

Automatisierte Methoden zur Unterstützung der Interpretationsforschung

Ein musikalisches Werk wird häufig auf sehr unterschiedliche Weise interpretiert und vorgetragen. Der Künstler verleiht dem Werk durch seine Interpretation eine persönliche Note, ohne die Identität des Musikstücks anzutasten. So variieren verschiedene Einspielungen eines Musikstücks oft erheblich hinsichtlich musikalischer Aspekte wie Tempo, Phrasierung, Artikulation, Agogik und Lautstärke. Hinzu kommen Unterschiede in der Klangfarbe, der Instrumentierung oder der Raumakustik. Aufgaben der automatisierten Musikverarbeitung bestehen nun darin, zum einen solche musikalischen Parameter zu erfassen und zum anderen auf Basis dieser Parameter die eigentliche Interpretationsanalyse durchzuführen, bei der dann die Unterschiede oder Gemeinsamkeiten verschiedener Interpretationen zu erklären sind.

In diesem Beitrag werden aktuelle Entwicklungen der automatisierten Musikverarbeitung aus Sicht der Informatik diskutiert. Insbesondere soll aufgezeigt werden, welche Werkzeuge die Informatik den Musikwissenschaften für die Interpretationsforschung zur Verfügung stellen kann und wo automatisierte Methoden an ihre Grenzen stoßen. Die automatisierte Interpretationsanalyse stellt ein aktives Forschungsgebiet dar.¹ Hierbei kann man grob zwischen zwei komplementären Fragestellungen unterscheiden. Zum einen sollen Gemeinsamkeiten zwischen unterschiedlichen Interpretationen gefunden und hieraus allgemeine Interpretationsregeln abgeleitet werden. Zum anderen geht es um die Erfassung von Stilparametern, die die Spielweise eines bestimmten Musikers beschreiben. Wie unterscheidet sich also zum Beispiel das Spiel eines Horowitz von dem anderer Pianisten?²

Vor der eigentlichen Interpretationsanalyse müssen zunächst geeignete Informationen darüber zur Verfügung gestellt werden, wann und wie die Noten eines

¹ Siehe unter anderem: Jörg Langner und Werner Goebel, ›Visualizing expressive performance in tempo-loudness space‹, in: *Computer Music Journal* 27/4 (2003), S. 69–83; Craig Stuart Sapp, ›Comparative analysis of multiple musical performances‹, in: *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Wien 2007, S. 497–500; Ders., ›Hybrid numeric/rank similarity metrics‹, in: *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Philadelphia 2008, S. 501–506; Gerhard Widmer, ›Machine discoveries: A few simple, robust local expression principles‹, in: *Journal of New Music Research* 31/1 (2003), S. 37–50.

² Gerhard Widmer, Simon Dixon, Werner Goebel, Elias Pampalk und Asmir Tobudic, ›In search of the Horowitz factor‹, in: *AI Magazine* 24/3 (2003), S. 111–130.

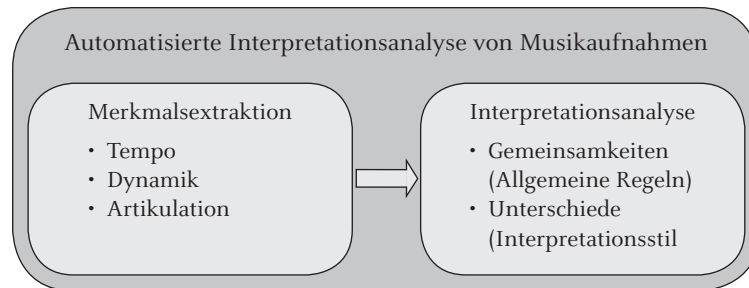


Abbildung 1: Aufgaben der automatisierten Musikverarbeitung

Musikstücks in einer vorliegenden Einspielung gespielt werden (siehe Abbildung 1). In diesem ersten Schritt, der auch als Merkmalsextraktion bezeichnet wird, sind also musikalische Parameter wie Noteneinsatzzeiten und Lautstärken zu bestimmen, aus denen sich dann Tempo- und Dynamikverlauf ableiten lassen. Hierbei erfolgt die Messung solcher Parameter häufig semi-automatisch oder gar manuell, da automatisierte Verfahren oft die benötigte Exaktheit vermissen lassen. Allerdings ist die manuelle Merkmalsextraktion extrem aufwändig und verbietet sich bei großen Musikdatenbeständen.

In den folgenden Abschnitten gehen wir auf ein automatisiertes Verfahren ein, bei dem Musikaufnahmen mit digital vorliegenden Notendaten abgeglichen beziehungsweise synchronisiert werden. Aus den Synchronisationsresultaten lassen sich dann musikalisch sinnvolle Tempokurven ableiten. Anhand von konkreten Musikbeispielen diskutieren wir, was man von solchen automatisiert berechneten Kurven erwarten darf und welche Schwierigkeiten sich ergeben können. Als einen weiteren Beitrag stellen wir auf Synchronisationstechniken basierende Benutzerschnittstellen vor, die dem Musikwissenschaftler neuartige Navigations- und Analysemöglichkeiten für die Interpretationsforschung eröffnen.

