

FMP Notebooks

Interaktives Lehren und Lernen der Digitalen Musikverarbeitung

Meinard Müller,¹ Frank Zalkow²

Abstract: Die meisten Menschen haben einen intuitiven Zugang zur Musik. Daher sind viele Aufgabenstellungen der digitalen Musikverarbeitung hervorragend geeignet, um abstrakte Konzepte in Gebieten wie der Signalverarbeitung, Mustererkennung oder Zeitreihenanalyse zu motivieren und in einer konkreten Anwendung einzusetzen. In diesem Beitrag stellen wir eine neuartige Sammlung von webbasiertem Multimediainhalt für das interaktive Studium und die Umsetzung eigener Projekte vor. Das als FMP Notebooks bezeichnete Multimediapaket basiert auf dem Lehrbuch *Fundamentals of Music Processing* (FMP) und erweitert traditionelles Lehrmaterial durch die Verknüpfung mit multimedialen Inhalten und Möglichkeiten der Online-Interaktion. Insbesondere kommen hierbei auf Python basierende interaktive Jupyter Notebooks zum Einsatz, die den Studierenden helfen, theoretische Konzepte nicht nur passiv nachzuvollziehen, sondern die gelernte Theorie auch aktiv in der Praxis einzusetzen. Die FMP Notebooks sind für Lehre und Forschung auf der Webseite <https://www.audiolabs-erlangen.de/FMP> frei verfügbar (CC BY-NC-SA 4.0).

Keywords: Musikverarbeitung; Music Information Retrieval; Audioverarbeitung; Python; Jupyter Notebook

Frei verfügbar Materialien zu den FMP Notebooks:

- FMP Notebooks: <https://www.audiolabs-erlangen.de/FMP>
- Educational Guide: [Mü21a]: <https://www.mdpi.com/2624-6120/2/2/18>
- Lehrbuch *Fundamentals of Music Processing* (FMP) [Mü21b]: www.music-processing.de
- Python-Paket `libfmp` [MZ21]: <https://github.com/meinardmueller/libfmp>

1 Musik trifft Informatik

Musik ist ein allgegenwärtiger und wichtiger Bestandteil unseres Lebens. Aufgrund des Angebots digitaler Musikdienste wie Spotify, Pandora und iTunes sind wir heute mehr denn je von Musik umgeben und interagieren mit ihr auf vielfältige Weise. Angesichts der explosionsartigen Zunahme digitaler Inhalte werden verstärkt computerbasierte Werkzeuge und Methoden zum Auffinden, Organisieren, Analysieren und Modifizieren von Musikdaten benötigt. Aus dieser Notwendigkeit heraus hat sich das neuartige Forschungsgebiet der digitalen Musikverarbeitung entwickelt, das im Englischen auch als *Music Information*

¹ International Audio Laboratories Erlangen, meinard.mueller@audiolabs-erlangen.de

² International Audio Laboratories Erlangen, frank.zalkow@audiolabs-erlangen.de

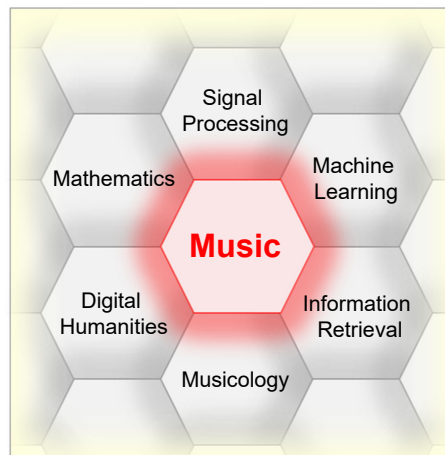


Abb. 1: Interdisziplinärer Bezug der Digitalen Musikverarbeitung.

*Retrieval*³ (MIR) bekannt ist. In ihren Anfängen hat die MIR-Forschung viele Ideen und Konzepte aus etablierten Disziplinen wie der Sprachverarbeitung oder der Computerlinguistik übernommen. Nach mehr als zwanzig Jahren ist MIR zu einem eigenständigen und interdisziplinären Forschungsgebiet gereift, das in engem Bezug mit unterschiedlichen Disziplinen wie der Informatik, den Ingenieurwissenschaften, der Signalverarbeitung, den Musikwissenschaften und den Digital Humanities steht (siehe Abbildung 1).

