

## Neue Wege für die Musikforschung

### Computergestützte Analyse harmonischer Strukturen

Christof Weiß<sup>1</sup>, Meinard Müller<sup>2</sup>, Stephanie Klauk<sup>3</sup> und Rainer Kleinertz<sup>4</sup>

**Abstract:** In dem von der DFG geförderten interdisziplinären Projekt „Computergestützte Analyse harmonischer Strukturen“ geht es um die Entwicklung computergestützter Konzepte, mit denen große Datenbestände von Musikaufnahmen verarbeitet und hinsichtlich harmonischer Strukturen analysiert werden können. Die musikwissenschaftliche Relevanz der zu entwickelnden Konzepte wird dabei paradigmatisch anhand der Analyse großer Werkzyklen wie zum Beispiel der Klaviersonaten von Ludwig van Beethoven verifiziert. In diesem Beitrag geben wir einen kleinen Einblick in ein solches computergestütztes Analyseverfahren, das die Visualisierung von tonalen Verläufen auf Basis von Musikaufnahmen ermöglicht. Hierbei werden unter Verwendung von Methoden der digitalen Signalverarbeitung und Mustererkennung geeignete Tonklasseninformationen aus den Audiodaten extrahiert und diatonische Tonalitätsverläufe abgeleitet. Die resultierenden Zeit–Diatonik-Darstellungen können schließlich visuell aufbereitet und für weitere Analysen verfügbar gemacht werden. Anhand zweier konkreter Musikbeispiele deuten wir das Potential solcher computergestützter Visualisierungsmethoden für die musikalische Korpusanalyse an.

**Keywords:** Musikverarbeitung, Harmonieanalyse, Signalverarbeitung, Visualisierung.

## 1 Einleitung

Die Analyse musikalischer Werke hinsichtlich verschiedener Aspekte wie Melodik, Harmonik oder Form stellt eine wichtige Grundlage des Erkenntnisgewinns in der Musikwissenschaft dar. Typischerweise wird eine Komposition dabei von Expert:innen unter Anwendung musiktheoretischer Konzepte beschrieben und bewertet. Für eine Systematisierung dieses Prozesses und dessen Ausweitung auf größere Werkbestände können (teil-)automatisierte Methoden von Nutzen sein. Auf Seite der Informatik hat es in den letzten zwanzig Jahren erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von computergestützten Methoden und Werkzeugen zur Erschließung und Analyse von Musikdaten, gegeben. Hierbei hat sich das neuartige

---

<sup>1</sup> Center for AI and Data Science, Universität Würzburg, Emil-Hilb-Weg 23, Hubland Nord (ZPD), 97074 Würzburg, christof.weiss@uni-wuerzburg.de

<sup>2</sup> International Audio Laboratories Erlangen, Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen, meinard.mueller@audiolabs-erlangen.de

<sup>3</sup> Institut für Musikwissenschaft, Universität des Saarlandes, Campus Geb. C6-3, 66123 Saarbrücken, s.klauk@mx.uni-saarland.de

<sup>4</sup> Institut für Musikwissenschaft, Universität des Saarlandes, Campus Geb. C6-3, 66123 Saarbrücken, rainer.kleinertz@mx.uni-saarland.de

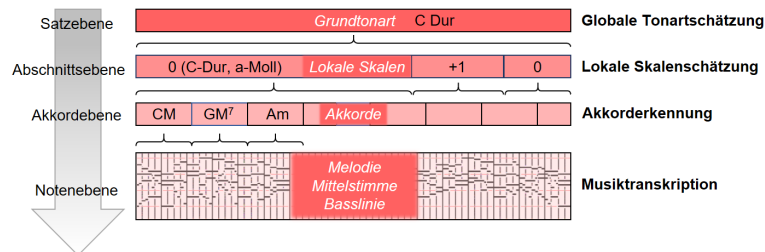


Abb. 1: Unterschiedliche Aufgabenstellungen der harmonischen Analyse bezüglich verschiedener Zeitskalen.

Forschungsgebiet der digitalen Musikverarbeitung etabliert, welches im Englischen auch unter dem Namen „Music Information Retrieval“ (MIR) bekannt ist. Vor dem Hintergrund der explosionsartigen Zunahme digitaler Inhalte, welche in unterschiedlichen Formaten und Ausprägungen gegeben sein können, hat dieses Forschungsgebiet enorm an Bedeutung gewonnen und eröffnet damit auch neue Wege für die Musikwissenschaft. Auf einen solchen Weg wollen wir in diesem Beitrag im Kontext der Analyse harmonischer Strukturen näher eingehen.