1. Musiksynchronisation

Grundlegend zur Berechnung von Tempokurven ist die Kenntnis der Zeitpunkte, an denen die Noten des Musikstücks gespielt werden. Die Lokalisierung solcher Zeitpunkte stellt allerdings für polyphone Musikaufnahmen mit zahlreichen sich überlagernden Instrumenten eine große Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass bei vielen Instrumenten, vor allem bei Streichern, der Ton so diskret angespielt werden kann, dass der genaue Einsatzpunkt nur schwer feststellbar ist. Im Folgenden beschränken wir uns daher auf Klaviermusik, die im Vergleich etwa zu Orchestermusik leichter handhabbar ist. Das Spielen eines Klaviertons geht typischerweise mit einem plötzlichen Energieanstieg einher, der sich relativ exakt lokalisieren lässt. Damit sind beim Klavier die Anfangszeiten der gespielten Noten vergleichsweise gut messbar.

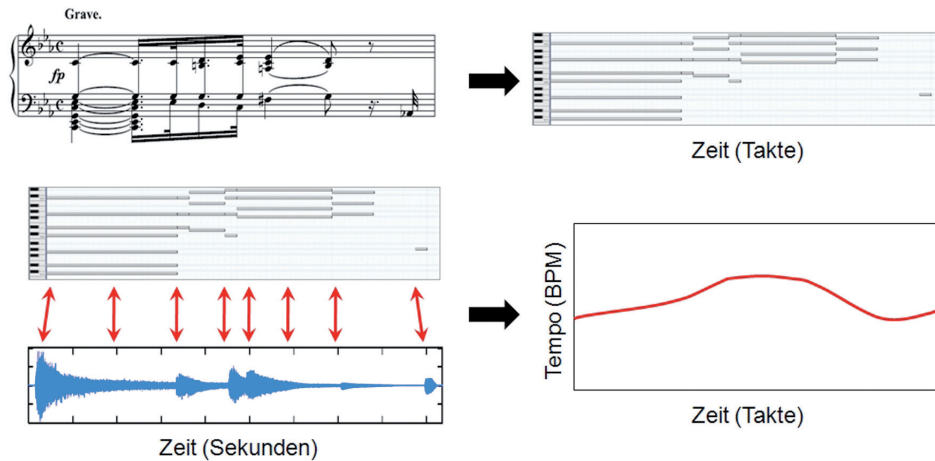


Abbildung 2: Automatisierte Berechnung einer Tempokurve mittels Synchronisationstechniken, illustriert anhand der ersten Takte der Klaviersonate op. 13 (*Pathétique*) von Ludwig van Beethoven. Aus einer Partitur wird eine uninterpretierte MIDI-Darstellung (Klavierwalzendarstellung) abgeleitet. Diese wird automatisch mit der vorliegenden Musikaufnahme (Wellenform) verlinkt. Aus der Verlinkungsstruktur lässt sich dann eine Tempokurve ableiten.

Die Noteneinsatzzeiten können auf verschiedene Weise bestimmt werden. Viele Musikwissenschaftler annotieren die vorliegenden Musikaufnahmen hinsichtlich der vorkommenden Noteneinsatzzeiten in einem manuellen Prozess. Hierbei können neuartige Benutzerschnittstellen wie der Sonic Visualiser³ die genaue Positionsbestimmung wesentlich erleichtern. Bei einer semi-automatisch durchgeführten Annotation kommen automatisierte Verfahren der Onset-Erkennung und des Beat-Tracking zum Einsatz, um zunächst mögliche Kandidaten für Onset- und Beat-Positionen zu bestimmen.⁴ Aus diesen Positionen werden dann durch manuelle Auswahl und Korrektur die präzisen Noteneinsatzzeiten bestimmt. Eine weitere Möglichkeit der Gewinnung von akkurat annotierten Musikaufnahmen stellt der Einsatz von sogenannten Hybridklavieren dar. Ausgestattet mit optischen Sensoren lassen sich mit Hilfe dieser Klaviere neben der akustischen Einspielung auch die Tastenbewegungen und damit auch die Noteneinsatzzeiten aufzeichnen.

Im Hinblick auf eine systematische und umfassende Interpretationsanalyse aufgrund umfangreicher Musikdatenbestände ist eine vollautomatische Bestimmung von Noteneinsatzzeiten von großer Bedeutung. Genau an diesem Punkt setzt die Aufgabenstellung der Musiksynchronisation an, bei der es grob gesprochen um die automatische Verlinkung zweier Darstellungsformen eines Musikstücks geht.⁵ Mit

³ <http://www.sonicvisualiser.org>.

⁴ Juan Pablo Bello, Laurent Daudet, Samer Abdallah, Chris Duxbury, Mike Davies und Mark B. Sandler, ›A tutorial on onset detection in music signals‹, in: *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 13/5 (2005), S. 1035–1047.

⁵ Meinard Müller, *Information Retrieval for Music and Motion*, Berlin u. a. 2007.

hilfe solcher Verfahren ist es möglich, zu einer bestimmten Stelle beispielsweise in einem Notentext in MIDI- oder Klavierwalzendarstellung die entsprechende Stelle in einer Musikaufnahme zu identifizieren.

