

Bildbasierte Digitalisierung von historischen Toninformationsträgern

Master-Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines
M.Sc. Digital Humanities

Eingereicht von: David Fuhry

Matrikel-Nr. 3704472
Zschochersche Str. 32
04229 Leipzig

Erstbegutachter: Prof. Dr. Phil. Manuel Burghardt
Zweitbegutachter: Dr. Heike Fricke/Prof. Dr. Josef Focht

Computational Humanities
Institut für Informatik
Universität Leipzig
Augustusplatz 10
04109 Leipzig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Historische Toninformationsträger	2
2.1	Plattenförmige Toninformationsträger	2
2.2	Notenrollen	4
3	Forschungsstand	7
4	Softwarebasierte Digitalisierung von historischen Toninfor-	10
	mationsträgern	
4.1	Das musicbox Paket	10
4.2	Digitalisierung von Lochplatten	12
4.3	Digitalisierung von Notenrollen	16
5	Analysetools und Visualisierungen	18
6	Diskussion	22
7	Fazit	23

1 Einleitung

Historische Medien wie Lochplatten und Klavierrollen sind die ältesten, kommerziell in größerer Stückzahl produzierten und auch für den Privatgebrauch gedachten Toninformationsträger. Sie wurden vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zur frühen Mitte des 20. Jahrhunderts von einer Vielzahl von Musikstücken, durch verschiedene Hersteller und in einer hohen Zahl unterschiedlicher Formate produziert. Die Medien sind zeithistorische Zeugnisse aus einer Zeit, in der privater Musikkonsum erstmals einer breiteren Gruppe von Personen möglich wurde.

Neben durch die Hersteller auf der Basis von Kompositionen erstellten Medien, existieren mit den sogenannten Player Rolls auch Notenrollen, die an einem speziell modifizierten Klavier von kontemporären Pianist:innen eingespielt wurden. Diese Notenrollen bilden die einzigen Aufnahmen vieler der bekanntesten Pianist:innen aus einer Zeit, in der Audioaufnahmen technisch noch nicht ausgereift genug für die Aufnahme musikalischer Darbietungen waren.

Diese Eigenschaften machen solche historischen Toninformationsträger zu einer wichtigen Ressource für die moderne musikwissenschaftliche Forschung. Während eine signifikante Anzahl von Medien, insbesondere Notenrollen, bis heute überlebt hat, wird sich ihr Zustand auf absehbare Zeit weiter verschlechtern und so zu irreversiblen Verlusten von Medien und den darauf enthaltenen Informationen führen.

Um diese zeithistorischen Dokumente auch in Zukunft für die musikwissenschaftliche Forschung zugänglich zu machen und gleichzeitig weitere Schäden an den Medien, etwa durch Abnutzung, zu minimieren, bietet sich die Digitalisierung ebendieser an. Dazu zählt zum einen die Erstellung von hochauflösenden Bildern der Medien, zum anderen aber auch die Digitalisierung der auf den Medien kodierten Toninformationen. Verfahren zu diesem Zweck existieren, sind aber überwiegend schlecht dokumentiert und nicht problemlos zugänglich (siehe Abschnitt 3).

Das Musikinstrumentenmuseum der Universität Leipzig ist im Besitz einer umfangreichen Sammlung von solchen historischen Toninformationsträgern. Im Rahmen des vergangenen Forschungsprojektes TASTEN wurden von ca. 3000 der Notenrollen aus dieser Sammlung vollständige Scans erstellt.

Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens DISKOS an der Forschungsstelle des Musikinstrumentenmuseums ist die Digitalisierung dieser Notenrollen und weiterer, plattenförmiger Toninformationsträger aus derselben Sammlung, sowie die inhaltliche Analyse der digitalisierten Medien. Eine kurze Übersicht dazu findet sich bei Khulusi et al. (2022). Zur Umsetzung der Ziele des Forschungsprojekts soll unter anderem eine Anwendung entwickelt werden, die Medien aller Formate in der Sammlung verarbeiten kann. Die Anwendung soll auch für die inhaltlichen Analysen nutzbar sein.

Zu diesem Zweck wurde die in dieser Arbeit beschriebene Software implementiert. Sie ist in der Lage, aus den Bilddaten von historischen Toninformationsträgern, die darauf kodierten musikalischen Informationen zu extrahieren.

Es wird zunächst ein voll funktionsfähiges Verfahren zur Digitalisierung von Lochplatten vorgestellt. Ebenso wird eine erste Implementierung für ein Verfahren zur Digitalisierung von Notenrollen eingeführt. Die Anwendung gibt nach der Verarbeitung der Bilddaten eine standardisierte Midi-Datei aus.

Im weiteren werden die in die Anwendung integrierten Analyse- und Vi-

sualisierungstools, die in Zusammenarbeit mit den am Forschungsprojekt beteiligten Musikwissenschaftler:innen zur Beantwortung musikwissenschaftlicher Fragestellungen entwickelt wurden, demonstriert.

2 Historische Toninformationsträger

Als Toninformationsträger im Sinne dieser Arbeit werden solche Medien bezeichnet, die zum Betrieb von mechanischen Musikinstrumenten benötigt werden. Eine Definition für mechanische Musikinstrumente ist etwa in Hocker (2021) gegeben:

Mechanische Musikinstrumente (selbstspielende Musikinstrumente, Musikautomaten, Automatophone) sind Musikinstrumente, bei denen die Tonfolge selbsttätig durch einen Toninformationsträger gesteuert wird. Die Mehrzahl der mechanischen Musikinstrumente reproduziert Musik ohne Einwirkungsmöglichkeit des Menschen. (Hocker, 2021, I. Definition)

Die Geschichte solcher mechanischen Musikinstrumente reicht bis in die Antike zurück, in der bereits einfache Orgeln existierten, die über das Setzen von Stiften auf einer sich drehenden Walze gesteuert werden konnten. Den Höhepunkt ihrer Popularität erreichten die mechanischen Musikinstrumente während des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts, als eine Vielzahl von verschiedenen, immer komplexeren mechanischen Instrumenten konstruiert wurde (Bowers, 1972, S. 10–12). Mit der Entwicklung von besseren und günstigeren Methoden zur Audioaufnahme und -reproduktion um die 1930er Jahre, wurden die mechanischen Musikinstrumente praktisch komplett vom Markt verdrängt (Jánosy & Mácsai, 1994, S. 2). Für eine ausführliche Übersicht über die Geschichte der mechanischen Musikinstrumente sei auf die entsprechende Literatur verwiesen, etwa Bowers (1972, 1975) und Hocker (2021).

Die Medien für solche mechanischen Instrumente enthalten Toninformationen, mit denen das mechanische Instrument Musik erzeugen kann. Üblicherweise werden dafür mindestens grundlegende Informationen wie der Beginn, die Länge sowie die zugehörige Tonhöhe für jeden zu spielenden Ton auf dem Medium kodiert. Es existieren aber auch Instrumente, und mit ihnen Formate von Toninformationsträgern, die zusätzlich weitere Informationen zu Dynamik und Spielweise enthalten können.

Im Weiteren sollen vorrangig die für diese Arbeit relevanten Typen von Toninformationsträgern weiter betrachtet werden. Diese wurden im Zeitraum zwischen 1882 und 1930 produziert und lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen: Plattenförmige und rollenförmige Medien. Die plattenförmigen Medien können dabei sowohl zeitlich als auch technologisch als Vorgänger der rollenförmigen betrachtet werden können.

2.1 Plattenförmige Toninformationsträger

Plattenförmigen Medien wurden ab ca. 1875 produziert und stellten einen Paradigmenwechsel in der Konstruktion mechanischer Musikinstrumente dar. Waren bei früheren Modellen die Toninformationen direkt im Instrument enthalten (beispielsweise über Walzen), wurden sie nun separat auf Platten ausgeliefert

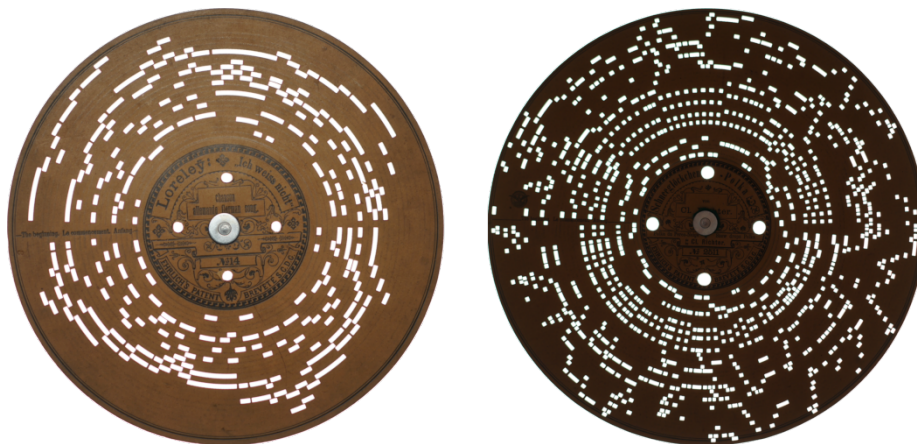


Abbildung 1: Lochplatten zweier verschiedener Formate aus dem Bestand des Musikinstrumentenmuseums der Universität Leipzig. Links eine Lochplatte des Typs Ariston, rechts eine Lochplatte für einen mechanischen Klaviervorsetzer. Abbildungen nicht maßstabsgetreu.

und waren somit erstmals unabhängig vom Instrument. Eine solche Platte hat zumeist eine kurze Laufzeit von maximal einigen Minuten und kann damit kürzere Stücke oder Motive aus größeren Kompositionen enthalten. Durch diese Entwicklung wurde es erstmals möglich, eine größere Sammlung von Musikstücken zu besitzen (Hocker, 2021, III.5.c. Plattenspieldosen und Drehinstrumente).

Frühe Ausführungen dieser mechanischen Instrumente nutzten Platten aus Pappe, auf denen die Toninformationen in Form von Löchern kodiert sind, im Folgenden Lochplatten genannt. Lochplatten dieser Formate sind sich prinzipiell recht ähnlich und unterscheiden sich vor allem in den verfügbaren Tönen, sowie den Abmessungen der Medien. Beispiele für zwei Lochplatten unterschiedlicher Formate dieses Typs sind in Abbildung 1 zu sehen.

Die Lochplatten sind in mehrere Spuren unterteilt, jede Spur ist einem bestimmten Ton zugeordnet. Meist sind die Spuren aufsteigend nach Tonhöhe sortiert, mit der tiefsten Note auf der innersten Spur. Die Töne selbst sind als Löcher binär in der Platte kodiert, dort wo ein Loch vorhanden ist klingt der Ton der entsprechenden Spur. Anzumerken ist, dass die meisten Formate nicht chromatisch angelegt sind. Die populären Lochplatten der Marke Ariston beispielsweise haben 24 Spuren, decken aber über 3 Oktaven ab.¹ Durch das Auslassen bestimmter Töne ergaben sich zwar Einschränkungen bei der Kodierung von musikalischen Stücken auf die Medien, es konnte aber ein größerer Tonumfang abgebildet werden, ohne die Medien und Abspielgeräte in unpraktikable Größen zu skalieren.