Im Bereich des MIR nimmt die harmonische Analyse von als Audiodaten gegebenen Musikaufnahmen eine zentrale Rolle ein. Dies ist nicht verwunderlich, stellt doch die Harmonik ein grundlegendes Prinzip westlicher Musik dar und spielt eine Schlüsselrolle für die formale Gestaltung von Musikwerken. Abhängig von der Zeitskala, also dem betrachteten zeitlichen Kontext, führt die harmonische Analyse zu unterschiedlichen MIR-Aufgabenstellungen, angefangen von der Bestimmung der Grundtonart eines gesamten Stückes oder eines Satzes [NS06], über die Schätzung lokaler Tonarten [WSM20] und Skalen [WH14], bis hin zur Extraktion von Akkordfolgen [CB14; KMK13; Pa19]. Auf noch feineren zeitlichen Skalen geht die harmonische oder tonale Analyse nahtlos in Fragestellungen der Musiktranskription [Be19] über. Für einen schematischen Überblick verweisen wir auf Abbildung 1. Die Analyse eines Musikstücks hinsichtlich auftretender tonaler Strukturen kann durchaus problematisch sein. Für komplexe Musikwerke sind sich Musikwissenschaftler:innen oft nicht in der Deutung harmonischer Verläufe einig. Unterschiedliche musiktheoretische Konzepte (Tonarten-, Funktionsbezeichnungen oder reduktionistische Notationen im Stile Heinrich Schenkers) liefern mehr oder weniger komplexe Beschreibungen, welche eine aufwändige Analyse erfordern und oft auch dem Spezialisten keinen intuitiven Überblick ermöglichen. Weiterhin hängt die Analyse von der jeweiligen Fragestellung, der musikalischen Stilistik sowie der betrachteten Zeitskala ab. Automatisierte Methoden zur Harmonieanalyse stoßen hier schnell an ihre Grenzen.

Anstatt eine explizite harmonische Analyse durchzuführen, geht es in diesem Beitrag um Visualisierungskonzepte, die automatisch gemessene harmonische Strukturen grafisch darstellen. Grundlage für unseren Beitrag sind die in [We17; WM21] vorgestellten Methoden zur Visualisierung von Akkorden und Skalen. Hierbei werden in einem gewissen mathema-

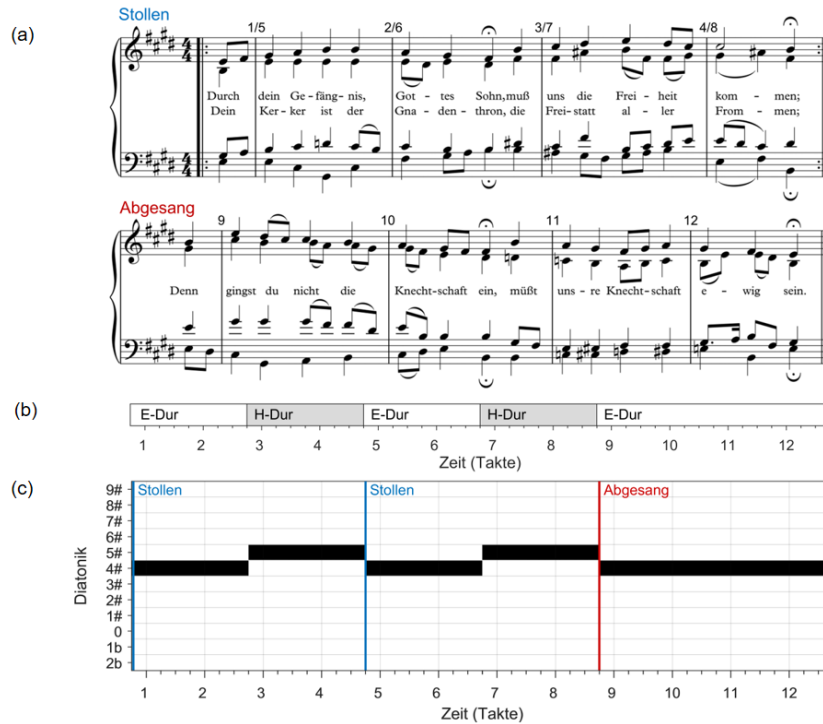


Abb. 2: Beispielhaftes Analyseszenario anhand des Chorals „Durch Dein Gefängnis“ aus der Johannespassion (BWV 245) von Johann Sebastian Bach. (a) Klavierauszug mit Formteilen, nach Walter Heinz Bernstein, Bärenreiter 1981, 18. Auflage 2012. (b) Manuelle Tonartanalyse (Beispiel). (c) Visualisierung des Tonalitätsverlaufs in Form einer Zeit-Diatonik-Darstellung.