Im Fall klassischer Klaviermusik lässt sich nun gewinnbringend davon ausgehen, dass unterschiedliche Einspielungen ein und desselben Stücks sich zwar erheblich in Tempo und Dynamik voneinander unterscheiden können, vom schriftlich fixierten Notentext jedoch kaum abweichen. Vor der eigentlichen Synchronisation wird zunächst der Notentext digitalisiert und in eine neutrale, uninterpretierte MIDI-Darstellung konvertiert. In einer solchen Darstellung werden die Noten quasi mechanisch mit konstantem Tempo gespielt, so dass sich Noteneinsatzzeiten sowie Beat- und Taktpositionen direkt aus den Zeitpositionen ableiten lassen. Abbildung 2 zeigt eine solche MIDI-Darstellung in Form einer Klavierwalzendarstellung, bei der die Noteneignisse den Rechtecken entsprechen.

Diese neutrale MIDI-Darstellung, die im Folgenden als Referenz dient, kann nun mit einer vorliegenden Einspielung desselben Stückes synchronisiert werden. Dabei gehen die meisten Verfahren in zwei Schritten vor.⁶ Im ersten Schritt werden die zu verlinkenden Datenströme in geeignete Merkmalsdarstellungen umgewandelt, um hierdurch zum einen eine Datenreduktion und zum anderen Robustheit gegenüber nicht zu berücksichtigenden Variabilitäten zu erzielen. Im Musikkontext werden insbesondere Chromamerkmale mit großem Erfolg für unterschiedliche Retrieval- und Analyseaufgaben eingesetzt.⁷ Grob gesagt spiegeln diese Merkmale wider, mit welcher Intensität die 12 Tonhöhenklassen *C*, *C♯*, *D* usw. bis *H* der gleichmäßig temperierten Stimmung im musikalischen Signal vorkommen. Insbesondere werden hierbei Tonhöhen, die sich um eine oder mehrere Oktaven unterscheiden, zu einem Chroma zusammengefasst. Chromamerkmale korrelieren stark mit dem Harmonieverlauf des analysierten Musikstücks und weisen einen hohen Grad an Robustheit gegenüber Änderungen in Instrumentierung, Dynamik und Klangfarbe auf. Insbesondere eignen sich chromabasierte Merkmale als gemeinsame Mid-Level-Darstellung für sowohl symbolische als auch akustische Musikdarstellungen und erlauben damit eine Verlinkung von MIDI-Darstellungen und Musikaufnahmen. Im zweiten Schritt werden dann die beiden extrahierten Merkmalsfolgen mittels Alignment-Verfahren wie Dynamic Time Warping (DTW) oder Hidden Markov Modelle (HMM) – beides Techniken, die im Bereich der Sprachsignalverarbeitung entwickelt wurden⁸ – synchronisiert.

Aus der Verlinkung der uninterpretierten MIDI-Darstellung mit der Musikaufnahme kann schließlich der Tempoverlauf der Einspielung abgeleitet werden (siehe Abbildung 2). Hierbei beschreibt die Tempokurve für jede musikalische Position

⁶ Ebenda.

⁷ Ebenda; Mark A. Bartsch und Gregory H. Wakefield, ›Audio thumbnailing of popular music using chroma-based representations‹, in: *IEEE Transactions on Multimedia* 7/1 (2005), S. 96 bis 104.

⁸ Lawrence Rabiner und Bing-Hwang Juang, ›Fundamentals of Speech Recognition‹, in: *Prentice Hall Signal Processing Series* (1993).

(gemessen in Beats oder Takten) das Tempo der Einspielung zunächst in Form eines multiplikativen Faktors. Da das konstante Tempo der neutralen MIDI-Darstellung bekannt ist, kann aus diesem Faktor eine wie beim Metronom übliche Tempoangabe in BPM (beats per minute) abgeleitet werden.⁹ An dieser Stelle sei bemerkt, dass man für dieses Verfahren zeitlich hochauflösende und zugleich robuste Synchronisationsverfahren benötigt – ein für sich schwieriges Forschungsproblem.¹⁰ In der folgenden Fallstudie werden wir auf die Qualität der resultierenden Kurven anhand konkreter Beispiele eingehen und diskutieren hierbei auch die sich aus Synchronisationsfehlern ergebenden Konsequenzen.