Dank der Vielfältigkeit und Komplexität von Musik gibt es viele Aufgabenstellungen der digitalen Musikverarbeitung, die als motivierende Szenarien für die Einführung, Erläuterung und das Studium von Techniken der Digitalen Signalverarbeitung, des Information Retrieval oder des Maschinellen Lernens dienen können. Zum Beispiel sind bei der Suche in heterogenen Musikdatenbeständen ganz unterschiedliche Modalitäten und Datentypen wie Partituren (Bilddaten) und Musikaufnahmen (Audiodateien) zu berücksichtigen. Zur Verarbeitung solcher Daten kommen Methoden der Bildverarbeitung, der Audioverarbeitung, und der Mustererkennung zum Einsatz. Für die Tempobestimmung benötigt man Verfahren zur Bestimmung von zeitlich, sich periodisch wiederholenden rhythmischen Mustern. Die Zerlegung von Musikaufnahmen in isolierte Instrumental- und Gesangsspuren (eine Problemstellung die allgemein hin als Quellentrennung bekannt ist) wird in den letzten Jahren insbesondere mittels Techniken des Deep Learning bewerkstelligt. Im Bereich der Audioidentifikation kommen effiziente Indexierungsverfahren zum Einsatz. Das Lehrbuch *Fundamentals of Music Processing* (FMP) [Mü21b] gibt einen umfangreichen Einblick in das Gebiet der digitalen Musikverarbeitung und vermittelt dabei allgemeine Grundlagen der Informatik und Signalverarbeitung in Theorie und Praxis. Die FMP Notebooks verknüpft

³ Hinter der Forschungsrichtung steht eine gemeinnützige Organisation, die International Society for Music Information Retrieval (ISMIR), siehe <https://ismir.net/>.

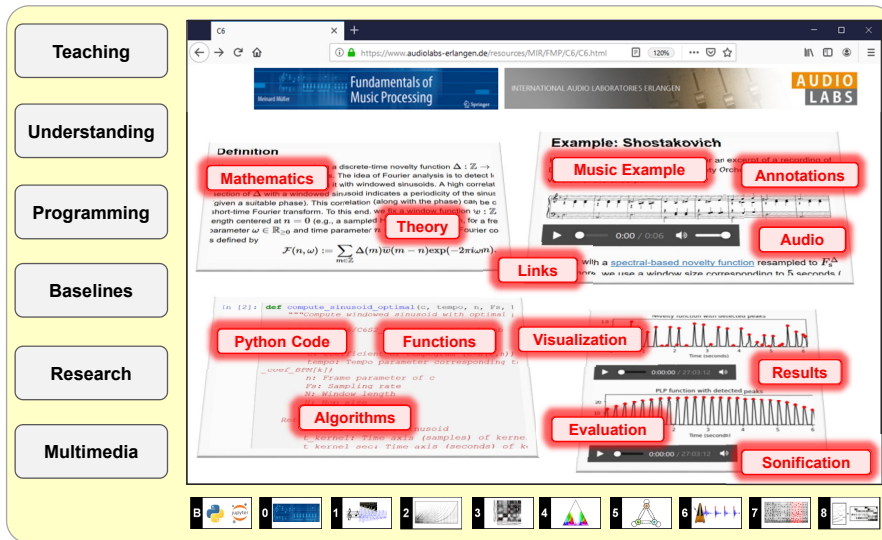


Abb. 2: Komponenten und didaktische Aspekte der FMP Notebooks.

und erweitert das Lehrbuch mit Online-Interaktion und E-Learning durch den Einsatz innovativer und neuartiger multimedialer Werkzeuge [Mü21a; MZ19]. Hierauf gehen wir in den folgenden Abschnitten näher ein.

2 Jupyter Notebooks

In den letzten Jahren haben frei zugängliche Softwarepakete und webbasierte Frameworks die Ausbildung in der Informatik und den Ingenieurwissenschaften interaktiver gemacht. Der Einsatz solch neuartiger Technologien ermöglicht die Gestaltung von Kursen, die den Studierenden helfen, theoretische Konzepte nicht nur passiv nachzuvollziehen, sondern die gelernte Theorie auch aktiv in der Praxis einzusetzen. Die Motivation für die Entwicklung der FMP Notebooks ist, ein solches interaktives Lehren und Lernen der digitalen Musikverarbeitung zu unterstützen. Die FMP Notebooks basieren auf dem Open-Source Jupyter-Framework, das im Bildungsbereich vieler technischer Disziplinen zum Standard geworden ist [K116]. Mittels dieser umfassenden Webanwendung können Benutzer Dokumente erstellen, die lauffähigen Code, textbasierte Informationen, mathematische Formeln, Bilder, Klangbeispiele und Videos enthalten. Durch die Nutzung des Jupyter-Frameworks schließen die FMP Notebooks die Lücke zwischen Theorie und Praxis. Hierbei werden technische Konzepte und mathematische Details mit Codebeispielen, Illustrationen und Musikbeispielen unter Berücksichtigung didaktischer Aspekte verschachtelt (siehe Abbildung 2).