tischen Sinne Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten lokaler harmonischer Strukturen über die Zeit hinweg dargestellt. Eine solche Visualisierung hinsichtlich diatonischer Skalen findet man zum Beispiel in Abbildung 4 für einen Bach-Choral und in Abbildung 5 für den Kopfsatz einer Beethoven-Sonate. In Abschnitt 2 gehen wir näher auf die Visualisierungsmethode ein und zeigen dann in Abschnitt 3 anhand eines konkreten Beispiels – dem Kopfsatz einer Klaviersonate Beethovens – wie dieses Konzept zur Exploration größerer Werkzyklen eingesetzt werden kann.

## 2 Visualisierungskonzept

Im Folgenden beschreiben wir unser Konzept zur Visualisierung harmonischer Strukturen und fassen die wesentlichen algorithmischen Schritte zur Berechnung solcher Visualisierungen zusammen. In diesem Abschnitt folgen wir eng der Darstellung von [WM21]. Zur Illustration des Verfahrens betrachten wir beispielhaft den Choral Nr. 22 „Durch Dein



Abb. 3: Diatonische Skalen als siebentönige Ausschnitte der Quintenreihe, nach [WH14] und [GN02]. Für die absolute Bezeichnung diatonischer Skalen (unabhängig von der Grundtonart) orientieren wir uns an den für die Notation erforderlichen Vorzeichen.

Gefängnis“ aus der *Johannespassion* (BWV 245) von Johann Sebastian Bach. Abbildung 2a zeigt einen Klavierauszug dieses Chorals. Eine typische Aufgabenstellung liegt in der Beschreibung lokaler Tonarten und Modulationen, wie in Abbildung 2b angedeutet. Hierbei spielt die Erfassung der Tonhöhen und entsprechender musiktheoretischer Konzepte wie Akkorde, Figuration und Stimmführung eine Rolle. Eine grafische Darstellung der Analyseergebnisse kann hierbei die tonalen und formalen Verhältnisse übersichtlich veranschaulichen, was besonders für Werke mit komplexer Modulationsstruktur von Vorteil sein kann.

Als konkretes Beispiel zeigt Abbildung 2c eine Visualisierung des Tonalitätsverlaufs in diesem Choral. Die horizontale Achse dieser zweidimensionalen Darstellung entspricht einer Taktachse, die den musikalischen Zeitverlauf wiedergibt. Die vertikale Achse entspricht den zwölf diatonischen Skalen, wie sie der westlichen diatonischen Dur-Moll-Tonalität zugrunde liegen (siehe Abbildung 3). Hierbei bezieht sich zum Beispiel die Skala 1♯ (oder +1) auf eine Diatonik mit einem ♯ (entspricht dem Tonvorrat von G-Dur oder e-Moll), 3b (oder -3) auf eine Diatonik mit drei b (Es-Dur oder c-Moll) und 0 auf die Diatonik ohne Vorzeichen (C-Dur oder a-Moll), welche den weißen Tasten des Klaviers entspricht. Ein Schwarzwert in der zweidimensionalen Darstellung gibt nun die jeweilige Diatonik zu einem gegebenen musikalischen Zeitpunkt an. Zum Beispiel visualisiert Abbildung 2c, dass sich der Choral in den ersten beiden Takten in der Diatonik 4♯ (hier E-Dur) bewegt und dann einen Schlag vor dem dritten Takt in die Diatonik 5♯ (H-Dur) wechselt.