Die Abspielgeräte für solche Platten (siehe Abbildung 2) nutzen ein Verfahren zur Tonerzeugung, dass einer Mundharmonika nicht unähnlich ist. Eine Lochplatte wird in das Abspielgerät eingelegt, das über eine Leiste mit Zungen verfügt, die den gesamten Radius des informationstragenden Teils der Lochplatte abdeckt. Zum Abspielen wird die Lochplatte, je nach Gerät per Handkurbel oder automatisiert, gedreht und Luft wird durch die Zungen bewegt. An den

¹Siehe Focht (2022a) für eine genaue Aufschlüsselung des Tonvorrats dieses Formates.



Abbildung 2: Abspielgerät für Lochplatten der Marke Ariston aus dem Bestand des Musikinstrumentenmuseums der Universität Leipzig. Links das vollständige Gerät mit aufgelegter Lochplatte, rechts die für die Tonerzeugung wichtige Zunge.

Stellen, an denen Löcher vorhanden sind, kann die Luft durch die Zungen passieren, so dass ein Ton erzeugt wird. Der so entstehende Klang dieser, auch Organetten genannten, Instrumente wurde jedoch häufig als nicht zufriedenstellend empfunden (Hocker, 2021, III.5.c. Plattenspieldosen und Drehinstrumente).

Eine der folgenden Entwicklungen, die gemacht wurden, um dieses klangliche Defizit auszugleichen, war der mechanische Klaviervorsetzer. Dieser nutzt Lochplatten, die denen für die Organetten sehr ähnlich sind und Informationen nach demselben Prinzip kodieren. Im Gegensatz zu den Organetten ist im Abspielgerät selbst allerdings keine Tonerzeugung integriert. Stattdessen besitzt das Gerät eine Reihe mechanischer Finger, die, vor einem Klavier platziert, das auf der Lochplatte kodierte Stück auf diesem spielen.

Eine andere Weiterentwicklung der Organetten stellen plattenförmige Medien aus Metall dar. Bei ihrer Produktion wurden kleine Teile des Blechs umgebogen, so dass Noppen entstanden, die in der Lage sind Tonkämme anzureißen. Die Abspielgeräte für solche Platten verfügten häufig über Zusatzinstrumente wie Triangeln oder Trommeln und waren unter anderem in Wirtshäusern sehr populär (Hocker, 2021, III.5.c. Plattenspieldosen und Drehinstrumente). Während die Digitalisierung solcher Metallplatten Teil des DISKOS-Projekts ist, ist sie, aufgrund der fundamental unterschiedlichen Art der Informationskodierung auf den Medien, kein Teil dieser Arbeit.

Im Rahmen des DISKOS-Projekts wurden Bilder eines vollständiges Konvoluts aus ca. 60 Lochplatten der Marke Ariston angefertigt, die mit der in dieser Arbeit vorgestellten Software digitalisiert wurden. Weitere ca. 40 Lochplatten für einen mechanischen Klaviervorsetzer befinden sich noch im Fotografiereprozess, konnten aber bereits vereinzelt für erfolgreiche Testdigitalisierungen genutzt werden.

2.2 Notenrollen

Während die mit der Lochplatte eingeführte Trennung zwischen Abspielgerät und Toninformationen eine signifikante Weiterentwicklung gegenüber den vor-

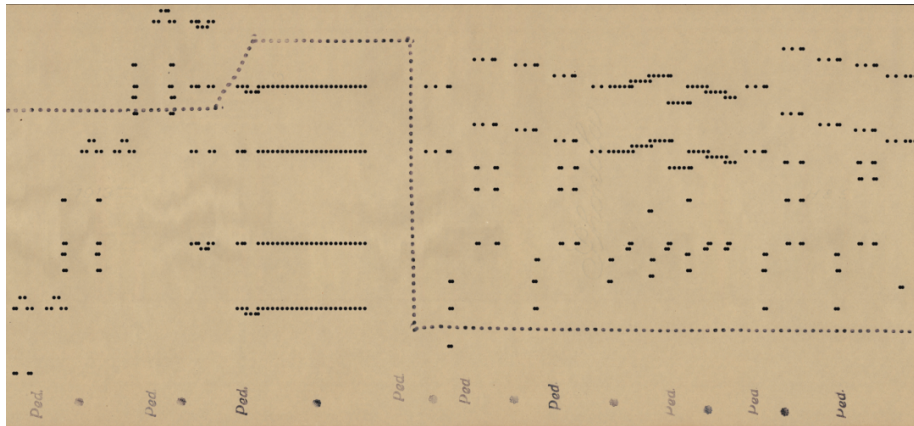


Abbildung 3: Abschnitt einer Notenrolle des Typs Hupfeld Phonola Solodant. Zu sehen ist neben den vorhandenen Lochungen auch eine eingezeichnete Dynamiklinie.

angegangenen mechanischen Musikinstrumenten darstellte, wurde mit der Notenrolle² ein weiterer, wichtiger Entwicklungsschritt gemacht. Dieses, um die Jahrhundertwende eingeführte, Format unterscheidet sich zum einen in der Form der Toninformationsträger, die nun als mehrere Meter lange Rollen ausgeführt wurden, aber vor allem durch die eingesetzten Techniken in den Abspielgeräten. Ein Abschnitt einer solchen Rolle ist Abbildung 3 zu entnehmen.

Die Veränderungen in der Art der Informationskodierung auf Notenrollen ist im Vergleich zu Lochplatten relativ klein. Zunächst unterscheiden sich die Notenrollen vor allem durch die neue Form als Rolle, aus zumeist Papier oder Pappe, die eine Spielzeit von bis zu 15 Minuten ermöglichte. Eine Notenrolle ist analog zu den früheren Lochplatten in mehrere Spuren unterteilt, die nun allerdings nicht mehr kreisförmig, sondern parallel, meist über die Rollenbreite von Bass (links) nach Diskant (rechts) sortiert, angelegt sind. Die Spuren enthalten weiterhin Löcher, die über ihre Position die Toninformationen auf der Notenrolle kodieren. Ein wesentlicher Unterschied zu Pappplatten besteht in der Kodierung länger zu spielender Töne: Diese werden nun nicht mehr durch eine durchgehende Lochung, sondern durch in sehr kurzem Abstand platzierte, sich z.T. auch überlappende, Löcher umgesetzt.

Frühe Abspielgeräte funktionieren, analog zu mechanischen Klaviervorsetzern für Pappplatten, als Vorsetzer und unterscheiden sich im Wesentlichen durch die längere Laufzeit der Notenrollen. Der entscheidende Vorteil dieses Systems liegt in der pneumatischen Steuerung des Abspielgeräts. Zum Abspielen wird die Rolle in das Abspielgerät eingelegt und dieses erzeugt, bei den ersten Geräten durch menschliche Kraft, später durch Elektromotoren, ein Vakuum über die gesamte Rollenbreite. Erreicht das Gerät nun eine Stelle der Notenrolle, an der ein Loch vorhanden ist, kann die Luft durch das Loch strömen und so eine pneumatische Steuerung betreiben. Diese erlaubte es über die Stärke des angelegten Vakuums auch die Stärke des Anschlags auf dem bespielten Klavier zu variieren (Hocker, 2021, III.5.d. Selbstspielende Klaviere).

²Auch Klavierrolle genannt.

Mit dieser Technik wurden kurz vor der Jahrhundertwende die ersten selbstspielenden Klaviere konstruiert. Die meisten dieser Klaviere verfügten über 2 separate Windladen für die Erzeugung des Vakuums und konnten so die Lautstärke von Bass und Diskant getrennt regulieren. Während die Variation der Vakuumstärke bei den früheren Modellen, genau wie die Wahl der Geschwindigkeit, noch durch die benutzende Person erfolgte, wurden schnell zunehmend komplexere Abspielgeräte und Rollenformate entwickelt, bei denen diese Aufgaben vom Abspielgerät selbst übernommen wurde (Hocker, 2021, III.5.d. Selbstspielende Klaviere).

Im Jahr 1904 patentierte die Firma Welte mit dem Welte-Mignon-System das erste Reproduktionsklavier, ein System das ohne menschliche Eingaben Musikstücke wiedergeben konnte (Hocker, 2021, III.5.d. Selbstspielende Klaviere). Um dies zu ermöglichen wurden Informationen beispielsweise zu Dynamik und Pedalbenutzung auf dafür vorgesehenen Spuren der Notenrolle kodiert. Die Rollen des Typs Welte-Mignon T100 etwa, besitzen 100 Spuren von denen nur 80 zu Tönen zugeordnet sind. Die übrigen 20 Spuren dienen zur Steuerung des Abspielgerätes (Focht, 2022b).

Solche Informationen konnten im Herstellungsprozess entweder manuell kodiert werden oder aber durch die direkte Aufnahme von Stücken über speziell dafür konstruierte Aufnahmeklaviere erzeugt werden. An diesen konnten Künstler:innen ein Stück einspielen, welches danach in einem mehrstufigen Prozess durch den Rollenhersteller auf eine Masterrolle übertragen wurde. Das genaue Verfahren mit dem dies geschah wurde durch die Hersteller mit größter Geheimhaltung geschützt und da keines der Aufnahmegeräte bis heute überdauert hat kann darüber nur spekuliert werden (Jánosy & Mácsai, 1994).

Da Audioaufnahmen zur damaligen Zeit noch nicht in vergleichbarer Qualität möglich waren, bescherten grade diese eigens eingespielten Künstlerrollen den Reproduktionsklavieren eine enorme Popularität. Schnell entwickelte sich eine Vielzahl an verschiedenen Systemen von Reproduktionsklavieren und dazugehörigen Toninformationsträgern. In den 1920er Jahren hatte die Mehrzahl der bekannten Pianist:innen für einen oder mehrere der Hersteller Notenrollen eingespielt (Bowers, 1972, S. 11).

Im Rahmen des vorangegangenen TASTEN-Projekts wurden zwischen 2018 und 2020 am Musikinstrumentenmuseum der Universität Leipzig ca. 5000 Notenrollen in Form von Bildern digitalisiert. Von diesen liegen ca. 3000 als vollständige Scans vor, von dem restlichen ca. 2000 Notenrollen sind nur die Anfänge der Rolle, auf denen Metainformationen wie Titel, Format, etc. vermerkt sind, gescannt worden. Das gesamte Konvolut umfasst über 30 verschiedene Formate von Notenrollen. Während im Rahmen des DISKOS-Projektes aus den Scans von Notenrollen aller vorliegenden Formate Midi-Dateien generiert werden sollen, beschränkt sich diese Arbeit auf Rollen des Typs Hupfeld Phonola Solodant, einem verhältnismäßig einfachen Format mit 77 Spuren.