2. Fallstudie: Beethovens *Appassionata*

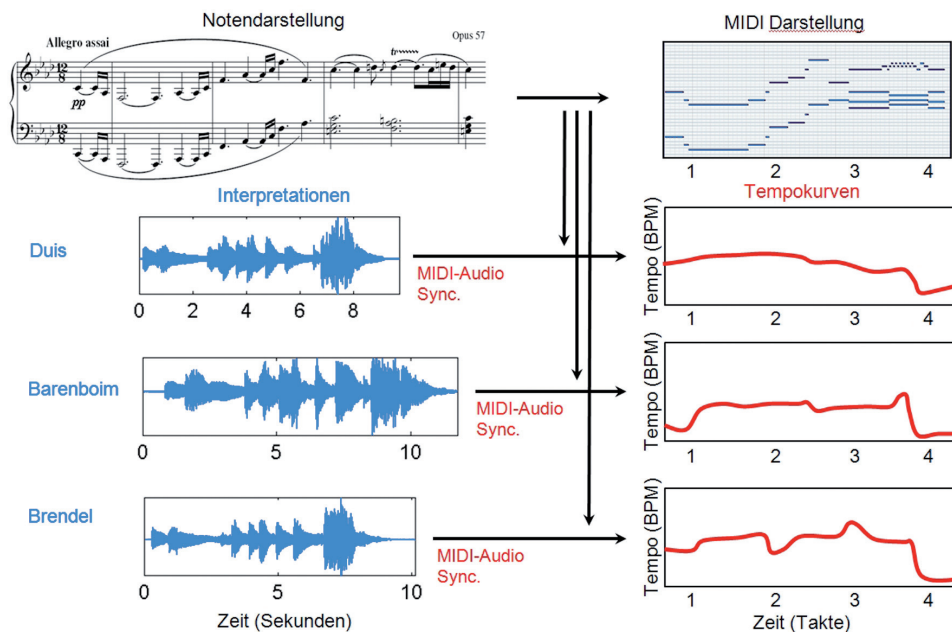


Abbildung 3: Verfahren zur Berechnung von Tempokurven für drei unterschiedliche Einspielungen von Beethovens Klaviersonate op. 57 (*Appassionata*), 1. Satz, T. 1–3

⁹ Für weitere technische Details verweisen wir auf: Meinard Müller, Verena Konz, Andi Scharfstein, Sebastian Ewert und Michael Clausen, ›Towards automated extraction of tempo parameters from expressive music recordings‹, in: *Proceedings of the 10th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, Kobe 2009, S. 69–74.

¹⁰ Sebastian Ewert, Meinard Müller und Peter Grosche, ›High resolution audio synchronization using chroma onset features‹, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Taipei 2009, S. 1869–1872.

Wir illustrieren das vorgestellte Verfahren anhand des ersten Satzes der Klaviersonate f-Moll op. 57 (*Appassionata*) von Ludwig van Beethoven (siehe Abbildung 3). Zunächst wird der Notentext in eine neutrale MIDI-Darstellung (Klavierwalzendarstellung) konvertiert, die dann als Referenz dient. Uns liegen drei unterschiedliche Einspielungen (gegeben als Audiodatei) der Pianisten Thomas Duis, Daniel Barenboim und Alfred Brendel vor. Die drei Audioaufnahmen werden mittels Synchronisationstechniken mit der MIDI-Referenz verlinkt, woraus sich die jeweiligen Tempokurven ableiten lassen. Die Tempokurven machen die globalen und lokalen Unterschiede in den verschiedenen Einspielungen deutlich. Zum Beispiel wird offensichtlich, dass Barenboim die ersten Takte viel langsamer als die beiden anderen Pianisten spielt. Weiterhin zeigen die Kurven, dass alle Pianisten das Tempo zu Beginn des vierten Taktes deutlich verlangsamen.

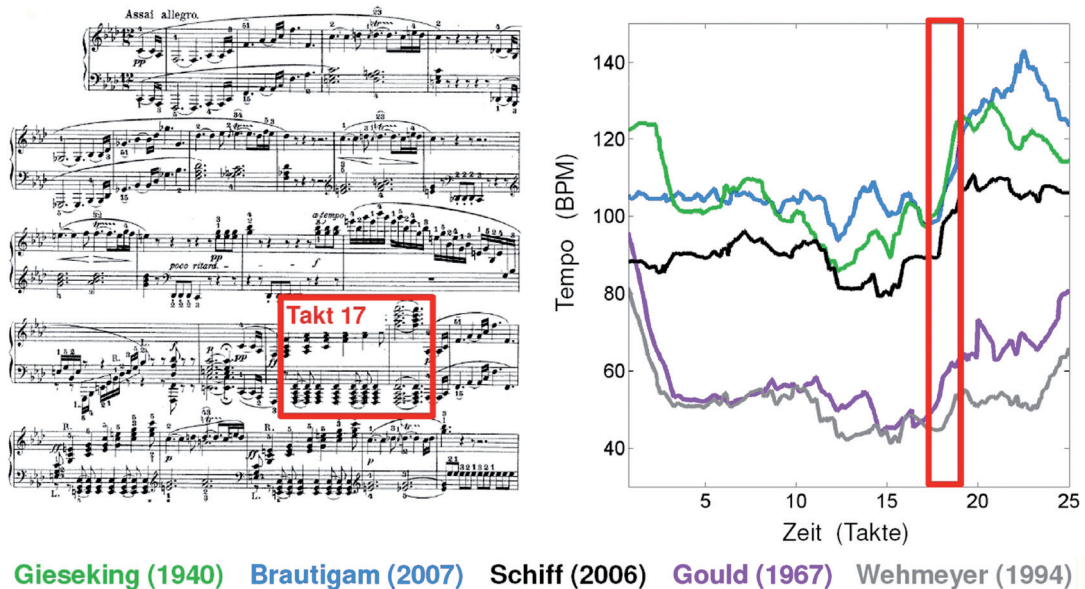


Abbildung 4: Automatisiert berechnete Tempokurven für fünf unterschiedliche Einspielungen von Beethovens Klaviersonate op. 57 (*Appassionata*), 1. Satz, T. 1–24