Während die Visualisierung in Abbildung 2c aus der manuell erstellten Annotation in Abbildung 2b abgeleitet wurde, zeigen wir nun, wie sich eine solche Zeit-Diatonik-Darstellung automatisiert auf Basis von Musikaufnahmen berechnen lässt. Eine Alternative für eine solche Berechnung könnten auch Notentexte sein, die allerdings in einem computerlesbaren Format vorliegen müssten. Die Erstellung solcher digitaler Notentexte aus gedruckten Partituren muss dann entweder manuell erfolgen, was sehr zeitaufwändig ist, oder unter Einsatz von Software zur optischen Notenerkennung (*Optical Music Recognition*, kurz OMR), was jedoch in vielen Fällen zu stark fehlerbehafteten Ergebnissen führt [Ed21]. Ein Vorteil von Audiodaten liegt in der vergleichsweise einfachen Verfügbarkeit von Einspielungen für ein sehr breites Repertoire westlicher klassischer Musik. In den letzten Jahren hat sich der Zugang zu Musikaufnahmen durch Download- und Streamingdienste mit umfangreichen Beständen weiter vereinfacht.

Ausgangspunkt unseres Verfahrens ist also nun eine akustische Wellenform (im folgenden auch als *Signal* bezeichnet), wie in Abbildung 4a für eine Aufnahme des Bach-Chorals dargestellt. In einem ersten Schritt wird das Signal einer Spektralanalyse unterzogen [Mü21]. Dazu wird das Signal zunächst in lokale Zeitfenster unterteilt. Die Breite des Zeitfensters (gegeben in Sekunden) ist ein kritischer Parameter, der variabel gewählt und an die jeweiligen Anwendungserfordernisse angepasst werden kann (für unser Bach-Beispiel haben wir eine Breite von 4 Sekunden gewählt). Innerhalb eines Fensters werden nun die Anteile verschiedener Frequenzen berechnet, was unter anderem durch die Fouriertransformation realisiert werden kann. Dieses Zeitfenster wird nun über das Signal geschoben, sodass man für jeden Zeitpunkt eine lokale Frequenzverteilung erhält. Dies resultiert in einer Zeit–Frequenz-Darstellung, einem sogenannten *Spektrogramm*. Im Hinblick auf eine Harmonieanalyse westlicher Musik treffen wir die Annahme, dass der Tonhöhenvorrat hinreichend gut durch die zwölf chromatischen Tonhöhenklassen C, C♯, D, D♯, ..., H beschrieben werden kann. Auf Basis von Spektrogrammen ist eine enharmonische Unterscheidung von Tonhöhen wie z. B. C♯ (*cis*) und D♭ (*des*) nicht ohne Weiteres möglich. Ausgehend von einem Spektrogramm werden nun für jeden Zeitpunkt die Frequenzanteile auf die zwölf Tonhöhenklassen abgebildet und zu jeweils zwölf Koeffizienten pro Zeitpunkt zusammengefasst. Dies resultiert in einer Zeit–Chroma-Darstellung, einem sogenannten *Chromagramm*. Diese Darstellung erfasst die Energieverteilung des Musiksignals über die zwölf chromatischen Tonhöhenklassen im Verlauf der Zeit. Die Überführung von Musikaufnahmen in Chromagramme (als eine Zwischenstufe der Verarbeitungskette) ist eine grundlegende Vorgehensweise für unterschiedliche MIR-Aufgabenstellungen wie Tonartenbestimmung, Skalenanalyse und Akkorderkennung (siehe Abbildung 1). Für technische Details der zugrundeliegenden Signalverarbeitung verweisen wir auf [Mü21].

Die Betrachtung und Messung von Energieverteilungen in Tonhöhenklassen hat jedoch nur begrenzte Aussagekraft für harmonisch komplexere Sachverhalte. Sinnvollere Kategorien für diesen Zweck stellen Intervalle, Akkorde oder Skalen dar, die es durch eine geeignete Weiterverarbeitung zu erfassen gilt. Wir betrachten im folgenden die Skalenmessung bezogen auf die zwölf Diatoniken. Hierzu wird ein Chromagramm für jeden Zeitpunkt mit binären Prototypen verglichen, welche den Skalen entsprechen. Die 0-Diatonik (C-Dur, a-Moll) wird beispielsweise durch einen Prototyp modelliert, bei dem die Werte für die sieben Tonhöhenklassen C, D, E, F, G, A, H auf 1 und für die verbleibenden fünf Tonhöhenklassen C♯, D♯, F♯, G♯, A♯ auf 0 gesetzt werden. Über den lokalen Abgleich mit den zwölf unterschiedlichen Prototypen können Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten dieser harmonischen Strukturen über die Zeit ermittelt werden. Dies führt auf eine verallgemeinerte Zeit–Diatonik-Darstellung, bei der die Wahrscheinlichkeiten über ein Graustufen-Schema visualisiert werden können (wobei Schwarz zur Wahrscheinlichkeit 1 und Weiß zur Wahrscheinlichkeit 0 korrespondiert). Abbildung 4b zeigt eine solche Visualisierung für eine Aufnahme des Bach-Chorals. Zur Hervorhebung der wichtigen Strukturen können weitere Verarbeitungsschritte erforderlich sein. Beispielsweise kann eine zeitliche Glättung oder eine Anhebung der höheren Energiewerte sowie eine Unterdrückung der niedrigen, rauschartigen Werte zu deutlicheren visuellen Strukturen führen. Letzteres wird im vorliegenden