3 Forschungsstand

Das bisherige Forschungsinteresse zur Digitalisierung von historischen Toninformationsträgern konzentriert sich stark auf die Verarbeitung von Notenrollen. Dies dürfte vor allem auf die Existenz der bereits erwähnten, von kontemporären Pianist:innen eingespielten Notenrollen zurückzuführen sein. Aber auch die bessere Verfügbarkeit, bedingt durch die hohe produzierte Stückzahl sowie die spätere Produktionszeit und die damit besseren Chancen von heute noch funktionsfähigen Medien, kann ein Faktor sein, der zu dieser Diskrepanz am Forschungsinteresse beiträgt.

Die einzigen bekannten Arbeiten zur Digitalisierung von Lochplatten sind im Rahmen des SISAR-Projekts der Italian Mechanical Music Association (AMMI) entstanden (Pedrazzini et al., 2013; Perretti et al., 2014). Im Rahmen dieses Projekts sollen verschiedenen Typen von historischen Toninformationsträgern digitalisiert werden. Dabei arbeiten die Autor:innen auch mit Lochplatten des Types Ariston, für die eine Anwendung entwickelt wurde, mit der Bilder dieser runden Medien in eine viereckige, einer Notenrolle ähnlichen Darstellung transformiert werden können, um sie später mit Software zur Digitalisierung von Notenrollen verarbeiten zu können (Perretti et al., 2014). Eine solche Digitalisierungsanwendung wurde ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelt (Zappalà, 2021). Die Umwandlung in eine Midi-Datei erfolgt dabei mittels hinterlegter Informationen zum Medienformat und den vorhandenen Spuren, das Ausrichten der Spuren auf dem Scan erfolgt manuell.

Leider sind die eingesetzten Methoden praktisch undokumentiert, so dass sich weder zu Qualität und Funktionalität der entstehenden Digitalisate, noch zum aktuellen Entwicklungsstand des Verfahrens eine sinnvolle Einschätzung vornehmen lässt. Auch ist die eingesetzte Software weder als Quellcode noch in binärer Form öffentlich verfügbar, so dass auch auf diesem Weg kein Schluss auf die Güte des Vorgehens möglich ist.

Dennoch können diese Arbeiten zeigen, dass die Digitalisierung von Lochplatten und Notenrollen viele Ähnlichkeiten aufweist. Dazu gehört zum einen die ähnliche Art der Informationskodierung (durch Löcher), aber auch mechanische Eigenschaften der Abspielgeräte. Beide Formate werden durch luftbetriebene Mechanismen von den Abspielgeräten ausgelesen, so dass auch die Art der Informationsdekodierung grundsätzlich ähnlich ist. Dies legt nahe die Digitalisierung der beiden Medienformate als gemeinsamen Themenbereich zu betrachten. Die vorhandenen Ansätze zur Digitalisierung von Notenrollen können folglich auch als relevant für die Entwicklung von Verfahren zur Digitalisierung von Lochplatten betrachtet werden.

Die ersten Überlegungen zu solchen Verfahren lassen sich in den 1970er Jahren verorten, in den 1990ern und frühen 2000ern existierten bereits mehrere Systeme im weiteren Umfeld der digitalen Verarbeitung von Notenrollen (Colmenares et al., 2011, S. 63). Allgemein lässt sich feststellen, dass die Projekte aus dieser Zeit überwiegend durch interessierte Privatpersonen und weniger im Rahmen akademische Forschung entstanden sind.

Eines der ersten Projekte dieser Art war das Philips Ampico-Apple System von Peter Stephens (o. d.), das die Digitalisierung von Notenrollen des Types Ampico ermöglichte. Ein späteres Beispiel ist die Entwicklung einer Lösung zur Digitalisierung von Notenrollen mehrerer Formate durch Wayne Stahnke (1996).

Als letztes Beispiel dieser privaten Projekte, sei Spencer Chase (o. d.) er-

wähnt, der ebenfalls ein System zur Digitalisierung von Notenrollen konstruierte, aber auch daran interessiert war diese Digitalisate anschließend wieder auf physischen Instrumenten abspielen zu können. Eine weitere größere Sammlung von digitalisierten Klavierrollen existierte auf der, inzwischen nicht mehr verfügbaren, Website der International Association of Mechanical Music Preservationists (IAMMP)³.

Ziel dieser privaten Projekte war es primär die Information auf den Notenrollen zu konservieren und sie auf anderen Geräten wieder abspielbar zu machen. Gemein haben diese Enthusiasten-Projekte eine sehr beschränkte bis fehlende Dokumentation der Prozesse, die zur Digitalisierung genutzt wurden. Meist wurden die Verfahren entweder gar nicht oder nur auf Mailinglisten und, inzwischen häufig nicht mehr verfügbaren, privaten Websites dokumentiert. Die verwendete Software ist meist proprietär und steht heute nicht mehr für eine Analyse zur Verfügung. Auch die für die erstellten Digitalisate verwendeten Dateiformate sind, insbesondere bei den älteren Projekten, proprietär und nur begrenzt dokumentiert. Bei größeren Sammlungen, wie etwa der der IAMMP, ist eine Nachvollziehbarkeit der Ersteller:innen und der genutzten Methoden zur Digitalisierung nur begrenzt gegeben. Diese Faktoren schränken die wissenschaftliche Verwendbarkeit der Digitalisierungsprozesse, aber auch der erzeugten Digitalisate, stark ein.

Eine frühe wissenschaftliche Arbeit zur Digitalisierung von Notenrollen findet sich bei Jánosy und Mácsai (1994). Die Autor:innen beschreiben die Digitalisierung von Notenrollen des Types Welte-Mignon. Über einen Rollenscanner werden Bilder der Klavierrollen erzeugt, aus welchen nach der softwareseitigen Verarbeitung zwei Midi-Dateien generiert werden. Eine Midi-Datei enthält nur die rohen Informationen zu den Tönen auf der Notenrolle, die andere schließt auch die in der Notenrolle kodierten Informationen zu Dynamik ein. Die Autoren konnten, auch bedingt durch die verfügbare Technologie, einige Aspekte der Digitalisierung nur bedingt bzw. nur mit Hilfe manueller Korrekturen durchführen, so etwa das Erkennen von Expressionskurven und der Umgang mit Defekten an der Notenrolle, wie Rissen im Papier. Sie nutzten bereits Techniken, die sich auch in späteren Arbeiten wiederfinden, so wird etwa der Rollenrande dynamisch über den Verlauf der Rolle verfolgt, um durch Deformationen des Papiers entstandene Ungenauigkeiten auszugleichen.

Debrunner (2013) nutzt für die Digitalisierung von Notenrollen der Typen Welte-Philharmonie und Welte-Mignon T100 einen Zeilenscanner und eigene Software. Die verwendete Software ist dabei grundsätzlich in der Lage die Digitalisierung in eine Midi-Datei automatisch durchzuführen, benötigt aber bei einem signifikanten Teil der Rollen manuelle Korrekturen. Das genaue Digitalisierungsverfahren ist nicht dokumentiert, der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Verarbeitung der auf den Notenrollen kodierten Steuerungsinformationen, welche ausführlich beschrieben werden.

Eine Arbeit, die sich spezifisch mit den Herausforderungen der Erzeugung von MIDI Dateien aus bereits digitalisierten, in Matrizenform vorliegenden Notenrollen beschäftigt, findet sich bei Colmenares et al. (2011). Die Autor:innen nutzen dabei Digitalisate die mit der Technologie von Stahnke (1996) erzeugt wurden. Im Gegensatz zu dessen proprietärer Digitalisierungstechnologie setzen die Autor:innen aber einen Schwerpunkt darauf, ihren Umwandlungsprozess

³www.iammp.org

ausführlich zu dokumentieren.

Sie gehen dabei sowohl allgemein auf das Dekodierungsverfahren für Notenrollen in Matrizenform ein, als auch insbesondere auf die Umsetzung der Kontrollspuren ins Midi-Format. Von Interesse ist insbesondere das von den Autoren zur Validierung ihrer Ergebnisse eingesetzte Verfahren. Sie führen dafür einen Wellenformvergleich von, aus den von ihnen erzeugten Midi-Dateien generierten, Audiodateien mit den von Stahnke (1996) selbst erzeugten und vertriebenen Audio-CDs der gleichen Notenrollen durch (Colmenares et al., 2011, S. 70–72). Dabei können sie die Genauigkeit ihres Verfahrens demonstrieren, das bis auf kleinere Abweichungen authentische Ergebnisse produziert. Problematisch scheint allerdings, dass die Genauigkeit dieser Validierungsmethode stark von der Genauigkeit der ursprünglichen, von Stahnke (1996) mittels eines proprietären, nicht öffentlich dokumentierten Prozesses durchgeführten, Digitalisierung abhängig ist.

Das aktuellste und umfangreichste Vorhaben zur Digitalisierung von Notenrollen ist das Player Piano Projekt an der Stanford University. Dieses wurde 2014 ins Leben gerufen um die umfangreiche Sammlung von Notenrollen in der eigenen Bibliothek für Forscher:innen und andere Interessierte zugänglich zu machen (Shi et al., 2019). Aktuell befinden sich circa 20.000 Notenrollen in der Sammlung in Stanford, von denen ca. 1000 erfolgreich digitalisiert wurden (Broadwell et al., 2022). Das Projekt fokussierte sich dabei zunächst auf die Digitalisierung von Notenrollen des Typs Welte-Mignon T100, umfasst inzwischen aber auch die Digitalisierung von Rollen anderer Formate.

Dafür wurde zunächst ein Gerät konstruiert, das es erlaubt hochauflösende Bilder der Notenrollen anzufertigen. Teil des Scanprozesses ist dabei die Anwendung verschiedener automatischer Fehlerkorrekturen für Defekte der gescannten Notenrolle. So wird etwa, ähnlich zu Jánosy und Mácsai (1994), ein Korrekturverfahren zur Begradigung der Notenrolle genutzt, mit dem, besonders in den späteren Teilen der Rollen auftretende, Verzerrungen kompensiert werden können. Weiterhin setzten die Autor:innen Filter ein um Löcher die uncharakteristisch Merkmale aufweisen⁴ und vermutlich auf Beschädigungen zurückzuführen sind zu erkennen. Schnell aufeinanderfolgende Löcher, die von Originalabspielgeräten als einzelne Note gespielt werden, werden zusammengefasst (Shi et al., 2019, S. 519–520).

Auch die Funktionalität der Steuerungsspuren wird in dem von Shi et al. (2019, S. 521–522) vorgestellten Digitalisierungsverfahren möglichst originalgetreu in den erzeugten Midi-Dateien abgebildet. Ebenso werden weitere Anpassungen vorgenommen, um das Abspielverhalten auf Originalabspielgeräten zu simulieren, wie etwa die leichte Temposteigerung, die durch die sich verändernden Rollendurchmesser beim Abspielen einer Notenrolle vermutet wird. Aus den generierten Midi-Dateien wird mittels eines generischen Software-Pianos eine Audiodatei generiert.

