Tonhöhenverteilungen im klassischen Orchesterrepertoire

Roman Quiring[1], Stefan Weinzierl[1]

[1] TU Berlin, FG Audiokommunikation, Email: roman.a.quiring@campus.tu-berlin.de, stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Einleitung

Akustische Größen wie die Schallleistung, die Richtcharakteristik oder die spektrale Intensitätsverteilung von Musikinstrumenten sind stark von der gespielten Tonhöhe abhängig. Dies gilt insbesondere für Instrumente, bei denen sich nicht nur das Verhältnis von Strahlerfläche zu Wellenlänge, sondern die Geometrie des Strahlers selbst verändert, etwa bei Holzblasinstrumenten mit offenen oder geschlossenen Grifflöchern.

Um für eine Dokumentation der tonhöhenabhängigen Eigenschaften von Musikinstrumenten oder für eine Modellierung im Rahmen virtueller akustischer Umgebungen sinnvolle Mittelwerte dieser akustischen Größen bilden zu können, wurde in der vorliegenden Untersuchung die Verteilung von Tonhöhen in Orchesterwerken der Wiener Klassik ermittelt. Das untersuchte Korpus umfasst einen Großteil der Sinfonien von J. Haydn, W.A. Mozart, L.v. Beethoven und F. Schubert. Die Tonhöhenverteilungen wurden für jede Stimme, d.h. für jeden Instrumententyp aus MIDI-Darstellungen der jeweiligen Partituren extrahiert.

Die Verteilungen und daraus abgeleitete Kennwerte können nicht nur für akustische Fragestellungen, sondern auch für Anwendungen des Music Information Retrieval eingesetzt werden, etwa zur Genre-Klassifizierung [1], zur Identifikation struktureller Merkmale [2] zur Bestimmung musikalischer Ähnlichkeitsmaße [3], oder als Basis für Methoden zur computergestützten Tonarterkennung und entsprechender psychoakustischer Modelle [4].

Datengrundlage

Die optimale Grundlage der Datengewinnung ist eine symbolische Musikrepräsentation. Im Vergleich dazu würde die Verwendung von Tonaufnahmen sowohl die zuverlässige Identifikation einzelner Töne als auch der zugehörigen Instrumente unnötig erschweren, da diese Informationen hier nicht explizit dargestellt werden. Das gesuchte Format sollte stattdessen nicht nur alle Tonhöhen eindeutig angeben, sondern auch Informationen zur Instrumentierung bereitstellen.

Es kommen prinzipiell mehrere Repräsentationen in Frage, die explizite Informationen über Instrumentierung und Tonsatz bereitstellen. Insbesondere Musikformate wie MusicXML und Lilypond sind im digitalen Notensatz weit verbreitet; größere Sammlungen sinfonischer Werke liegen in diesen Formaten jedoch nicht vor oder sind für die Forschung nicht frei zugänglich.

Das MIDI-Format hingegen war für lange Zeit der Defacto-Standard für den Notensatz und die digitale Klangsynthese und spielt in diesem Bereich auch heute noch eine wichtige Rolle. Dementsprechend viele musikalische Werke sind in diesem Format frei verfügbar und bieten eine gute Grundlage für das Erstellen einer umfangreichen musikalischen Datensammlung. Für die vorliegende Untersuchung wurden daher Daten im MIDI-Format verwendet, welche aus einer großen Online-Musikdatenbank [5] gewonnen wurden.

Die Richtigkeit und Vollständigkeit der Daten wurde darüber hinaus anhand der Partituren aller in Frage kommenden sinfonischen Werke der vier Komponisten J. Haydn, W.A. Mozart, L.v. Beethoven und F. Schubert überprüft, die von einer weiteren Online-Datenbank [6] bezogen wurden.