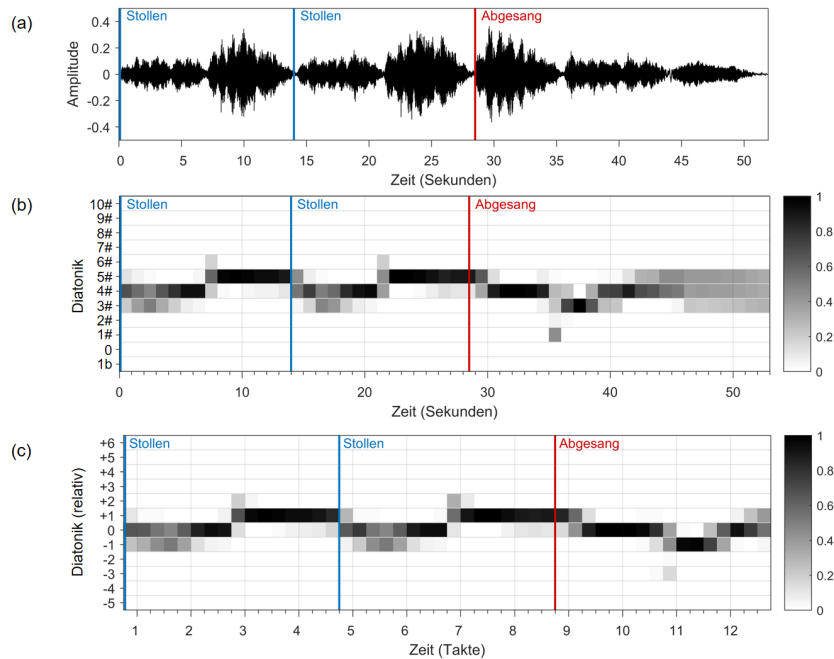


Abb. 4: Fortsetzung des Beispiels aus Abbildung 2. (a) Wellenformdarstellung einer Aufnahme unter Stephen Cleobury (Brilliant Classics 1996), mit manuell markierten Formteilen. (b) Visualisierung einer automatisch berechneten Zeit–Diatonik-Darstellung unter Verwendung einer Fensterbreite von vier Sekunden. (c) Analyseergebnis nach Konvertierung der physikalischen Zeitachse (in Sekunden) in eine musikalische Zeitachse (in Takten) und einer Ausrichtung und Bezeichnung der vertikalen Achse relativ zur Grundtonart.

Beitrag mittels einer exponentiellen Umskalierung der Energiewerte realisiert (ähnlich der *Softmax*-Funktion).

Die von einer Musikaufnahme abgeleitete Zeit–Diatonik-Darstellung (wie die Wellenform selbst) ist zunächst in physikalische Zeiteinheiten (Sekunden) gegliedert. Für manche Analyse Zwecke wie zum Beispiel die Bewertung von formalen Verhältnissen langer Werke kann dies eine sinnvolle Maßeinheit sein. Zum Vergleich mit Partiturdarstellungen bietet sich jedoch die Einbeziehung musikalischer Zeitinformationen an. Diese können sich auf die Form beziehen wie in Abbildung 2a oder auf die metrische Unterteilung in Takte und Schläge. Sind solche Informationen vorhanden<sup>5</sup>, so können die zeitlichen Bestandteile der Zeit–Diatonik-Darstellung zwischen musikalischen Zeitpunkten zusammengefasst werden und man erhält beispielsweise eine Darstellung mit Viertelnoten-Auflösung wie in Abbildung 4c. Beim Vergleich der beiden Darstellungen (b) und (c) ist die starke zeitliche Ausdehnung

<sup>5</sup> Diese können entweder manuell erzeugt werden oder (mit Einschränkungen) auch unter Einbeziehung von Algorithmen, siehe hierzu [GMS10; PP11].