Aktuell arbeiten die Autor:innen unter anderem am Pianolatron, einer webbasierten Softwarelösung, die Notenrollen darstellen und interaktiv abspielen kann (Abraham et al., 2022). Die Software erlaubt es dabei beliebige Notenrollen aus dem Bestand von ca. 1000 digitalisierten Rollen abzuspielen, Parameter wie Abspielgeschwindigkeit und Lautstärke können interaktiv angepasst werden. Auch können verschiedene Parameter der Emulation der mechanischen Kompo-

⁴Beispielsweise bei Form oder Orientierung des Lochs.

nenten der Originalabspielgeräte angepasst werden, so dass, in Fällen in denen durch Verlust der Originalabspielgeräte keine notwendigerweise originalgetreue Emulation möglich ist, experimentell verschiedene Parameter getestet werden können. Es bestehen weitere Interaktionsmöglichkeiten, so können Nutzer:innen etwa durch Auswählen von auf den Rollen vorhandenen und durch die Software erkannten Noten weitere Informationen zu diesen einsehen. Insgesamt bildet das Pianolatron schon im aktuellen Zustand eine umfangreiche und vielversprechende Abspiel- und Emulationslösung für Notenrollen.

4 Softwarebasierte Digitalisierung von historischen Toninformationsträgern

4.1 Das musicbox Paket

Im Rahmen des DISKOS-Projekts soll eine einheitliche Softwarelösung für die Generierung von Midi-Dateien aus Bildern der Toninformationsträger im Bestand des Musikinstrumentenmuseums der Universität Leipzig erstellt werden. Zu diesem Zweck wurde die, dieser Arbeit zugrundeliegende, Software in Form des `musicbox` Pakets in der Programmiersprache Python (Van Rossum & Drake Jr, 1995) implementiert. Diese Software ermöglicht es, den gesamten Umwandlungsprozess, von der Vorverarbeitung der Bilddaten bis zur Erstellung der Midi-Datei, automatisiert vorzunehmen. Es werden während der Verarbeitung idealerweise keine externen Eingaben benötigt.

Um die für die Verarbeitung der diversen unterschiedlichen Formate von Toninformationsträgern notwendige Flexibilität zu ermöglichen und gleichzeitig eine möglichst hohe Wiederverwendbarkeit der einzelnen Bestandteile zu gewährleisten, ist die Software modular aufgebaut und durch Konfigurationsdateien flexibel anpassbar. Mit diesem Ansatz soll in der Zukunft für die Verarbeitung eines neuen Formats von Toninformationsträgern idealerweise die Erstellung einer Pipeline aus einzelnen Verarbeitungsschritten und die Angabe von formatspezifischen Informationen wie Spurenbelegung, Abmessungen etc. ausreichen.

Diese Funktionalität wird über Profile, die in einer YAML-Konfigurationsdatei hinterlegt sind, realisiert. In dieser wird für ein Profil zunächst eine Pipeline bestehend aus mehreren Verarbeitungsschritten definiert. Die verfügbaren Verarbeitungsschritte sind innerhalb des Pakets in mehreren Python-Dateien, nach dem Teilgebiet des Umwandlungsprozesses zu dem sie gehören aufgeteilt. Neben der Verarbeitungspipeline werden die für den Umwandlungsprozess benötigten Parameter in der Konfigurationsdatei abgelegt. Diese beinhalten Metadaten zum Format des Mediums das verarbeitet werden soll, etwa die Anzahl und die Belegung der vorhandenen Spuren, aber auch Parameter für die Vorverarbeitung der Bilddaten, etwa den Threshold für die Bildbinarisierung.

Die Software ist dabei auf einfache Erweiterbarkeit ausgelegt. Neue Verarbeitungsschritte können als Methode in der entsprechenden Python-Datei definiert werden und werden dann, wenn sie Bestandteil einer Verarbeitungspipeline sind, automatisch zur Laufzeit aufgerufen. Zusätzlich können in einer separaten Konfigurationsdatei Metainformationen zum Verarbeitungsschritt definiert werden. In dieser Datei werden Informationen zu den für den Verarbeitungsschritt erforderlichen Parametern, sowie aus anderen Verarbeitungsschritten benötigten

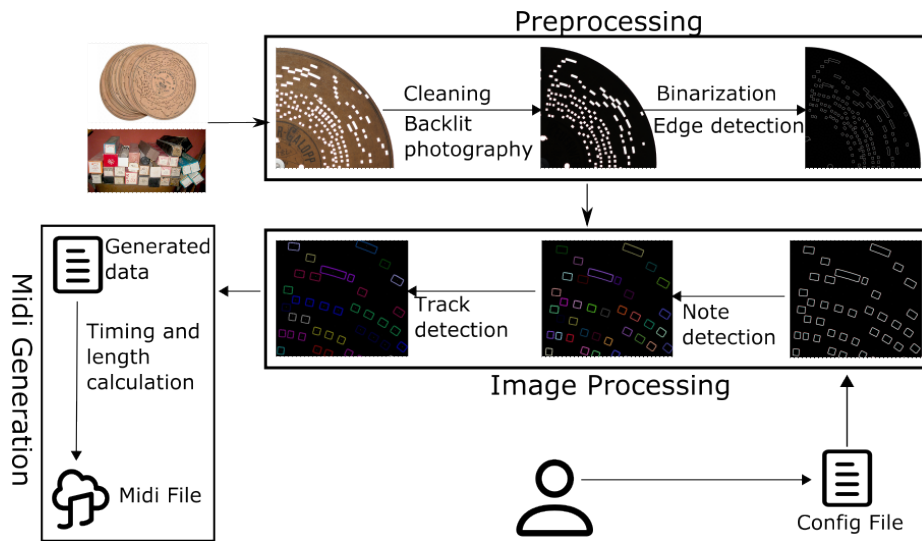


Abbildung 4: Übersicht über den Digitalisierungsprozess einer Lochplatte mit der *musicbox* Software.

bzw. für diese bereitgestellten Daten gespeichert. Diese Informationen nutzt die Software, um vor der Ausführung einer Verarbeitungspipeline zu prüfen, ob diese ausführbar ist und ob alle benötigten Parameter im Konfigurationsprofil definiert sind.

Der Umwandlungsprozess selbst kann entweder über das Einbinden des Pakets in ein eigenes Python-Skript oder über ein bereitgestelltes Wrapper-Skript angestoßen werden. In Abbildung 4 ist eine grobe Übersicht über den allgemeinen Umwandlungsprozess zu sehen.

Grundlegend gilt es im Umwandlungsprozess von Lochplatten und Notenrollen die Informationen über Tonhöhe, -anfang und -länge zu finden. Dazu müssen zunächst die einzelnen Löcher auf dem Medium identifizieren werden. Für jedes dieser Löcher sind im Folgenden der Start- und Endpunkt der Lochung auf dem Medium zu identifiziert, aus welchen Tonanfang und -länge ableitbar sind. Abschließend muss jedes Loch noch der entsprechenden Spur auf dem Medium zugeordnet werden, um die Tonhöhe bestimmen zu können.

Ziel der Umwandlung ist in jedem Fall die Erstellung einer Midi-Datei. Eine solche speichert keine Audioinformationen, sondern, nicht unähnlich der ursprünglichen Toninformationsträger, Informationen wann welcher Ton für wie lange klingt. Midi-Dateien können als etablierter Standard für die Speicherung solcher Informationen betrachtet werden und sind das Umwandlungsziel oder -zwischenziel bei allen aktuelleren Verfahren zum Digitalisieren von Toninformationsträgern, siehe etwa Colmenares et al. (2011, S. 65) oder Shi et al. (2019, S. 518).

Im Folgenden wird dieser Umwandlungsprozess anhand einer voll funktionalen Pipeline für die Umwandlung von Lochplatten, sowie einer sich noch im Prototypstadium befindlichen Pipeline für Notenrollen genauer erläutert.

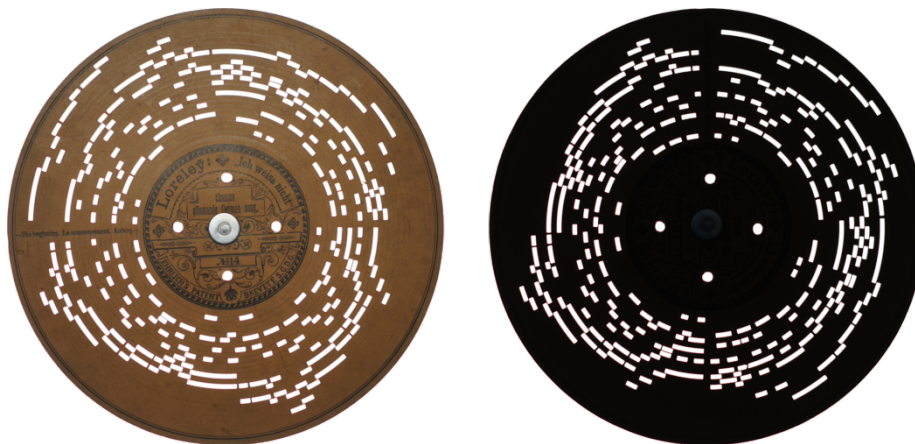


Abbildung 5: Zur Dokumentation angefertigtes Bild einer Lochplatte sowie das für die Digitalisierung bestimmte Bild der gleichen Lochplatte.

4.2 Digitalisierung von Lochplatten

Lochplatten sind die ältesten Toninformationsträger, die im DISKOS-Projekt digitalisiert werden sollen. Die Verarbeitung der Lochplatten ist durch die runde Form etwas komplexer als die von Notenrollen. Gleichzeitig sind die auf den Medien kodierten Toninformationen vergleichsweise simpel, es sind keine Steuerungsinformationen oder ähnliches vorhanden. Auch reduziert die relativ kleine Größe der Medien die rechnerische Komplexität des Unwandlungsprozesses im Vergleich zu Notenrollen.⁵ Sie wurden deshalb als erstes Format für die Umwandlung in Midi-Dateien ausgewählt.

Der Digitalisierungsprozess beginnt mit der Begutachtung der Medien durch am Projekt beteiligte Musikwissenschaftler:innen, die die Medien reinigen, auf Schäden untersuchen und anschließend alle auf dem Medium selbst vorhandenen Metainformationen, zusammen mit allen gefundenen Beschädigungen des Mediums, dokumentieren. Anschließend wird eine hochauflösende Fotografie des Mediums angefertigt. Die Lochplatten werden dazu in einer, speziell für diesen Zweck konstruierten, Aufhängung platziert, in welcher sie mit Hintergrundbeleuchtung fotografiert werden können. Abbildung 5 zeigt beispielhaft das Bild einer Lochplatte der Marke Ariston, sowohl als normales Foto als auch als Bild für die weitere digitale Verarbeitung.