MIDI-Format

Im MIDI-Format sind musikalische Ereignisse als Stream sogenannter *MIDI-Events* kodiert. Für diese Untersuchung sind insbesondere die Events `NOTE ON` und `NOTE OFF` von Interesse, da mit diesen die auftretenden Tonhöhen als numerische Werte kodiert werden. Der darstellbare Tonumfang umfasst mehr als 10 Oktaven, mit 128 diskreten Werten von 0 / C_{-1} bis 127 / G_9 für MIDI-Nummer / ISO Tonhöhe [7] und Grundfrequenzen von 8,176 Hz bis 12544 Hz.

Die Dauer eines Tons wird implizit durch die zeitliche Differenz dieser beiden Ereignisse ausgedrückt. Anders als bei anderen Musikrepräsentationen werden den Tönen also keine Notenwerte zugewiesen, stattdessen kann man sie aus der Tondauer ableiten. Diese wird in sogenannten *Ticks* gemessen. Dabei handelt es sich um eine relative Zeiteinheit, deren Referenz von Datei zu Datei variieren kann. Unmittelbar am Anfang der MIDI-Dateien ist daher mit den *Pulses Per Quarter Note* (PPQN) ein numerischer Wert hinterlegt, welcher die zeitliche Auflösung der Daten als Unterteilung der Dauer eine Viertelnote bestimmt. Analog dazu werden auch alle anderen Notenwerte bzw. Tondauern diskret dargestellt. Die zeitliche Struktur gleicht somit einem Raster, an dem die MIDI-Events ausgerichtet sind. Jedes Event ist mit einem Zeitstempel versehen, der den exakten Zeitpunkt seines Autretens markiert.

Die Events sind verschiedenen *MIDI-Tracks* zugeteilt, welche typischerweise unterschiedliche Stimmen oder – im Fall orchestraler Musik – die verschiedenen Instrumente repräsentieren. Die Tracks können durch spezielle `META`-Events mit Namen und weiteren Metadaten versehen werden, die im vorliegenden Fall für die Identifikation der einzelnen Instrumente ausgewertet wurden.

Neben den genannten Ereignissen gibt es weitere MIDI-Events, etwa Anweisungen für die Klangsynthese, die

durch das `PROGRAM`-Event ausgedrückt werden. In 128 Programmplätzen sind verschiedene Klänge definiert, welche innerhalb eines Tracks frei verwendbar sind: So können vom Klangerzeuger z.B. Pizzicato-Passagen von Streichinstrumenten entsprechend synthetisiert werden. Tempo- und Taktänderungen werden auf ähnliche Weise realisiert.

Methoden

Bei der Korpuserstellung mussten die verfügbaren Datensätze zunächst auf ihre Verwendbarkeit überprüft werden, bevor die Tonhöhenverteilungen aus den MIDI-Daten extrahiert und für die weitere Verarbeitung in ein Textformat überführt wurden. Dieser Vorgang erfolgte in mehreren Schritten, die unter Verwendung der Software-Entwicklungsumgebung MATLAB weitestgehend automatisiert wurden. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Vorgehensweise.

Schließlich erfolgte eine Auswertung der in Form von Tonhöhen-Histogrammen vorliegenden finalen Datensätze. Die darin ausgedrückten diskreten Verteilungen wurden mittels Kerndichteschätzung in eine stetige Dichtefunktion überführt [8]. Boxplots der Verteilungen geben darüber hinaus einen anschaulichen Überblick über die Schwerpunkte der verschiedenen Instrumente im jeweiligen Repertoire, sowie über den gesamten verwendeten Tonumfang (Abbildung 3).