Als weiteres Beispiel zeigt Abbildung 4 den Beginn der Tempokurven (T. 1–24) von fünf Einspielungen der *Appassionata*. Die Interpreten wählten ganz unterschiedliche Tempi. Während Walter Giesecking den ersten Satz in einem mittleren Tempo von ungefähr 100 BPM vorträgt, spielt ihn Glenn Gould viel langsamer, nämlich mit 60 BPM. Aber auch innerhalb des Grundtempos verändern die Pianisten das Tempo. Zum Beispiel beschleunigen sie alle in T. 17. Diese agogische Freiheit ist musikalisch in der aufsteigenden Akkordlinie begründet, die in den Ruhepunkt in T. 18 mündet und den f-Moll-Charakter des Hauptthemas verdichtet.

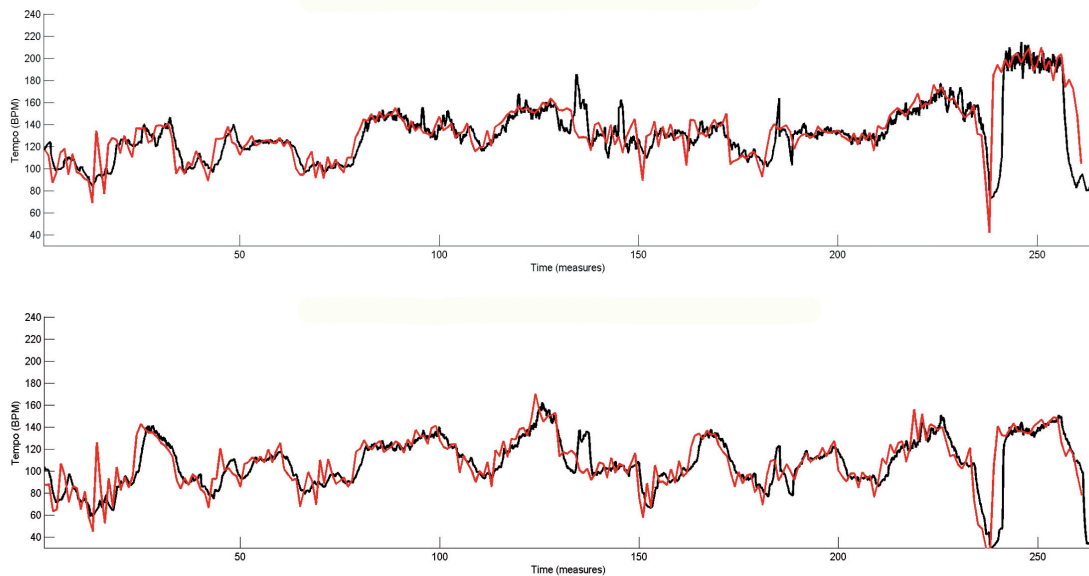


Abbildung 5: Tempokurven für die Einspielungen von Walter Gieseking (oben) und von Lilya Zilberstein (unten) von Beethovens Klaviersonate op. 57 (*Appassionata*), 1. Satz.

Bei den roten Kurven handelt es sich um automatisch berechnete Tempokurven, während die schwarzen Kurven auf manuell durchgeführten Messungen basieren.

Automatisiert berechnete Tempokurven spiegeln, wie oben illustriert, gut den groben Tempoverlauf der jeweiligen Einspielung wider. Wo stoßen solche automatisierten Methoden jedoch an ihre Grenzen? Abbildung 5 zeigt Tempokurven für den ersten Satz der *Appassionata* in zwei verschiedenen Einspielungen (Walter Gieseking und Lilya Zilberstein). Hierbei ist jeweils eine automatisch berechnete Tempokurve (rot) und eine auf manuellen Messungen¹¹ basierende Tempokurve (schwarz) visualisiert. Vergleicht man zunächst die Tempokurven der beiden Einspielungen miteinander, stellt man fest, dass der grobe Verlauf sehr ähnlich ist. Beide Pianisten scheinen also eine gemeinsame Grundtendenz in der Tempogestaltung zu haben. Unterschiede treten dagegen in der agogischen Ausgestaltung auf, die im Detail erkennbar divergiert. Solche feinen Temponuancen mit automatisierten Methoden zu erfassen, ist sehr schwierig. Dies wird deutlich, wenn man die automatisch berechneten Tempokurven mit den auf manuellen Messungen basierenden Kurven vergleicht. Der globale Tempoverlauf wird durch die automatisch berechnete Tempokurve gut wiedergegeben, während lokale Temponuancen nicht genau erfasst werden (vgl. die schwarzen mit den roten Kurven).

¹¹ Die manuellen Messungen wurden von Heinz von Loesch und Fabian Brinkmann zur Verfügung gestellt.