Die Bilder, die für die softwarebasierte Verarbeitung vorgesehen sind, unterscheiden sich dabei von denen, die zur Dokumentation und Konservierung angefertigt werden. Während die Platten für die normalen Fotografien nach der Plattenbeschriftung ausgerichtet werden, werden die Lochplatten für die weitere Digitalisierung mit der Startmarkierung der Lochplatte auf 0 Grad ausgerichtet. Dadurch entfällt die Notwendigkeit die Startmarkierung softwareseitig zu identifizieren. Auch werden diese Aufnahmen mit veränderten Belichtungseinstellungen vorgenommen, um einen höheren Kontrast zwischen den Löchern auf

⁵Vorliegende Notenrollenscans erreichen bei 300 DPI Dateigrößen bis zu 5GB.

Algorithmus zum Finden von 2-verbundenen Komponenten aus Scikit-Image (van der Walt et al., 2014) eingesetzt. Die so gefundenen Komponenten werden für die weitere Verarbeitung in jeweils ein Array mit den Koordinaten der zugehörigen Pixel umgewandelt, um Berechnungen von Distanzen etc. zu vereinfachen. Aus diesen Komponenten wird die äußere Kante der Platte identifiziert (die größte zusammenhängende Komponente), sowie rechnerisch, mithilfe von in der Konfiguration hinterlegten Messungen, die innere Grenze des mit Tonspuren belegten Bereichs bestimmt. Es werden alle gefundenen Komponenten die innerhalb dieser inneren Begrenzung oder außerhalb des äußeren Plattenrandes liegen herausgefiltert, da diese keine Tonlöcher sein können und somit für die weitere Verarbeitung uninteressant sind.

Alle verbleibenden Komponenten sind die Kanten von Löchern auf der Lochplatte. Einzelne Platten weisen Beschädigungen in der Form von Einrissen zwischen zwei Löchern auf, die dazu führen können, dass diese Löcher als eine gemeinsame Komponente und damit im Weiteren als ein Einzeler, über die gesamte Länge der beiden Löcher klingender, Ton interpretiert werden. Dies entspricht allerdings auch dem Verhalten eines Originalabspielgerät beim Abspielen einer Platte mit solchen Beschädigungen, so sie denn in einem insgesamt noch spielbereiten Zustand ist. Um zu gewährleisten, dass das Digitalisat dem tatsächlich vorliegenden Medium so ähnlich wie möglich ist, findet deshalb keine Korrektur solcher Einrisse statt.

Im nächsten Schritt wird der Mittelpunkt der Lochplatte bestimmt. Da die Lochplatten beim Fotografieren an dem Loch in ihrer Mitte aufgehängt werden, ist dieses auf den Bildern nicht identifizierbar. Zur Mittelpunktbestimmung wird deshalb ein rechnerisches Verfahren angewendet. Es wird mittels des Algorithmus von Haliř und Flusser (1998) eine Ellipse auf die Punkte des äußeren Plattenrandes regressiert und anschließend aus der Ellipsengleichung der Mittelpunkt bestimmt. Dieses Verfahren liefert grundsätzlich sehr akkurate Ergebnisse, hat jedoch bei einzelnen Lochplatten mit bestimmten Deformationen Probleme. Dort wird zwar der korrekte Mittelpunkt des äußeren Plattenrandes identifiziert, dieser ist aber nicht der Mittelpunkt der Tonspuren auf der Platte. In diesen Fällen ist aktuell eine manuelle Korrektur des Mittelpunkts nötig.

Anschließend werden die einzelnen erkannten Löcher ihren entsprechenden Spuren zugeordnet, so dass die jeweiligen Tonhöhen bestimmt werden können. Dafür wird zunächst die Distanz, vom Zentroid ausgehend, jeder Komponente zum äußeren Rand sowie zum Mittelpunkt der Lochplatte berechnet. Aus diesen Distanzen wird die relative Position der Komponente zwischen dem Plattenmittelpunkt und dem Plattenrand abgeleitet. Dies dient zur Reduzierung des Einflusses von Deformationen der Lochplatte auf den Spurzuordnungsprozess.

Anhand dieser Positionen werden die Komponenten in die einzelnen Spuren gruppiert, wozu das MeanShift Clusteringverfahren (Fukunaga & Hostetler, 1975) in der Implementierung in Scikit-Learn (Pedregosa et al., 2011) eingesetzt wird. Dieses Verfahren wurde gewählt, da es gegenüber den meisten Algorithmen, die spezifisch für das Gruppieren von eindimensionalen Daten entwickelt wurden, den Vorteil bietet kein a priori Wissen über die Anzahl der Cluster zu benötigen. Da nicht notwendigerweise alle Spuren, die ein Format bietet auf jeder Platte des Formats genutzt werden, ist nur die obere Schranke der Zahl der Cluster bekannt, nicht aber die Zahl der tatsächlich gesuchten.

Dies beeinflusst auch die Zuordnung der gefundenen Spuren zu den im Format existierenden. Um für das Vorhandensein leerer Spuren zwischen den ge-

gefundenen Spuren zu kompensieren, wird die durchschnittliche Distanz der gefundenen Spuren zu den jeweiligen Nachbarn berechnet und jeweils zwischen die Spuren mit der höchsten Distanz eine leere Spur eingefügt. Dies wird wiederholt, bis die Zahl der vorhandenen Spuren der in dem Format existierenden Spuren entspricht. Ist dieser Schritt abgeschlossen, sind die gefundenen Löcher ihren Spuren zugeordnet und die mit ihnen verbundene Tonhöhe ist ermittelt.

Um die nun noch fehlenden Informationen zu Tonanfang und -länge zu finden, wird für jedes Loch das minimal umschließende Rechteck berechnet. Anhand dessen wird je ein Punkt am, im Sinne der Abspielrichtung der Lochplatte, Anfang und Ende des Lochs bestimmt. Für beide Punkte wird dann, ausgehend vom Plattenmittelpunkt, der Winkel zwischen Punkt und dem Rollenanfang berechnet. Der kleinere Winkel ist der Tonanfang, der Zeitpunkt an dem die Note zu klingen beginnt, die Differenz der beiden Winkel die Tonlänge, die Zeit für die der Ton klingt.

Die Originalabspielgeräte für diese Medien spielen Töne leicht verzögert zum Erreichen des Loches ab. Dies ist in der Bauweise begründet, erst wenn eine bestimmte Menge Luft durch ein Ventil strömt entsteht ein hörbarer Ton, üblicherweise wenn etwa die Hälfte eines Ventils frei liegt. Ein ähnliches Verhalten ist auch beim Schließen der Ventile am Lochende zu beobachten. Aktuell findet hierfür keine Anpassung statt, dies wäre aber in der Zukunft über Konfigurationsparameter vorstellbar.

Weiterhin ist anzumerken, dass die berechneten Angaben zu Timing und Tonlänge in Grad vorliegen und nicht in Schlägen, wie sie in Midi-Dateien kodiert sind. Während softwareseitig Methoden bereitgestellt werden um diese Angaben um einen festen Faktor zu skalieren, ist eine genaue Bestimmung des Zeitmaßes nicht zuletzt dadurch erschwert, dass es sich bei den Originalabspielgeräten um handbetriebene Automaten handelte. Das Tempo war deshalb abhängig von der Drehgeschwindigkeit der Kurbel und somit variabel. Eine bessere Bestimmung des Zeitmaßes würde vermutlich durch die Bestimmung von Takt- und Schlaglänge des Stücks auf dem Medium möglich, die aber nicht zum aktuellen Funktionsumfang der Software gehört.

Aus den bis hier gewonnen Informationen wird abschließend mit der MIDIUtil Bibliothek (Wirt, 2018) eine Midi-Datei erstellt, die die auf dem Toninformationsträger vorhandenen Informationen enthält. Diese Dateien können anschließend beliebig weiterverwendet werden. Eine Überführung in eine Auralisierung, in Form einer Audiodatei, kann entweder über generische Softwareinstrumente erfolgen oder z.B. über die, sich ebenfalls am Musikinstrumentenmuseum in Entwicklung befindliche, midiAuralizer (Ukolov, 2022) Software. Diese ermöglicht es beliebige Midi-Dateien mittels, im Rahmen des DISKOS-Projekts aufgenommener, Tonvorräte von historischen Instrumenten, darunter auch Originalabspielgeräte für Lochplatten des Typs Ariston, zu Audiodateien umzuwandeln.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde in dieser Form für die Umwandlung des gesamten Konvolutes der Lochplatten des Types Ariston verwendet. Ebenso konnte es in testweisen Digitalisierungsversuchen mit Lochplatten für einen mechanischen Klaviervorsetzer ähnlich gute Ergebnisse erzeugen. Die nötigen Anpassungen beschränken sich dabei auf die Erstellung eines neuen Konfigurationsprofils mit Informationen zu den Abmessungen und Spuren des neuen Formats.

4.3 Digitalisierung von Notenrollen

Als nächster Schritt der Entwicklung der vorgestellten Software wurde ein vergleichsweise simples Format von Notenrollen für die Digitalisierung ausgewählt, Notenrollen der Marke Hupfeld Phonola Solodant. Notenrollen dieses Formats besitzen 77 Spuren, von denen 73 Spuren Tönen zugeordnet sind, 2 zur Dynamiksteuerung verwendet werden und 2 freibleiben.

Während das vorgestellte Digitalisierungsverfahren für Lochplatten als voll funktionsfähig angesehen werden kann, befindet sich die Lösung für die Umwandlung von Notenrollen noch in einem früheren Entwicklungsstadium und sollte als Prototyp verstanden werden. So werden die auf den Rollen vorhandenen Steuerspuren zwar korrekt ausgelesen, aber bei der Generierung der MIDI-Dateien aktuell nicht genutzt. Auch können, zum Teil auf den Rollen abgedruckte, Dynamiklinien durch das Verfahren aktuell nicht ausgewertet werden. Dennoch stellt das Verfahren in seinem aktuellen Zustand eine grundlegend funktionsfähige Digitalisierungslösung für Notenrollen dar. Auch zeigt sich im Hinblick auf die Umsetzung des Verfahrens der Vorteil einer modularen Softwarelösung wie der hier vorgestellten. Während viele Komponenten speziell für die Verarbeitung von Notenrollen implementiert wurden, konnte ein Teil der Komponenten aus dem bereits vorgestellten Prozess wiederverwendet werden.

Die, während des vorangegangenen TASTEN-Projekts in Zusammenarbeit mit einem externen Dienstleister erstellten, vollständigen Scans von Notenrollen liegen als TIFF-Dateien mit einer Auflösung von 300 DPI vor und bilden die gesamte Notenrolle inklusive Anfang und Ende ab. Diese Scans wurden, im Gegensatz zu den im Rahmen des DISKOS-Projekts erstellten Aufnahmen von Lochplatten, vor schwarzem Hintergrund ohne Hintergrundbeleuchtung erstellt. Aus technischen Gründen umfassen die Scans, je nach Rollenlänge, auch einen längeren, leeren Bereich nach dem Ende der Rolle.