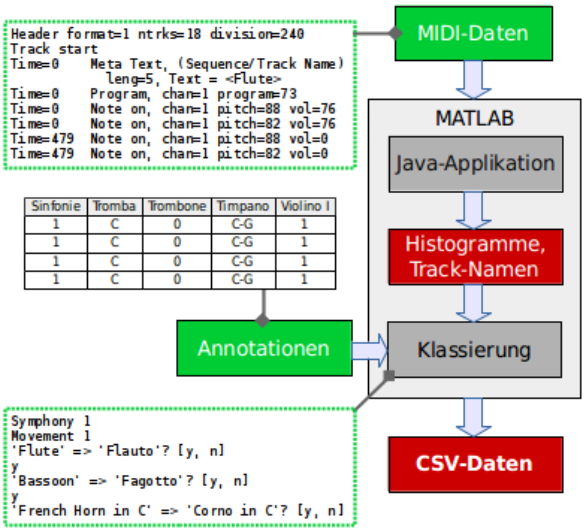

Abbildung 1: Datengewinnung.

Der Musikdatenbank wurden zunächst sämtliche dort verfügbaren sinfonischen Werke der vier Komponisten entnommen. Da viele der Werke von unterschiedlichen Autoren kodiert wurden und daher in mehreren Versionen vorlagen, mussten die Daten verglichen, auf Vollständigkeit überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Für die anschließend notwendige Reduktion der Daten wurden mit Blick auf die vielfältigen möglichen Fragestellungen folgende Ausschlusskriterien definiert:

- strukturelle Vollständigkeit: Alle Sätze einer Sinfonie müssen vorhanden sein
- Trennbarkeit: Alle Sätze müssen einzeln kodiert sein
- musikalische Vollständigkeit: Alle in der Partitur notierten Instrumente und ihr Tonmaterial müssen lückenlos kodiert sein
- Singularität: Jedes Werk darf im finalen Korpus nur einmal vertreten sein

In den beiden ersten Schritten wurden daher sämtliche Datensätze ausgeschlossen, bei denen nicht alle Sätze einer Sinfonie enthalten oder mehrere Sätze in einer MIDI-Datei zusammengefasst waren. Um anschließend die musikalische Vollständigkeit der Daten untersuchen zu können galt es den Inhalt der Dateien zu dekodieren.

Analyse der MIDI-Daten

Für die Datenanalyse wurde eine Software-Anwendung entwickelt, welche aus den einzelnen MIDI-Tracks die Tonhöhenverteilungen extrahiert und mit den Track-Namen verknüpft. Die Daten mussten also sequenziell verarbeitet und die entsprechenden MIDI-Events erkannt und registriert werden. Da MATLAB keine nativen Programmierschnittstellen für diese Funktionalität bietet, wurde auf die Programmiersprache Java ausgewichen. Die Applikation kann so einerseits die Vorteile der *Java Sound API* nutzen, andererseits jedoch auch ohne Einschränkungen in MATLAB verwendet werden.

Die Ermittlung der Tonhöhenverteilungen erfolgte über Histogramme, welche den gesamten MIDI-Tonumfang umfassten. Bei der Analyse wurden alle Töne den betreffenden Klassen zugeordnet, d.h. die Werte des Histogramms wurden entsprechend der Anzahl auftretender Töne inkrementiert. Das Tonmaterial jedes Tracks wurde auf diese Weise in ein Histogramm überführt.

Als gültige Töne wurden `NOTE ON`-Events mit einem positiven Lautstärkewert definiert. Diese Einschränkung ist notwendig, da das Ende eines Tons in der Praxis oftmals nicht durch ein entsprechendes `NOTE OFF`-Event, sondern durch ein wiederholtes `NOTE ON`-Event mit der Lautstärke 0 markiert wird (vgl. Datenauszug in Abbildung 1); dabei handelt es sich um eine Eigenheit der verwendeten Datengrundlage. Ein schlichtes Zählen der tonalen Ereignisse ohne Berücksichtigung ihrer Lautstärke würde das Ergebnis also stark verfälschen.