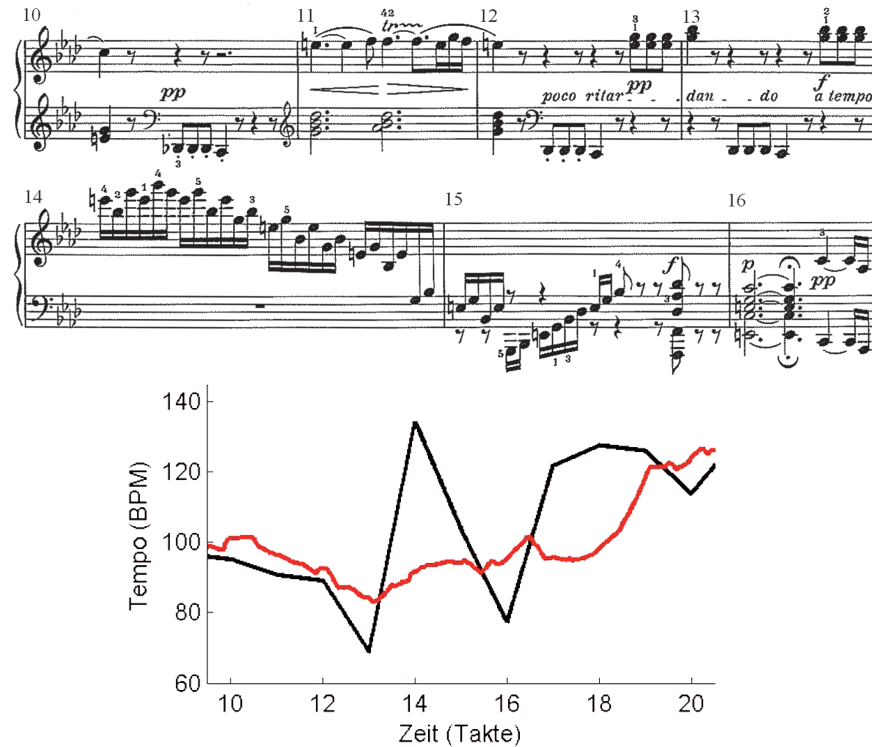


Abbildung 6: Ausschnitt aus der Tempokurve der Einspielung mit Walter Gieseking (T. 10–20). Bei der roten Kurve handelt es sich um eine automatisiert berechnete Tempokurve, während die schwarze Kurve auf einer manuell durchgeführten Messung basiert.

Wir illustrieren und diskutieren nun beispielhaft anhand zweier Ausschnitte aus der Einspielung mit Walter Gieseking, in welchen Situationen automatisierte Methoden zur Tempoberechnung an ihre Grenzen stoßen können. Abbildung 6 zeigt die auf automatisierten und auf manuellen Verfahren basierenden Tempokurven der Takte 10–20. Die auf manuellen Messungen basierende Kurve weist große Temposchwankungen auf, die sich musikalisch wie folgt begründen lassen. Die Verlangsamung von ca. 90 auf 70 BPM in T. 12–13 bezieht sich auf das auslaufende Klopffmotiv, das im Notentext mit *poco ritardando* bezeichnet ist. Darauf folgend ist in T. 13–14 ein rasanter Anstieg des Tempos von ca. 70 auf 135 BPM zu verzeichnen, gefolgt von einem Tempoabfall in T. 14–16 von ca. 135 auf 75 BPM. Musikalisch mündet das Klopffmotiv in T. 13 (überschrieben mit *a tempo*) in eine rasant ausgeführte Sechzehntel-Figur, die in T. 15 ausläuft und in T. 16 in einen Halbschluss mit Fermate mündet. Es schließt sich eine Variante des Hauptthemas an, was mit einem Tempoanstieg in T. 16–17 von ca. 75 auf 120 BPM einhergeht. Während all diese plötz-

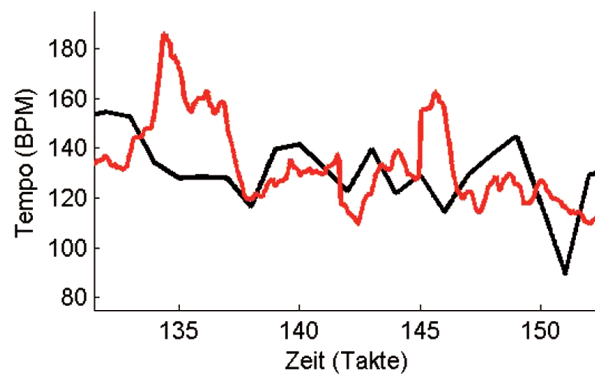


Abbildung 7: Ausschnitte der Tempokurven aus der Einspielung mit Walter Gieseking (T. 132–152). Bei der roten Kurve handelt es sich um eine automatisch berechnete Tempokurve, während die schwarze Kurve auf manuell durchgeführten Messungen basiert.

lichen Temposchwankungen direkt aus der schwarzen Kurve abzulesen sind, wählt die rote Kurve im Bereich von T. 13–17 einen Weg, der sich aus einer Mittelung der Temposchwankungen ergibt. Dies ist ein grundsätzliches Problem bei automatisierten Verfahren der Tempobestimmung. Das Tempo wird hier innerhalb eines festen Zeitbereiches berechnet, indem in gewisser Weise ein Mittelwert in diesem Bereich bestimmt wird. Würde man den Zeitbereich kleiner wählen, so würden zwar solche plötzlichen Temposchwankungen von der Tempokurve besser erfasst. Im Gegenzug würde das Verfahren allerdings an Robustheit verlieren, was zu ungewollten Ausschlägen in der Tempokurve führen kann.