Nach der Binarisierung der Bilder, die mit der gleichen Komponente wie die der Lochplatten erfolgt, wird daher zunächst die Rolle auf die Länge des tatsächlich gelochten Teils gekürzt. Um diesen Bereich zu identifizieren, wird über die gesamte Länge des Scans für jede Zeile der relative Anteil der Pixel mit Inhalt errechnet. Anschließend wird bestimmt in welchen Zeilen der Anteil der gefüllten Pixel über 80% liegt⁷ und aus diesen die längste zusammenhängende Folge von Zeilen ausgewählt. Diese Methode schließt, je nach konkret betrachtetem Scan, einen gewissen Teil von Rollenanfang und -ende mit ein, dies erwies sich jedoch in der Praxis als unproblematisch für die weitere Verarbeitung.

Die folgenden Schritte des Findens von zusammenhängenden Komponenten sowie das Umwandeln dieser in Koordinatenlisten geschehen mit den gleichen Verfahren, die auch für Lochplatten genutzt wurden. Um die Ränder der Rolle zu identifizieren, werden über die gesamte Länge der Rolle 100 zufällige Zeilen ausgewählt und die in diesen Zeilen liegenden verbundenen Komponenten gezählt. Die beiden Komponenten die in den meisten, praktisch sogar allen, Zeilen vorkommen sind die Kanten an den Rändern der Rolle.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmetechnik der Notenrollen, gegenüber den später aufgenommenen Lochplatten, weisen sie nach der Binarisierung und Kantenerkennung deutlich mehr Artefakte auf. Um dies zu kompensieren, werden im nächsten Schritt Filter auf die gefundenen Komponenten angewendet.

⁷Die Scans der Notenrollen weisen einen, je nach Format, unterschiedlich großen Rand neben der Rolle auf. 80% wurde experimentell als sinnvolle untere Schranke bestimmt.

Zum einen wird für jede verbundene Komponente ermittelt, ob sie aus mehr oder weniger Pixeln besteht als der über die Pixelzahl aller verbundenen Komponenten, mit Ausnahme der Rollenränder, gebildete Mittelwert. Alle Komponenten, die aus weniger Pixeln bestehen als die durchschnittliche Komponente werden entfernt. Die verbleibenden Komponenten werden noch einmal über ihre Form gefiltert. Es wird geprüft ob das gerundete Verhältnis von Höhe zu Breite der Komponente im Intervall $[1, 2]$ liegt. Während ein rundes Loch in einer Notenrolle üblicherweise etwa genau so breit wie hoch sein sollte, kann es bei sehr eng platzierten Löchern dazu kommen, dass diese als eine gemeinsame Komponente erkannt werden. Deshalb werden solche Komponenten, die bis etwa doppelt so hoch wie breit sind, nicht entfernt. Abgesehen von einzelnen Verarbeitungsfehlern sind alle noch verbleibenden Komponenten die Kanten von Löchern auf der Notenrolle.

Anschließend werden die Informationen zu den auf der Rolle kodierten Noten extrahiert. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des DISKOS-Projekts von Musikwissenschaftler:innen der Gleitbock des Abspielgerätes⁸ vermessen und die genauen Maße, sowie der assoziierte Ton für jede Spur dokumentiert, siehe Focht (2022c). Mit diesen Informationen kann, durch einfaches Berechnen der relativen Distanzen zwischen dem Loch und den Rollenrändern, die zugehörige Spur für jedes Loch ermittelt werden.

Da Notenrollen sich, bedingt durch die lange Zeit der Lagerung, insbesondere im späteren Verlauf der Rolle verziehen können, wird die Rolle für diese Berechnungen in Segmente zu jeweils mindestens 1000 Pixeln unterteilt und die Positionsbestimmung für jedes Segment separat vorgenommen. Die Segmente werden dabei so gewählt, dass kein Loch geteilt wird. Sollte der Bedarf bestehen können diese Segmente auch kleiner gewählt werden, die gewählte Segmentgröße hat sich jedoch bis jetzt als ausreichend erwiesen, um, zumindest leichte, Deformationen der Rolle ausgleichen zu können. Gleichzeitig sollte diese Segmentgröße noch ausreichend groß sein, um zu verhindern, dass kürzere Einrisse in der Rolle oder ähnliche Beschädigungen die Spurbestimmung negativ beeinflussen. Tonanfang und -länge werden durch die Position des höchsten und tiefsten Punkts einer Komponente bestimmt.

Im Gegensatz zu den Abspielgeräten für Lochplatten werden Reproduktionsklaviere meist von elektrischen Motoren betrieben und erlauben so eine präzise Einstellung der Abspielgeschwindigkeit. Die vorgesehene Abspielgeschwindigkeit ist bei einigen Formaten auf dem Rollenanfang, in der Einheit feet per 10 Minutes vermerkt (Colmenares et al., 2011, S. 63). Da die Scanauflösung bekannt ist, kann der Umrechnungsfaktor Pixel per Second (*pps*) aus den feet per minute (*fpm*) wie in Gleichung 1 errechnet werden.

$$pps = \frac{fpm * 12 * 300}{60} \quad (1)$$

Werden die vorher ermittelten Timings und Tonlängen nun mit diesem Faktor skaliert, liegen die Tonlängen in Sekunden vor. Zeitangaben in MIDI-Dateien erfolgen grundsätzlich als Schläge (Beats) und nicht in Sekunden,⁹ weshalb zusätzlich die Geschwindigkeit der erzeugten Midi-Datei auf 60 BPM festgelegt

⁸Die Komponente auf der die Notenrolle aufliegt und an der das Vakuum anliegt das für die Tonerzeugung nötig ist.

⁹Alternativ ist es auch möglich die Zeitangaben in Ticks zu hinterlegen, diese stehen allerdings in einem direkten Verhältnis zu Schlägen.

wird. Mittels dieser Skalierung sollten die Digitalisate der Notenrollen mit vorhandenen Tempoangaben annähernd im Originaltempo abgespielt werden.

Aufgrund der mechanischen Eigenschaften der Pneumatik der Originalabspielgeräte wurden Löcher, die einen sehr kleinen Abstand zueinander hatten wie ein durchgehendes Loch abgespielt. Die praktische Grenze dieses Verhaltens ist nicht klar bekannt und dürfte zwischen Geräten variieren. Jánosy und Mácsai (1994, S. 7) geben sie mit 10-12 Wiederholungen die Sekunde an, die noch als einzelne Töne interpretiert werden sollten. Darauf basierend wird eine obere Grenze von 12 Noten die Sekunde als differenzierbar wiedergebar angenommen. Alle Noten, die so eng beieinanderliegen, dass sie diese Grenze überschreiten, werden durch die Software zusammengefasst.

Abschließend wird analog zur Verarbeitung der Lochplatten eine Midi-Datei generiert. Das hier vorgestellte Verfahren wurde u.a. zur Umwandlung einer Skalenrolle¹⁰ genutzt und konnte dort zufriedenstellende Ergebnisse produzieren.

5 Analysetools und Visualisierungen

Neben der Umwandlung der historischen Toninformationsträger in Midi-Dateien, steht die Nutzbarmachung der generierten Daten für die musikwissenschaftliche Forschung im Fokus des DISKOS-Projekts. Zu diesem Zweck implementiert das `musicbox` Paket Funktionen zur Erstellung von Analysedaten und Visualisierungen aus den verarbeiteten Bildern.

Diese Funktionen werden in Zusammenarbeit mit den am Forschungsprojekt beteiligten Musikwissenschaftler:innen entwickelt und orientieren sich an den Fragestellungen die diese an die Toninformationsträger haben. Während im weiteren Verlauf des DISKOS-Projekts insbesondere die Erkennung von Mustern in den Aufnahmen, sowie vergleichende Analysen vorgenommen werden sollen, fokussierte sich die bisherige, hier vorgestellte Arbeit vor allem auf grundlegendere Methoden zur besseren Erschließung der vorliegenden Daten.

Eine erste Frage die die Musikwissenschaftler:innen an die Medien hatten war die Identifizierung von Akkorden, also gemeinsam klingenden Tönen. Zu diesem Zweck sind im Softwarepaket mehrere Methoden implementiert. So lassen sich zum einen die klingenden Akkorde von den Basstönen¹¹ aus untersuchen. Dabei werden alle Basstöne, die Grenze bis zu der ein Ton als Basston angesehen wird ist frei konfigurierbar, ausgewählt und für jeden dieser Töne alle anderen gleichzeitig klingenden Töne ermittelt.

Eine weitere Methode durchsucht das Medium sequenziell und ermittelt für jeden Ton die anderen gleichzeitig klingenden Töne. Beide Methoden lassen sich flexibel konfigurieren, um beispielsweise festzulegen ob auch Töne miteinander geschlossen werden sollen, die bereits vor der betrachteten Note angespielt wurden, aber noch klingen, während diese angespielt wird. Die Ergebnisse werden anschließend in Text- und Bildform ausgegeben und sind für die Analyse verfügbar.

Insbesondere der letzte hörbare Akkord ist dabei für die musikwissenschaftliche Analyse von Interesse, da er üblicherweise direkte Rückschlüsse auf die

¹⁰Eine Klavierrolle die aufsteigend alle Spuren mehrmals abspielt und ursprünglich zum Testen und Kalibrieren der Abspielgeräte genutzt wurde.

¹¹Die im Akkord meist den Grundton bilden.

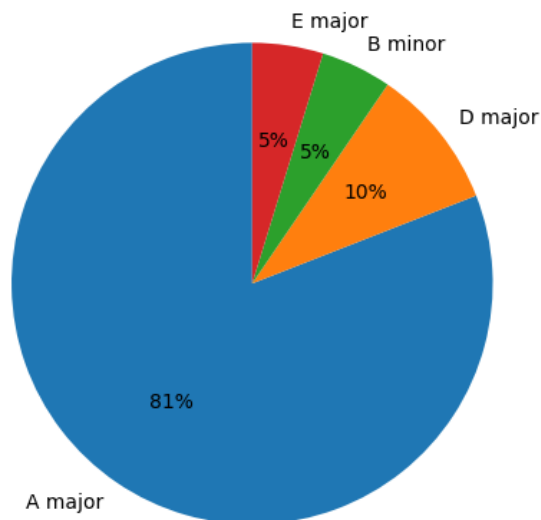


Abbildung 7: Anteil der Tonarten unter Stücken des Konvoluts von Ariston Lochplatten.

Tonart des Stücks ermöglicht. Für die Tonartbestimmung eines Stücks existieren weiterhin auch algorithmische Ansätze, wie etwa das probabilistische Modell von Temperley (2002). Die `musicbox` Software nutzt die Implementierung dieses Verfahrens im Python Paket `music21` (Cuthbert & Ariza, 2010), um die Tonart der Stücke auf den bearbeiteten Medien zu bestimmen. In Abbildung 7 sind die ermittelten Tonarten für das gesamte vorhandene Konvolut von Platten des Typs Ariston zu sehen.