Während der sequenziellen Analyse wurden zudem die Werte der `TRACK NAME`-Events festgehalten. Da diese die Informationen zur Instrumentierung enthalten, werden alle Datensätze ausgeschlossen, bei denen diese Angabe fehlt. Zudem wurden 'leere' Tracks, d.h. solche ohne musikalischen Inhalt, mit diesem Schritt verworfen: Oftmals verwenden die Autoren Tracks ausschließlich für die Einbettung schriftlicher Informationen über das Werk oder die Definition von Tempoangaben.

Die entwickelte Anwendung verknüpft schließlich die gültigen Tracks mit den zugehörigen Tonhöhenverteilungen und stellt alle Informationen über eine Schnittstelle bereit, so dass die Daten in MATLAB verwendet werden können.

Klassierung

Zur Prüfung auf Vollständigkeit hinsichtlich der kodierten Instrumente wurden die jeweiligen Partituren verwendet, anhand derer Referenztabellen für die verwendeten Instrumente angelegt wurden. Darüber hinaus wurden in diesem Schritt weitere Metadaten hinzugefügt, etwa die Opus-Nummer, die Satzbezeichnung, und gegebenenfalls die Stimmung transponierender Instrumente.

Der Inhalt der MIDI-Dateien wurde nach dem beschriebenen Verfahren analysiert und den korrekten Instrumenten zugeordnet. Aufgrund der großen Datenmenge wurde dabei auf ein computergestütztes Verfahren zurückgegriffen: Mit einer MATLAB-Anwendung wurden die Track-Namen zunächst unter Verwendung regulärer Ausdrücke mit den in den Referenztabellen definierten Instrumenten abgeglichen. Die so gefundenen Wertpaare wurden dann in einem halbautomatischen Prozess manuell bestätigt oder korrigiert. In Abbildung 1 wird eine beispielhafte Bildschirmausgabe der Anwendung gezeigt. Eine vollständig automatisierte Lösung war aufgrund der großen Unterschiede in der Namensgebung der Tracks, die wiederum der Vielzahl unterschiedlicher Autoren geschuldet sind, nicht möglich.

Datenreduktion

Schließlich mussten alle Datensätze inspiziert und etwaige verbleibende Duplikate nach geeigneten Kriterien eliminiert werden um das Singularitätskriterium zu erfüllen. Hinsichtlich des musikalischen Inhalts zeigten sich Differenzen in den Versionen der verschiedenen Autoren, die vor allem auf editorische Unterschiede des von ihnen für die Kodierung verwendeten Ausgangsmaterials zurückzuführen sind. Zudem besteht ein gewisser Spielraum in der Interpretation von Variationen beziehungsweise bestimmter kompositorischer Stilmittel wie Verzierungen.

Da Abweichungen im Hinblick auf die Kodierung vor allem zwischen verschiedenen Autoren beobachtet wurden, während die Datensätze derselben Autoren weitgehend einheitlich kodiert waren, wurden von den verbleibenden Duplikaten diejenigen Datensätze in das finale Korpus aufgenommen, deren Autoren bereits vertreten waren, mit dem Ziel, eine möglichst große Konsistenz im Hinblick auf die Kodierung der Datensätze zu erreichen.

Ergebnisse

Das finale Korpus enthält insgesamt 77 Orchesterwerke der Wiener Klassik. Datensätze zu 14 Instrumenten stehen für alle Sinfonien und ihre einzelnen Sätze zur Verfügung. Insgesamt wurden dafür über 2,6 Millionen Einzeltöne analysiert. Als Grundlage dienten MIDI-Daten acht unterschiedlicher Autoren, wobei vier davon lediglich durch ein einzelnes Werk vertreten sind, welches in keiner anderen Version vorlag. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht des verwendeten Repertoires.

Die Tonhöhenverteilungen der verschiedenen Instrumente weisen im Hinblick auf Lage und Streuung erwartungsgemäß deutliche Unterschiede auf. Abbildung 2 zeigt exemplarisch das Tonhöhen-Histogramm der ersten Violine für die 9 Sinfonien L.v. Beethovens, die Quantile sowie die geschätzte Dichtefunktion.