Wie bereits erläutert, werden bei der automatisierten Tempoberechnung Synchronisationstechniken verwendet. Die Entwicklung robuster Synchronisationsverfahren stellt ein eigenes schwieriges Forschungsproblem dar.¹² So muss im zugrun-

¹² Ewert, Müller und Grosche, ›High resolution audio synchronization (wie Anm. 10), S. 1869 bis 1872.

deliegenden Synchronisationsverfahren mit vereinzelt auftretenden Fehlern oder Ungenauigkeiten gerechnet werden, die sich dann in Fehlern in der Tempoberechnung niederschlagen. Solche Ungenauigkeiten in der Synchronisation treten häufig dann auf, wenn die betreffende musikalische Passage sehr gleichförmig oder repetitiv gestaltet ist, sich also eine Harmonie über einen längeren Zeitraum erstreckt oder Tonrepetitionen vorliegen. In solchen Fällen kann die automatische Verlinkung zwischen der MIDI-Darstellung und der Musikaufnahme fehlschlagen, da aufgrund der Gleichförmigkeit des musikalischen Materials eine genaue Zuordnung der Noten zu den entsprechenden musikalischen Positionen in der Musikaufnahme schwierig ist.

Abbildung 7 illustriert einen solchen Fall, in dem Fehler in der zugrundeliegenden Synchronisation zu falschen Werten in der Tempokurve führen. Die automatisiert berechnete rote Tempokurve verläuft hier abwechselnd oberhalb und unterhalb der auf manuellen Messungen basierenden schwarzen Tempokurve – ein typischer Verlauf, der auf ein Fehlschlagen der zugrundeliegenden Synchronisation hindeutet. Untersucht man die entsprechende Stelle im Notentext, so fällt auf, dass hier die eben beschriebene Gleichförmigkeit des musikalischen Materials gegeben ist. Das in T. 130–131 durch das Klopfmotiv in der linken Hand zu einem Septakkord auf C ergänzte Tremolo in der rechten Hand reduziert sich in T. 132 und 133 zu einer oszillierenden Tonrepetition auf C, bevor über dieser die Reprise mit dem Hauptthema in Oktaven einsetzt. Auch die folgenden Takte dieser Passage sind durch Tonwiederholungen im Bass gekennzeichnet, über denen sich gleichbleibende Harmonien über mehrere Takte erstrecken. Hierdurch erklären sich in diesem Beispiel die Fehler in der Berechnung der Synchronisation, die sich als Folgefehler in der automatisiert berechneten Tempokurve niederschlagen.

Nachdem die Grenzen automatisierter Verfahren zur Tempoberechnung beispielhaft aufgezeigt wurden, stellen wir im folgenden Abschnitt eine Benutzerschnittstelle vor, die neuartige Analyse- und Navigationsmöglichkeiten für die Interpretationsforschung eröffnet.

3. Interpretationswechsler

In Kooperation mit der Universität Bonn sind in den letzten Jahren unterschiedliche Schnittstellen entwickelt worden, die es einem Benutzer erlauben, Musikdatenbestände auf neuartige Weise zu durchsuchen.¹³ Im Folgenden stellen wir eine Weiterentwicklung des Interpretationswechslers vor, der das Vergleichen unterschiedlicher Interpretationen beim Hören erleichtert. Diese Benutzerschnittstelle basiert auf Synchronisationstechniken und eröffnet neuartige Möglichkeiten der Navigation zwischen verschiedenen Aufnahmen eines Musikstücks. Hierbei kann der Be-

¹³ David Damm, Christian Fremerey, Frank Kurth, Meinard Müller und Michael Clausen, ›Multimodal presentation and browsing of music‹, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI)*, Kreta 2008, S. 205–208.

nutzer mittels geeigneter Slider beim Abspielen von Aufnahmen nahtlos zwischen den unterschiedlichen Interpretationen hin- und herwechseln. Diese Funktionalität kann mit dem Anzeigen von Suchergebnissen oder zuvor extrahierten strukturellen Informationen kombiniert werden.