Die dort sichtbare Dominanz von Stücken in A-Dur im Konvolut legt den Schluss nahe, dass das Format besonders für Stücke in dieser Tonart geeignet war. Ob dies in dem Tonvorrat, den dieses Format enthält, begründet liegt oder ob es sich um gesellschaftliche Gründe, wie etwa eine besonders gute Resonanz der Konsumenten auf Stücke in dieser Tonart, eventuell auch spezifisch bezogen auf Stücke, die in Form solcher Toninformationsträger vertrieben wurden, handelt, ist dabei eine Frage die im weiteren Verlauf der musikwissenschaftlichen Forschung beantwortet werden muss.

Neben solchen Analyseverfahren waren die beteiligten Musikwissenschaftler:innen auch an Visualisierungen zur besseren Erschließung der Medien interessiert. Ein erster Schritt dazu ist die Frage nach der Häufigkeit des Vorkommens von einzelnen Tönen auf den Medien. Zu diesem Zweck wurde eine Funktion implementiert, die die Notenhäufigkeit über das gesamte Medium ermittelt und als Balkendiagramm ausgibt (siehe Abbildung 8). Dabei werden durch die Software mehrere Diagramme generiert.

Zunächst wird die Häufigkeit aller Einzeltöne dargestellt, wobei die X-Achse

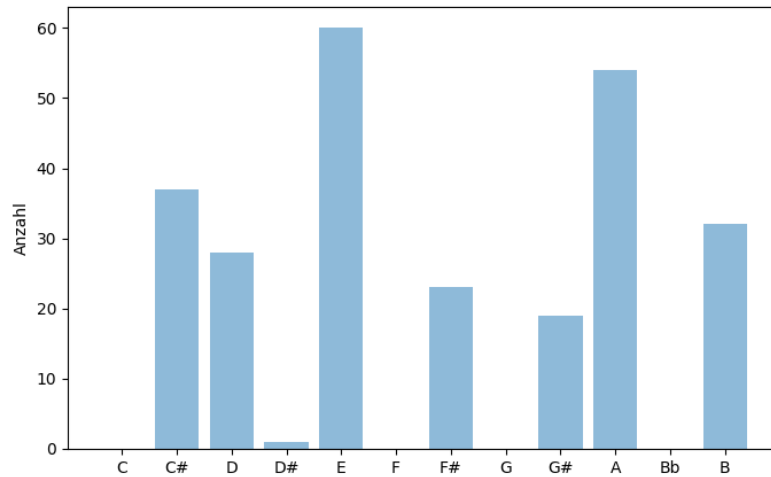


Abbildung 8: Häufigkeit der einzelnen Grundtöne auf einer beispielhaften Ariston Lochplatte.

bewusst chromatisch angeordnet ist und auch Töne einschließt, die auf dem spezifischen Medium bzw. dem Medienformat nicht vorhanden sind. Dies dient der einfacheren optischen Erkennung von Mustern. Ein ähnlicher Graph wird auch mit der Summe der Tonlängen pro Ton, statt der Vorkommenshäufigkeit, erstellt. Um eine generalisierte Betrachtung zuzulassen, werden beide Diagramme auch in einer Form erzeugt, in der die Töne auf ihre Grundtöne reduziert werden, was eine einfachere Übersicht der Tonhäufigkeiten etwa für Rückschlüsse auf die vorkommende Tonart ermöglicht. Zur Diagrammerstellung kommt allgemein die Python-Bibliothek matplotlib (Hunter, 2007) zum Einsatz.

Die beteiligten Musikwissenschaftler:innen waren weiterhin an einer Darstellung interessiert, die auch die zeitliche Komponente der Medien mit einschließt. Hierfür wurde ein Streamgraph als Darstellungsform gewählt, der die Häufigkeit der einzelnen Grundtöne über den zeitlichen Verlauf des Mediums darstellt. Für die Erstellung der in Abbildung 9 zu sehenden Streamgraphen wurde ein Binning der vorkommenden Noten über die zeitliche Komponente des Mediums in 12 Segmente vorgenommen. Ferner wurden die vorkommenden Töne auf ihren Grundton reduziert und diese chromatisch sortiert. So wird es ermöglicht das Musikstück auf Trends und Veränderungen in seinem zeitlichen Verlauf zu untersuchen.

Diese Darstellungen haben sich auch als eine praktische Möglichkeit erwiesen, eine Form von Fingerprints für einzelne Medien zu erstellen. In Abbildung 9 sind die Streamgraphen für vier verschiedenen Lochplatten des Typs Ariston zu sehen. Abgebildet sind jeweils zwei Medien von zwei unterschiedlichen Musikstücken, zu denen im Bestand des Musikinstrumentenmuseums mehrere verschiedene Lochplatten vorhanden sind. Die Lochplatten (1) und (2) enthalten Fassungen des Stücks *An der schönen blauen Donau*, Lochplatten (3) und (4) Fassungen des *Schatz-Waltzers*. Während zwischen Lochplatten (3) und (4)

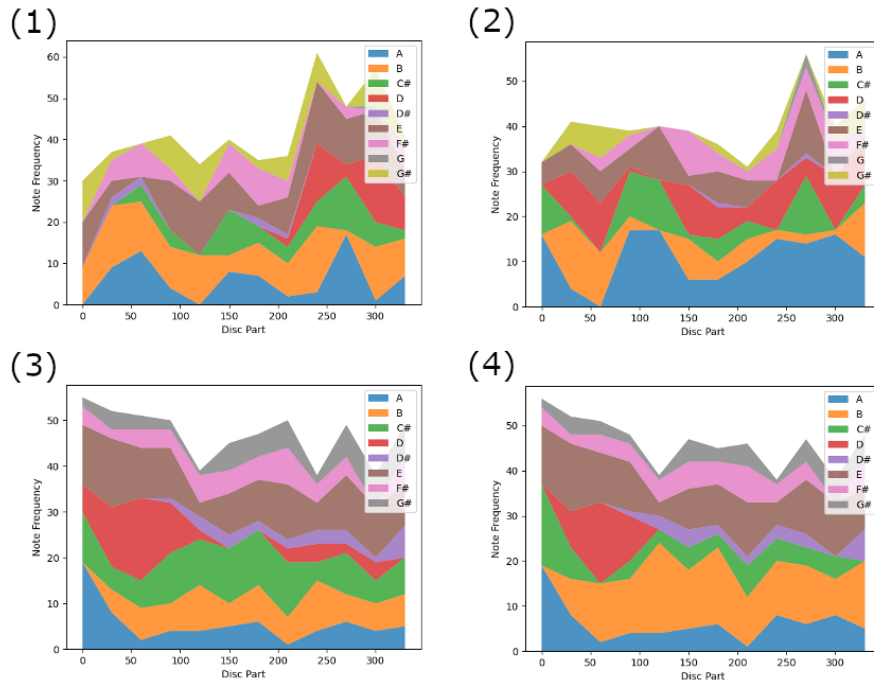


Abbildung 9: Streamgraphen für vier Lochplatten aus dem Ariston Konvolut. Platten (1) und (2) sowie Platten (3) und (4) beinhalten jeweils Fassungen des gleichen Stücks.

leichte Unterschiede ersichtlich sind, wie etwa die Häufigkeit der Töne B und Cis, sind sich die beiden Diagramme strukturell sehr ähnlich, was Tonhäufigkeit und deren Entwicklung über den Verlauf der Platte betrifft. Demgegenüber lassen Lochplatten (1) und (2) zwar noch Ähnlichkeiten erkennen, etwa der starke Anstieg an gespielten Tönen im letzten Abschnitt der Platte, unterscheiden sich allerdings über den gesamten Verlauf des Stücks verhältnismäßig stark. Dies legt den Schluss nah, dass Lochplatten (3) und (4) das gleiche Stück beinhalten, während es sich bei den Platten (1) und (2) potenziell um unterschiedliche Arrangements des gleichen Stücks handelt.

Neben den vorgestellten Analysemöglichkeiten erzeugt die Software während der Verarbeitung der Medien auch Reihe von Informationen, die die Ergebnisse einzelner Zwischenschritte der Verarbeitung repräsentieren, etwa bildliche und textliche Daten zu gefundenen zusammenhängenden Komponenten und Noten. Auch diese Daten lassen sich potenziell nutzen, um die verarbeiteten Medien zu analysieren. Mit tabellarischen Daten zu den erkannten Noten, lassen sich beispielsweise statistische Betrachtungen der Notenlänge über verschiedene Medien realisieren.

Ebenso lassen sich durch die, auf einfache Erweiterbarkeit ausgelegte, Architektur der Anwendung neue Analyseschritte problemlos umsetzen und die Methoden haben nicht nur Zugriff auf die final erzeugten Midi-Daten sondern auch auf alle Daten, die in Zwischenschritten generiert wurden.

6 Diskussion

Die in dieser Arbeit vorgestellte Software ermöglicht die automatisierte Erzeugung von Midi-Dateien aus Bildaufnahmen historischer Toninformationsträger. Sie ist in der Lage, als Lochplatten ausgeführte Toninformationsträger, ausgehend von einem hochauflösenden Bild und einigen von Experten dokumentierten Metainformationen zum Format, zu verarbeiten. Die Funktionalität der Anwendung für diesen Zweck ist durch die praktisch vollständige Digitalisierung des Konvoluts von Lochplatten des Typs Ariston im Bestand des Musikinstrumentenmuseums der Universität Leipzig demonstriert.

Auch konnte gezeigt werden, wie die vorgestellte Software dazu genutzt werden kann, andere Formate historischer Toninformationsträger zu verarbeiten. Unter Wiederverwendung mehrerer Komponenten aus der Verarbeitung der Lochplatten, wurde eine frühe Lösung zur Digitalisierung von Notenrollen des Typs Hupfeld Phonola Solodant vorgestellt. Die Praktikabilität dieser Herangehensweise bestätigt sich durch die erfolgreiche Digitalisierung einer Skalenrolle dieses Formats.

Die in der Anwendung integrierten Analysemöglichkeiten können, in ihrer aktuellen Form, zur Beantwortung grundlegender musikwissenschaftlicher Fragestellungen an den Bestand historischer Toninformationsträger, wie etwa das Ermitteln der Tonart eines Stücks, beitragen. Aber auch für weitergehende Untersuchungen wie den Vergleich mehrerer Medien des gleichen musikalischen Stücks sind Funktionen in Form von Visualisierungen vorhanden.

Im Vergleich mit der in Perretti et al. (2014) erwähnten Anwendung zur Digitalisierung von Lochplatten ist vor allem hervorzuheben, dass die hier vorgestellte Anwendung, neben dem erstmaligen Erstellen einer Konfigurationsdatei für das Format, keine weitere Eingabe für die Umwandlung benötigt und diese automatisch vornimmt. Eine komparative Betrachtung der Digitalisierungsqualität zwischen beiden Anwendungen ist hingegen nicht möglich, da die von Perretti et al. (2014) genutzte Anwendung weder öffentlich zugänglich, noch umfassend dokumentiert ist.