Tabelle 1: Analysiertes Repertoire.

Komponist	Anzahl Sinfonien	davon analysiert	Sinfonien
J. Haydn (1732–1809)	104	47	1-8, 26, 28, 30, 31, 46-49, 60, 62-73, 82-102, 104
W.A. Mozart (1756–1791)	41	15	1, 6, 7, 17, 24, 27, 28, 30, 31, 35, 36, 38-41
L.v. Beethoven (1770–1827)	9	9	1-9
F. Schubert (1797–1828)	8	6	1, 4-6, 8, 9

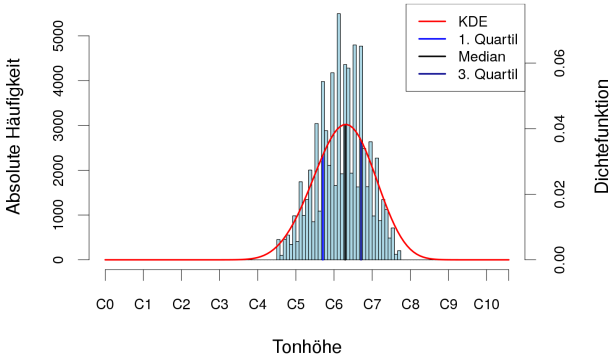

Abbildung 2: Tonhöhen-Histogramm für die Violine I, berechnet über die Sinfonien Nr. 1-9 von L.v. Beethoven, mit dem 25%, 50% und 75% Quantil, sowie mit einer durch Kerndichteschätzung (Kernel density estimation, KDE) gewonnenen Dichtefunktion.

Die Tonhöhenverteilungen sind mit wenigen Ausnahmen annähernd normalverteilt. Lediglich die Pauke, die in der Regel nur zwei Töne spielt, weist eine bimodale Verteilung auf. Sie wurde von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Unterschiede in den Tonhöhenverteilungen der einzelnen Instrumente und der vier betrachteten Komponisten illustriert ein Boxplot für die Verteilungen aller Instrumente (Abbildung 3). Die Lage- und Streungsmaße weisen bei verschiedenen Komponisten für einige Instrumente signifikante Unterschiede auf, die auf individuelle oder historisch bedingte Veränderungen bei der Verwendung dieser Instrumente hinweisen. So zeigt sich etwa, dass die Flöte von Haydn (1732–1809) über Mozart (1756–1791) bis Beethoven (1770–1827) in zunehmend höherer Lage eingesetzt wird.