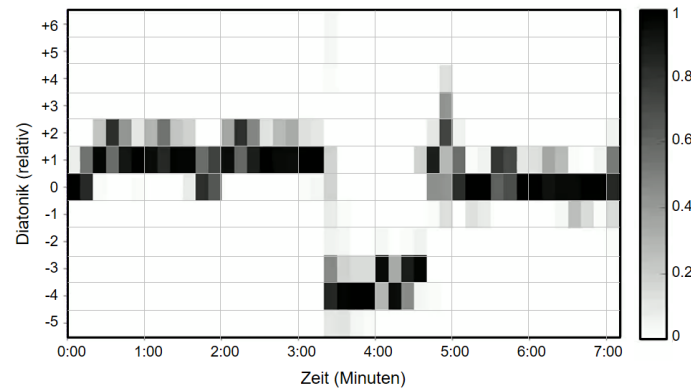


Abb. 5: Zeit–Diatonik-Darstellung von Beethovens Sonate Op. 14 No. 2, 1. Satz in einer Einspielung von Daniel Barenboim (EMI Classics 1998). Die relative 0-Diatonik entspricht der Grundtonart G-Dur.

des Schlussakkords in (b), der sich über mehrere Sekunden hinzieht, besonders deutlich sichtbar.

Zum Abschluss unserer Beschreibung stellen wir noch eine Variante der Zeit–Diatonik-Darstellung vor, die beim Vergleich verschiedener Werke hilfreich sein kann. Die Idee besteht darin, den Tonalitätsverlauf relativ zur Grundtonart zu betrachten und nach der Diatonik der Grundtonart auszurichten (relative Quintenmessung, siehe [GN02]). Dazu wird die Zeit–Diatonik-Darstellung zunächst durch zyklische Verschiebung in vertikaler Richtung auf die jeweilige Grundtonart zentriert. Die Grundtonart – im Fall des Bach-Chorals ist das die 4 $\sharp$ -Diatonik – wird dann als neue 0-Ebene definiert. Der Tonvorrat der Oberquinttonart ergibt sich entsprechend als +1-Ebene, die Unterquinttonart als –1-Ebene. Dieses Prinzip wird auf weiter entfernte Tonarten entlang des Quintenzirkels ausgeweitet. Die vertikale Achse wird entsprechend dieser Ebenenbezeichnungen neu beschriftet (siehe Abbildung 4c).

### 3 Beispiel: Beethovens Klaviersonate Op. 14 Nr. 2

Die automatisiert berechneten Visualisierungen von Zeit–Diatonik-Darstellungen besitzen ein besonders Potential zur Analyse längerer Werke, was wir nun anhand einer Aufnahme eines Sonatensatzes von etwa sieben Minuten Spieldauer andeuten. Hierzu berechnen wir eine Visualisierung für den Kopfsatz aus Ludwig van Beethovens Sonate Op. 14 Nr. 2 (G-Dur) basierend auf einer Einspielung von Daniel Barenboim (EMI Classics 1998). Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Visualisierung, die sich in diesem Fall auf die physikalische Zeitachse der Aufnahme gemessen in Minuten und Sekunden bezieht. Um den groben harmonischen Verlauf zu verdeutlichen, ist die Fensterbreite mit etwa 20 Sekunden (und einer Auflösung von 10 Sekunden) deutlich größer gewählt als beim Bach-Choral.