Aus denselben Gründen ist auch ein Vergleich des vorgestellten Verfahrens zur Digitalisierung von Notenrollen mit bereits existierenden Verfahren nur bedingt möglich. Sicher kann davon ausgegangen werden, dass alle Verfahren, die die auf Notenrollen vorhandenen Steuerungsspuren auswerten und korrekt umsetzen, darunter die von Colmenares et al. (2011), Jánosy und Mácsai (1994) und Shi et al. (2019) vorgestellten, originalgetreuere Ergebnisse liefern als es das hier vorgestellte Verfahren in seiner aktuellen Form tut.

Ein wesentlicher Vorteil der dieser Arbeit zugrundeliegenden Anwendung liegt, grade im Vergleich mit den meisten bekannten Verfahren, in der Konzipierung als offene, flexibel erweiterbare Software. Sie kann so zum einen von allen Interessierten genutzt und angepasst werden, zum anderen sind die genutzten Verfahren so für alle Nutzer:innen nachvollziehbar.

Die in der Anwendung vorhandenen Analysewerkzeuge sind aktuell in Umfang und Tiefe noch nicht vergleichbar mit denen von spezieller Software für diesen Anwendungszweck, wie etwa music21 (Cuthbert & Ariza, 2010). Im Gegensatz zu diesen bietet sie aber die Möglichkeit Analysen direkt auf den bei der Digitalisierung erzeugten Daten auszuführen und nicht erst auf der abschließend erzeugten Midi-Datei.

Während der Digitalisierungsprozess, neben dem einmaligen Erstellen eines

Konfigurationsprofils für ein Format, keine weiteren Informationen benötigt, ist es wünschenswert die Zahl der erforderlichen Parameter in Zukunft weiter zu reduzieren. So sollte es etwa möglich sein den optimalen Threshold für die anfängliche Binarisierung der Bilddaten automatisch, statt experimentell zu ermitteln. Dies würde auch die Verarbeitung von Bildern, die mit anderen Aufnahmemethoden als der im Musikinstrumentenmuseum genutzten, erstellt wurden vereinfachen.

Auch die sich noch in einem frühen Stadium befindliche Verarbeitung von Notenrollen soll in Zukunft weiter ausgebaut werden. Insbesondere die Emulation des Abspielverhaltens der Originalabspielgeräte steht hier im Mittelpunkt. Dazu gehören etwa die korrekte Verarbeitung von Steuerungsspuren auf den Medien, sowie das automatische Auslesen von den, auf einigen Medien vorhandenen, Dynamikspuren. Auch anderes gerätespezifisches Verhalten, wie etwa die vermutete Änderung des Abspieltempos durch den sich beim Abspielen verändernden Umfang der auf- bzw. abgerollten Rolle, sollen in Zukunft emuliert werden.

Die in der Software integrierten Analysetools beschränken sich aktuell auf eher grundlegende Analyseschritte und sollen in Zukunft durch weitere Komponenten erweitert werden. Dazu zählen Verfahren zum Erkennen von Mustern in verarbeiteten Medien, aber insbesondere auch Tools, die einen erweiterten Vergleich zwischen mehreren Medien ermöglichen. Verfahren zum Vergleich von Stücken, die sowohl auf historischen Toninformationsträgern als auch in einer anderen Form, wie etwa als Notenblatt, vorliegen, sowie für Vergleiche über ganze Korpora von digitalisierten Toninformationsträgern stehen dabei im Fokus.

Schlussendlich ist auch die Umsetzung von Verfahren zur Validierung der erzeugten Musikdaten wünschenswert. Während die Ergebnisse der Software aktuell vor allem qualitativ durch Musikwissenschaftler:innen validiert werden, sind hier auch Methoden des quantitativen Vergleichs vorstellbar. Denkbar wäre etwa, ähnlich dem von Colmenares et al. (2011) genutzten Verfahren, ein Vergleich von Wellenformen zwischen, mithilfe von Tonvorräten der Originalinstrumenten erstellter, digitalisierter Fassung und Aufnahmen der selben Medien auf den Originalabspielgeräten.

7 Fazit

Historische Toninformationsträger in Form von Lochplatten und Notenrollen stellen wertvolle, zeithistorische Zeugnisse aus einer Zeit, in der privater Musikkonsum erstmals einer breiteren Personengruppe möglich wurde, dar. Im Rahmen der Forschung am Musikinstrumentenmuseum der Universität Leipzig sollen diese Medien erhalten und für die musikwissenschaftliche Forschung geöffnet werden. Dazu gehört die softwarebasierte Erzeugung von Midi-Dateien aus Bildaufnahmen der Originalmedien. Auch sollen verschiedene Analyse- und Visualisierungstools geschaffen werden, die zur Beantwortung musikwissenschaftlicher Fragestellungen an die Medien beitragen können.

In dieser Arbeit wurde die Implementierung einer Anwendung zu diesem Zweck, in Form der Python Software `musicbox` vorgestellt. Es wurde ein Verfahren eingeführt, mit dem diese Anwendung aus Lochplatten erfolgreich und vollständig digitale Midi-Dateien erzeugen kann. Weiterhin wurde ein grundlegendes Verfahren zur Digitalisierung von Notenrollen vorgestellt, welches in

seinen Grundfunktionen bereits für die Digitalisierung einzelner Medien nutzbar ist. Abschließend wurden erste, in der Anwendung integrierte, Analyse- und Visualisierungstools beschrieben, die zur Beantwortung musikwissenschaftlicher Fragestellungen an den Medienbestand genutzt werden können.

Insgesamt konnte ein erfolgreiches Verfahren für die Digitalisierung historischer Toninformationsträger gezeigt werden. Die dabei entstandene Softwareanwendung bietet durch ihre, auf einfache Erweiterbarkeit ausgelegte Architektur, eine solide Grundlage für die Verarbeitung weiterer Medienformate sowie die Umsetzung zusätzlicher Analyse- und Visualisierungstools. In der Zukunft ist die Erweiterung der Anwendung für diese Zwecke geplant.

Literatur

- Abraham, V., Arul, K., Barth, G., Broadwell, P., & Wiles, S. (2022). The Pianolatron: Enabling Web-Based Interactive Performances of Digitized Player Piano Rolls. In *Digital Humanities 2022 - Conference Abstracts* (S. 614–615). ADHO.
- Bowers, Q. D. (1972). *Encyclopedia of automatic musical instruments*. Vestal Press.
- Bowers, Q. D. (1975). *The history of music machines*. Drake Publishers.
- Broadwell, P., Arul, K., & Coy, N. (2022). *Pianolatron – A Virtual Roll Player for Digitized Rolls* [Paper Presentation].
2nd Global Piano Roll Meeting, Bern, Schweiz.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6), 679–698.
- Colmenares, G., Escalante, R., Sans, J. F., & Surós, R. (2011). Computational Modeling of Reproducing-Piano Rolls. *Computer Music Journal*, 35(1), 58–75. <http://www.jstor.org/stable/41241707>
- Debrunner, D. (2013). Von der Welte-Rolle zu parametrisierbaren Wiedergabe auf synthetischen Instrumenten und MIDI-fähigen Selbstspielklavieren. In C. E. Häggi (Hrsg.), *Recording the Soul of Music: Welte-Künstlerrollen für Orgel und Klavier als authentische Interpretationsdokumente*. Hochschule der Künste Bern.
- Fukunaga, K., & Hostetler, L. (1975). The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, 21(1), 32–40. <https://doi.org/10.1109/TIT.1975.1055330>
- Haliř, R., & Flusser, J. (1998). Numerically stable direct least squares fitting of ellipses. *Proc. 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization. WSCG*, 98, 125–132.
- Hocker, J. (2021). Mechanische Musikinstrumente (L. Lütteken, Hrsg.). Zugriff 1. August 2022 unter <https://www.mgg-online.com/mgg/stable/404657>
- Jánosy, Z., & Mácsai, J. (1994). Computer Analysis and Restoration of Reproducing Piano Rolls. *Computer Music Journal*, 18. <https://doi.org/10.2307/3681176>
- Khulusi, R., Fricke, H., Fuhry, D., Piontkowitz, V., & Focht, J. (2022). On Digitizing Historic Music Storage Media For Computational Analysis. In *Digital Humanities 2022 - Conference Abstracts* (S. 274–276). ADHO.
- Pedrazzini, F., Malosio, M., & Perego, N. (2013). Scanning, Listening and Recording Integrated System. *Vox Humana - The magazine of the Mechanical Organ Owner's Society*. Zugriff 13. Mai 2022 unter <https://sites.google.com/view/ammi-lab/publications>
- Perretti, L., Perego, N., & Padrazzini, F. (2014). The "SISAR" Project. *The Amica Bulletin*. Zugriff 13. Mai 2022 unter <https://sites.google.com/view/ammi-lab/publications>
- Shi, Z., Sapp, C., Arul, K., McBride, J., & Smith, J. (2019). SUPRA: Digitizing the Stanford University Piano Roll Archive. *Proceedings of the 20th International Society for Music Information Retrieval Conference*, 517–523. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3527858>

Temperley, D. (2002). A Bayesian Approach to Key-Finding. In C. Anagnostopoulou, M. Ferrand & A. Smaill (Hrsg.), *Music and Artificial Intelligence* (S. 195–206). Springer Berlin Heidelberg.

Software

- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Ukolov, D. (2022). midiAuralizer. <https://github.com/modavis-project/midiAuralizer>
- Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- Wirt, M. C. (2018). MIDIUtil. <https://github.com/MarkCWirt/MIDIUtil>

Online

- Chase, S. (o.d.). *Antique Music for A Modern World*. Zugriff 2. August 2022 unter http://www.spencerserolls.com/index_old.html
- Focht, J. (Hrsg.). (2022a). *MusiXplora*. Zugriff 27. August 2022 unter <https://musixplora.de/mxp/2003520>
- Focht, J. (Hrsg.). (2022b). *MusiXplora*. Zugriff 27. August 2022 unter <https://musixplora.de/mxp/2002522>
- Focht, J. (Hrsg.). (2022c). *MusiXplora*. Zugriff 27. August 2022 unter <https://musixplora.de/mxp/2002548>
- Stahnke, W. (1996). *Scanning Recordo Rolls*. Zugriff 2. August 2022 unter <https://www.mmdigest.com/Archives/Digests/199603/1996.03.02.02.html>
- Stephens, P. (o.d.). *Phillips Ampico-Apple system*. Zugriff 2. August 2022 unter <https://www.petersmidi.com/photos.html>
- Zappalà, P. (2021). *CONVERSION OF A PLAYER PIANO ROLL TO MIDI* [Video]. Zugriff 20. Juni 2022 unter <https://www.youtube.com/watch?v=z64sXUeTLHo>

Erklärung der Urheberschaft

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche wissentlich verwendete Textauschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Leipzig, 31.08.2022

Ort, Datum

Unterschrift