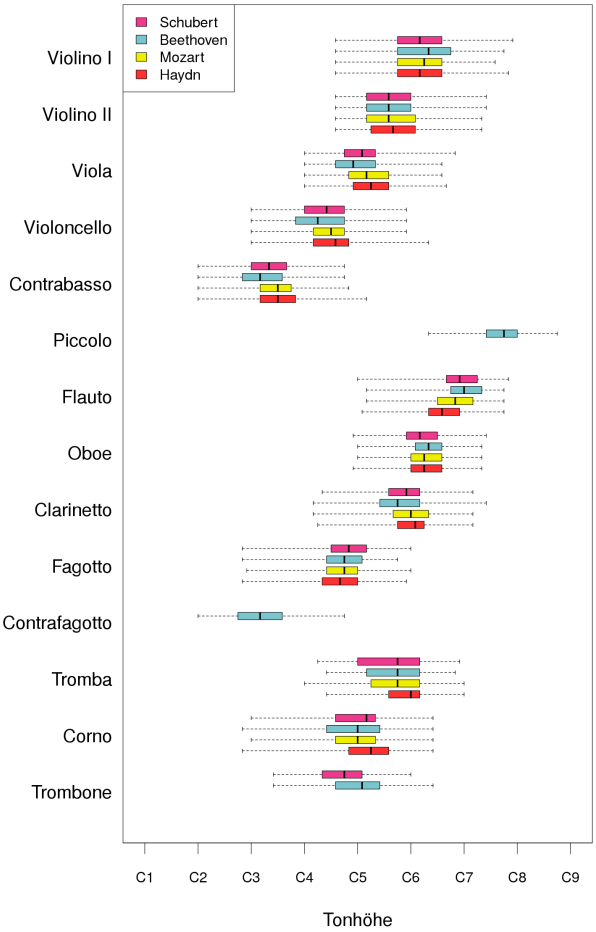

Abbildung 3: Boxplots für die Tonhöhenverteilungen aller Instrumente für die vier betrachteten Komponisten im Vergleich. Angegeben ist der Median, der Interquartilbereich (Box) sowie als Whisker der gesamte Tonumfang der Instrumente.

Diskussion

Durch die analysierten Tonhöhenverteilungen wird es möglich, für zahlreiche akustische Größen wie die Schallleistung, die Richtcharakteristik oder die spektrale Intensitätsverteilung gewichtete Mittelwerte zu bilden. Insbesondere vor dem Hintergrund virtueller akustischer Umgebungen, z.B. der Simulation musikalischer Ensembles, ist diese Betrachtung von Interesse. Die Mittelwerte können auf ein bestimmtes Repertoire bezogen werden, etwa die neun Sinfonien von L.v. Beethoven als den „Kernbestand“ klassischer Sinfoniekonzerte, dessen Daten für die Nachnutzung elektronisch veröffentlicht wurden [9].

Vorgesehen ist darüber hinaus ein Einsatz der Verteilungen bei der automatischen Klassifizierung von Musikinstrumenten, sowie die Untersuchung vielfältiger musikwissenschaftlicher Fragen zu Praktiken der Komposition und Instrumentation.

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Ausgangsdaten zeigte sich, dass die heterogene Urheberschaft sowie der interpretatorische Spielraum bei der Kodierung des Notensatzes gewisse Inkonsistenzen zur Folge haben können. Auch mussten einige Datensätze manuell korrigiert werden, meist im Hinblick auf fehlerhafte Oktavangaben einzelner Töne. Angesichts der Größe des analysierten Korpus kann der Einfluss von sporadisch fehlerhaften Einzeltönen auf die Kennwerte der Verteilungen jedoch vernachlässigt werden.

Literatur

[1] Tzanetakis, G., Ermolinskyi, A. & Cook, P.: Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval. ISMIR Proceedings (2002), 31–38

[2] Dighe, P., Karnick, H. & Raj, B.: Swara Histogram Based Structural Analysis And Identification Of Indian Classical Ragas. ISMIR Proceedings (2013), 35–40

[3] Mardirossian, A. & Chew, E.: Music Summarization via Key Distributions: Analyses of Similarity Assessment. ISMIR Proceedings (2006), 234–239

[4] Krumhansl, C.: Cognitive Foundations of Musical Pitch. Oxford University Press, Oxford, 2001

[5] ClassicalArchives – The largest classical music site in the world. URL: `http://www.classicalarchives.com` (zuletzt aufgerufen am 31.03.2016)

[6] International Music Score Library Project. URL: `http://www.imslp.org` (zuletzt aufgerufen am 31.03.2016)

[7] ISO 16:1975. Acoustics – Standard tuning frequency (Standard musical pitch). International Organization for Standardization, Geneva, 1975

[8] Botev, Z. I., Grotowski, J. F. & Kroese, D. P.: Kernel density estimation via diffusion. The Annals of Statistics 38 (2010), 2916–2957

[9] Quiring, R. & Weinzierl, S.: Pitch distributions for individual instruments in the symphonies No. 1-9 of L.v. Beethoven. URL: `http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5040`

[10] London, J.: Building a Representative Corpus of Classical Music. Music Perception: An Interdisciplinary Journal 31 (2013), 68–90