In Abbildung 5 lassen sich formale Entwicklungen auf unterschiedlichen Granularitätsstufen beobachten. Zunächst fällt eine charakteristische Grobstruktur ins Auge, welche sich auf das gängige Modell der Sonatenhauptsatzform (Exposition, Durchführung, Reprise) bezieht. Die Exposition bewegt sich von der Grundtonart G-Dur (hier die relative 0-Diatonik) in die Oberquinttonart (D-Dur, +1) und wird ab Minute 1:40 wiederholt. Die Durchführung zeigt einen deutlichen Bruch und bewegt sich – als tonales Gegengewicht zur Exposition – in den relativen Minusbereich. Eine detaillierte Analyse des Notentextes zeigt, dass zunächst das erste Thema in der Varianttonart g-Moll (–3) begonnen wird, welches dann aber abbricht und sich zum zweiten Thema in B-Dur (ebenfalls –3) entwickelt. Über mehrere Modulationsvorgänge wird schließlich eine Scheinreprise in Es-Dur (–4-Diatonik) erreicht. Das Thema führt zurück nach g-Moll, worauf der Moll-Dur-Umschlag zurück in die Grundtonart (G-Dur) über den gemeinsamen Dominantseptakkord *d-fis-a-c* als „Scharnierakkord“ führt. Dieser Umschlag ist in der Visualisierung um Minute 4:50 deutlich zu erkennen. Die Reprise (ab 5:10) hält sich dann weitgehend in der Grundtonart auf, bestätigt damit also das typische Sonatensatz-Formmodell.

Neben dieser Grobstruktur ist jedoch auch die harmonisch–formale Gestaltung innerhalb der Exposition von Interesse, welche eine zentrale Fragestellung der gemeinsamen Arbeit [K121] ist. Anhand von Beethovens frühen Klaviersonaten wird hier das traditionelle Modell einer Sonatenexposition hinterfragt und der Sonatentheorie Francesco Galeazzis [K116] gegenübergestellt. Zur Unterstützung der Hypothesen werden hierbei die computergestützten Visualisierungen unterschiedlicher Granularität (durch Modifikation der Fensterbreite) herangezogen. Als eine wesentliche Erkenntnis aus dieser Arbeit wird gezeigt, dass die zeitliche Balance innerhalb der Exposition dem postulierten Themendualismus des traditionellen Sonatenmodells häufig entgegensteht. Wie in Abbildung 5 gut erkennbar ist, bewegt sich die Exposition nach dem ersten Thema zeitnah (ab Minute 0:20) von der Grundtonart weg und erreicht innerhalb kürzester Zeit das zweite Thema in der +1-Ebene, welche fortan die Exposition in harmonischer Hinsicht dominiert und in diskursiver Art weitere thematische Gedanken (welche bei Galeazzi mit Begriffen wie „passo caratteristico“, „passo di mezzo“ oder „Codetta“ bezeichnet werden) hervorbringt.

Das Beispiel der Sonate Op. 14 Nr. 2 zeigt, wie computergestützte Verfahren zur harmonischen Analyse angewendet, getestet und in Bezug zu aktuellen Forschungsfragen (z. B. hinsichtlich des Auftretens verschiedener Sonatensatz-Formmodelle) gesetzt werden. Durch das Wechselspiel zwischen Informatik und Musikwissenschaft können hierdurch einerseits bestehende Hypothesen unterstützt oder hinterfragt und andererseits aus visuellen Beobachtungen neue Hypothesen abgeleitet werden.

## 4 Resümee

In diesem Beitrag haben wir am Beispiel von automatisiert berechneten Visualisierungen harmonischer Strukturen aufgezeigt, inwieweit Methoden der digitalen Signalverarbeitung und Mustererkennung gewinnbringend im Bereich der Musikwissenschaft eingesetzt werden



können. An dieser Stelle wollen wir betonen, dass derartige computergestützte Konzepte in keiner Weise eine musikwissenschaftlich fundierte Analyse ersetzen können und sollen. Vielmehr sind sie als ein effizientes Werkzeug zur Exploration größerer Werkzyklen zu verstehen, mittels dessen großformatige harmonische Bezüge aufgedeckt werden können, die es dann durch eine verfeinerte manuelle Analyse zu verifizieren und zu vertiefen gilt. Eine schon in Teilen automatisierte Auswertung größerer Musikkorpora könnte zu einem Paradigmenwechsel innerhalb der historischen Musikwissenschaft führen: Bisherige Methoden würden nicht überflüssig, könnten aber auf Grund des ‚objektiv‘ vorgegebenen Befundes – der als solcher kritisch zu überprüfen wäre – mit neuen Fragestellungen konfrontiert werden. Ziel soll dabei nicht die Ablösung der historischen Musikwissenschaft durch eine wie auch immer zu definierende „Musik informatik“ sein, sondern vielmehr ein Dialog zwischen beiden Disziplinen auf der Basis ihrer unterschiedlichen Voraussetzungen und Methoden.

## Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung (MU 2686/7-2, KL 864/4-2). Die International Audio Laboratories Erlangen sind eine gemeinsame Einrichtung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und des Fraunhofer Instituts für Integrierte Schaltungen IIS.

## Literatur

- [Be19] Benetos, E.; Dixon, S.; Duan, Z.; Ewert, S.: Automatic Music Transcription: An Overview. *IEEE Signal Processing Magazine* 36/1, S. 20–30, 2019.
- [CB14] Cho, T.; Bello, J. P.: On the Relative Importance of Individual Components of Chord Recognition Systems. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 22/2, S. 477–492, 2014.
- [Ed21] Edirisooriya, S.; Dong, H.; McAuley, J. J.; Berg-Kirkpatrick, T.: An Empirical Evaluation of End-to-End Polyphonic Optical Music Recognition. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. S. 167–173, 2021.
- [GMS10] Grosche, P.; Müller, M.; Sapp, C. S.: What makes beat tracking difficult? A case study on Chopin Mazurkas. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Utrecht, The Netherlands, S. 649–654, 2010.
- [GN02] Gárdonyi, Z.; Nordhoff, H.: *Harmonik*. Mösel, Wolfenbüttel, 2002, ISBN: 9783787730353.

- [K116] Kleinertz, R.: Streichquartette von Joseph Haydn und Wolfgang Amadeus Mozart im Spiegel der Sonatentheorie Francesco Galeazzis. In (Speck, C., Hrsg.): *The String Quartet: From the Private to the Public Sphere*. Brepols, Turnhout, S. 297–316, 2016.
- [K121] Klauk, S.; Kleinertz, R.; Weiß, C.; Müller, M.: ‚Seitensatz‘ versus ‚Mittelsatz‘: Expositionen in Beethovens frühen Klaviersonaten zwischen zeitgenössischer Theorie und computergestützter Analyse. In (Hohmaier, S., Hrsg.): *Jahrbuch des Staatlichen Instituts für Musikforschung – Preußischer Kulturbesitz 2017*. Schott Music, Mainz, S. 271–300, 2021.
- [KMK13] Konz, V.; Müller, M.; Kleinertz, R.: A Cross-Version Chord Labelling Approach for Exploring Harmonic Structures—A Case Study on Beethoven’s *Appassionata*. *Journal of New Music Research* 42/1, S. 61–77, 2013.
- [Mü21] Müller, M.: *Fundamentals of Music Processing – Using Python and Jupyter Notebooks*. Springer Verlag, 2021, ISBN: 978-3-030-69807-2.
- [NS06] Noland, K.; Sandler, M. B.: Key Estimation Using a Hidden Markov Model. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Victoria, Canada, S. 121–126, 2006.
- [Pa19] Pauwels, J.; O’Hanlon, K.; Gómez, E.; Sandler, M. B.: 20 Years of Automatic Chord Recognition from Audio. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Delft, The Netherlands, S. 54–63, 2019.
- [PP11] Papadopoulos, H.; Peeters, G.: Joint Estimation of Chords and Downbeats From an Audio Signal. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 19/1, S. 138–152, 2011.
- [We17] Weiß, C.; Zalkow, F.; Müller, M.; Klauk, S.; Kleinertz, R.: Versionsübergreifende Visualisierung harmonischer Verläufe: Eine Fallstudie zu Wagners Ring-Zyklus. In: *Proceedings of the Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik (GI)*. Chemnitz, Germany, S. 205–217, 2017.
- [WH14] Weiß, C.; Habryka, J.: Chroma-Based Scale Matching for Audio Tonality Analysis. In: *Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM)*. Berlin, Germany, S. 168–173, 2014.
- [WM21] Weiß, C.; Müller, M.: Computergestützte Visualisierung von Tonalitätsverläufen in Musikaufnahmen. Möglichkeiten für die Korpusanalyse. In (Klauk, S., Hrsg.): *Instrumentalmusik neben Haydn und Mozart. Analyse, Aufführungspraxis und Edition*. Königshausen & Neumann, S. 107–130, 2021.
- [WSM20] Weiß, C.; Schreiber, H.; Müller, M.: Local Key Estimation in Music Recordings: A Case Study Across Songs, Versions, and Annotators. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 28/, S. 2919–2932, 2020.