *pp*, Mittel- und hohes Register, *pp* und *ff*) und Horn (blau, alle Register, *pp*) sowie bei Trompete (gelb, alle Register, *ff*, hohes Register, *pp*) und Oboe (grau, tiefes und Mittelregister, *ff*).

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung von Klangkombinationen im Formantenfeld bietet aufgrund der seit langem erforschten Formantebereiche einen generalisierbaren und intuitiven Zugang zur möglichen Verschmelzung und Separierbarkeit von Blasinstrumentenkombinationen (vor allem bei Blechblas- und Doppelrohrblattinstrumenten). Im Gegensatz zu den für die Darstellung von Klangfarben eher ungeeigneten und nicht generalisierbaren Timbre Spaces [19][20] lassen sich im Formantenfeld die Klangfarben ganzer Musikinstrumente in verschiedenen Registern und Dynamikstufen vergleichend darstellen.

In weiteren Schritten soll das Formantenfeld um weitere Dimensionen wie Formantbreite sowie zeitliche Deskriptoren wie Einschwingvorgang, Fluktuationen etc. erweitert werden. Darüber hinaus soll anhand von Hörversuchen überprüft werden, inwieweit der Abstand der Formantpositionen zwischen zwei Klängen mit der empfundenen Klangähnlichkeit korreliert.

Die vorliegende Arbeit wurde vom Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank gefördert (OeNB Projekt 16473) sowie von der Vienna Symphonic Library (VSL) mit zwei Super Packages unterstützt.

## Literatur

- [1] Helmholtz, H.v.: Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Vieweg, Braunschweig, 1863
- [2] Grey, J.: An Exploration of musical timbre. CCRMA Stanford University 1975.
- [3] Stumpf, C.: Die Sprachlaute. Springer, Berlin, 1926.
- [4] Siedenburg, K.; Jones-Mollerup, K.; McAdams S.: Acoustic and categorical dissimilarity of musical timbre: Evidence from asymmetries between acoustic and chimeric sounds. *Frontiers in Psychology*, 6:1977 (2016), doi: 10.3389/fpsyg.2015.01977.
- [5] Loughran, R.; Walker, J.; O'Neill, M.; O'Farrell, M.: Musical instrument identification using principal component analysis and multi-layered perceptrons. *International Conference on Audio, Language and Image Processing ICALIP 2008*, S. 643-648.
- [6] Elliott, T.; Hamilton, L.; Theunissen, F.: Acoustic Structure of the five Perceptual Dimensions of Timbre in Orchestral Instrument Tones. *JASA* 133:1 (2013), S. 389-404.
- [7] Schumann, K.E.: Physik der Klangfarben. Berlin 1929.
- [8] Mertens, P.-H.: Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik. Bochinsky, Frankfurt 1975.
- [9] Meyer, J.: Akustik und Musikalische Aufführungspraxis. PPV Medien, Bergkirchen, 2015.
- [10] Fricke, J.P.: Formantbildende Impulsfolgen bei Blasinstrumenten. *Fortschritte der Akustik, DAGA '75*, Weinheim, Braunschweig 1975, S. 407-411.
- [11] Voigt, W.: Untersuchungen zur Formantbildung in Klängen von Fagott und Dulzianen. Bosse, Regensburg, 1975.
- [12] Fricke, J.P.: Zur Anwendung digitaler Klangfarbenfilter bei Aufnahme und Wiedergabe. Bericht der 14. Tonmeistertagung, München 1986, S. 135-148.
- [13] Reuter, C.: Die auditive Diskrimination von Orchesterinstrumenten. Lang, Frankfurt, 1996.
- [14] Reuter, C.: Klangfarbe und Instrumentation. Lang, Frankfurt, 2002.
- [15] Reuter, C.: Verschmelzung und partielle Verdeckung. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2000*, Oldenburg 2000, S. 176-177.
- [16] Boersma, P.; Weenink, D. Praat: doing phonetics by computer [Computer program], Version 5.3.51, retrieved 2 June 2013 URL: <http://www.praat.org/>
- [17] Sirker, U.: Strukturelle Gesetzmäßigkeiten in den Spektren von Blasinstrumentenklängen. *Acustica* 30 (1974), S. 49-59.
- [18] Lembke, S.-A.; McAdams, S.: The Role of Spectral-Envelope Characteristics in Perceptual Blending of Wind-Instrument Sounds. *Acta Acustica united with Acustica* 101 (2015), S. 1039 – 1051.
- [19] Siddiq, S.; Reuter, C.; Czedik-Eysenberg, I.: Kein Raum für Klangfarben – Timbre Spaces im Vergleich. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2014*, 10.-13. März, Oldenburg 2014, S. 56-57.
- [20] Siddiq, S.; Reuter, C.; Czedik-Eysenberg, I.; Knauf, D.: Towards the Comparability and Generality of Timbre Space Studies. *Proceedings of the Third Vienna Talk on Music Acoustics*, 16–19 Sept. 2015, University of Music and Performing Arts Vienna 2015, S. 232-235.