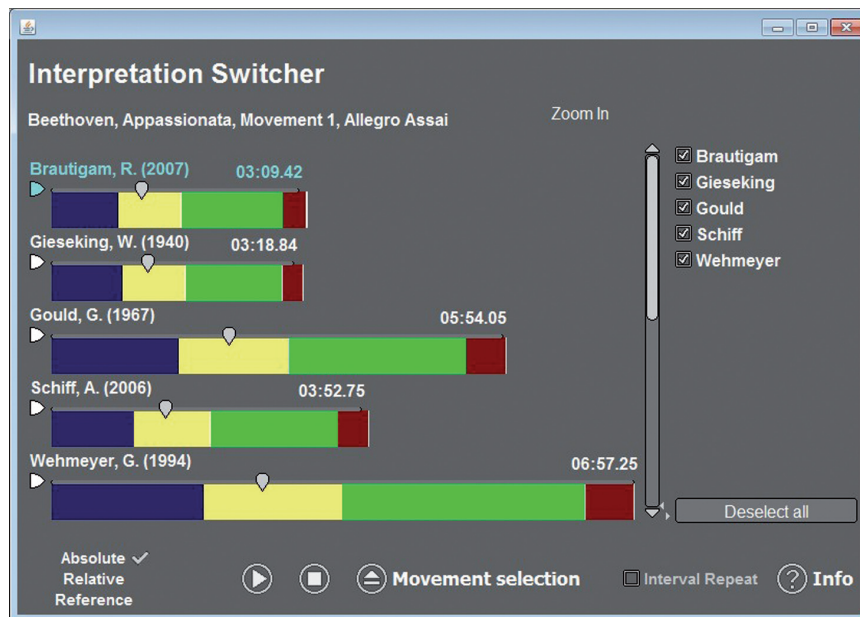


Abbildung 8: Benutzerschnittstelle zur Navigation in unterschiedlichen Einspielungen eines Musikstücks. In diesem Beispiel ist der Interpretationswechsler für fünf unterschiedliche Aufnahmen von Beethovens Klaviersonate op. 57 (*Appassionata*), 1 Satz, geöffnet. Weiterhin werden unterschiedliche Formteile des Satzes, kodiert durch unterschiedliche Farben, angezeigt.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Interpretationswechsler für fünf verschiedene Aufnahmen des ersten Satzes von Beethovens *Appassionata*. Hierbei werden die musikalischen Formteile der Sonatenhauptsatzform durch farbkodierte Blöcke dargestellt: So entspricht blau der Exposition, gelb der Durchführung, grün der Reprise und rot der Coda. Der Musikwissenschaftler kann die verschiedenen Aufnahmen an einer beliebigen Stelle direkt miteinander vergleichen und auf diese Weise Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Interpretationen analysieren. Außerdem ermöglichen die Strukturblöcke das Navigieren innerhalb der Aufnahmen, indem durch Klicken in einen farbkodierten Block der entsprechende Formteil direkt abgespielt wird. Weiterhin lassen sich aus der Länge der visualisierten Strukturblöcke Informationen zum Grundtempo einer Interpretation im Vergleich zu den anderen Interpretationen ablesen. So fällt beispielsweise sofort auf, dass die Einspielung mit Grete Wehmeyer die langsamste aller Aufnahmen ist, während die Einspielungen

von Walter Gieseking und Ronald Brautigam ein deutlich schnelleres Grundtempo aufweisen. Auch Unterschiede in der Tempogestaltung der einzelnen Strukturblöcke sind in der Visualisierung sofort erkennbar. Vergleicht man beispielsweise die Aufnahmen von Wehmeyer und Gould, so stellt man fest, dass Wehmeyer insgesamt ein sehr viel langsames Grundtempo wählt als Gould. Dennoch unterscheiden sich die Länge der Strukturblöcke der Exposition, Durchführung und Coda nur unwesentlich voneinander, während der mit der Reprise korrespondierende Block in der Wehmeyer-Einspielung deutlich länger ist. Dies deutet darauf hin, dass Wehmeyer besonders in der Reprise ein erheblich langsames Tempo wählt als Gould.

Momentan ist der Interpretationswechsler unter anderem im Digitalen Beethoven-Haus¹⁴ in Bonn in Form eines digitalen Exponats zu finden. Dort stehen dem Musikliebhaber zur Zeit 27 verschiedene Aufnahmen der *Appassionata* zur Verfügung, die man mit Hilfe des Interpretationswechslers direkt miteinander vergleichen kann.

4. Fazit

In diesem Beitrag wurde am Beispiel der Interpretationsforschung das Potential computergestützter Methoden für die Musikwissenschaft angedeutet. Durch die Automatisierung von Mess- und Annotationsvorgängen sowie die Entwicklung unterstützender Visualisierungs- und Navigationswerkzeuge kann die Informatik den Musikwissenschaften wertvolle Hilfestellungen leisten – gerade auch im Hinblick auf große Musikdatenbestände. Allerdings stößt man bei der Automatisierung auch schnell an die Grenzen des Machbaren. Insofern bedarf es bei der Nutzung computergestützter Methoden grundsätzlich der kritischen Auseinandersetzung des Musikwissenschaftlers mit den automatisiert berechneten Ergebnissen.

Danksagung

Die Autoren werden durch das Exzellenzcluster *Multimodal Computing and Interaction* (MMCI) der Universität des Saarlandes unterstützt. Ein spezieller Dank geht an die Arbeitsgruppe von Prof. Michael Clausen, Universität Bonn, für die langjährige Kooperation im Bereich der Musikinformatik. Schließlich danken wir Heinz von Loesch und Fabian Brinkmann für die zur Verfügung gestellten manuellen Annotationen des ersten Satzes der *Appassionata*.

¹⁴ <http://www.beethoven-haus-bonn.de>.