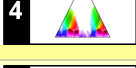
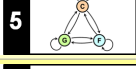

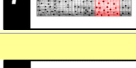
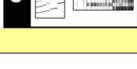
Part	Title	Notions, Techniques & Algorithms	HTML	IPYNB
	Basics	Basic information on Python, Jupyter notebooks, Anaconda package management system, Python environments, visualizations, and other topics	[html]	[ipynb]
	Overview	Overview of the notebooks (https://www.audiolabs-erlangen.de/FMP)	[html]	[ipynb]
	Music Representations	Music notation, MIDI, audio signal, waveform, pitch, loudness, timbre	[html]	[ipynb]
	Fourier Analysis of Signals	Discrete/analog signal, sinusoid, exponential, Fourier transform, Fourier representation, DFT, FFT, STFT	[html]	[ipynb]
	Music Synchronization	Chroma feature, dynamic programming, dynamic time warping (DTW), alignment, user interface	[html]	[ipynb]
	Music Structure Analysis	Similarity matrix, repetition, thumbnail, homogeneity, novelty, evaluation, precision, recall, F-measure, visualization, scape plot	[html]	[ipynb]
	Chord Recognition	Harmony, music theory, chords, scales, templates, hidden Markov model (HMM), evaluation	[html]	[ipynb]
	Tempo and Beat Tracking	Onset, novelty, tempo, tempogram, beat, periodicity, Fourier analysis, autocorrelation	[html]	[ipynb]
	Content-Based Audio Retrieval	Identification, fingerprint, indexing, inverted list, matching, version, cover song	[html]	[ipynb]
	Musically Informed Audio Decomposition	Harmonic/percussive separation, signal reconstruction, instantaneous frequency, fundamental frequency (F0), trajectory, nonnegative matrix factorization (NMF)	[html]	[ipynb]

Abb. 3: Inhaltlicher Überblick über die FMP Notebooks.

3 Struktur und Inhalte der FMP Notebooks

Die FMP Notebooks sind eine Sammlung bestehend aus mehr als 100 individuellen Notebooks, die in zehn Teile gegliedert sind (siehe Tabelle in Abbildung 3 für einen Überblick). **Teil 0** ist die Startseite der FMP Notebooks. Neben einem Überblick, der auch obige Tabelle als navigierbares Inhaltsverzeichnis enthält, spezifiziert diese Startseite auch die Lizenz (Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License) und stellt die wichtigsten Mitwirkenden bei der Erstellung der FMP Notebooks vor.

Die Notebooks von **Teil B** dienen unterschiedlichen Zwecken. Erstens beschreiben diese Notebooks die wichtigsten Werkzeuge, die für die Entwicklung der FMP Notebooks verwendet wurden, und dienen damit auch der Dokumentation. Zweitens geben sie kurze Einführungen in grundlegende technische Konzepte, die für die Installation und Verwendung von Jupyter und Python notwendig sind. Drittens findet man in **Teil B** zahlreiche Beispiele für die Erzeugung und Integration von Multimedia-Objekten (Text, Bilder, Audio, Video). Hierbei werden auch allgemeine Aspekte der Programmierung diskutiert, die in den anderen Teilen relevant werden.

Die restlichen acht Teile der FMP Notebooks orientieren sich eng an den acht Kapiteln des Lehrbuchs von Müller [Mü21b], das zentrale MIR-Themen wie Musikdarstellungen, Fourieranalyse, Musiksynchronisation, Strukturanalyse, Akkorderkennung, Beat-Tracking, Musiksuche und Audiozerlegung behandelt. Jeder der acht Teile besteht wiederum aus einer Übersichtsseite, die auf circa 10 bis 15 Notebooks verweist. Diese Notebooks enthalten Einführungen zu den jeweiligen MIR-Fragestellungen, geben zentrale mathematische Definitionen und beschreiben die algorithmischen Verfahren im Detail. Ein Hauptzweck der FMP Notebooks besteht darin, für diese Verfahren leicht verständliche Referenzimplementationen bereitzustellen. Diese werden dann anschließend auf konkrete und gut nachvollziehbare Musikbeispiele angewendet. Weiterhin kann die Benutzerin oder der Benutzer die Verfahren auf eigene Beispiele anwenden, mit Parametern experimentieren und die berechneten Ergebnisse durch geeignete Visualisierungen und Sonifikationen erfahrbar machen und damit besser verstehen. Diese Vorgehensweise ermöglicht auch die Generierung von Abbildungen und Illustrationen, die in Vorträgen und wissenschaftlichen Artikeln verwendet werden können. Auf diese Weise ergänzen die FMP Notebooks das eher theoretisch ausgerichtete Lehrbuch [Mü21b] und gehen darüber hinaus. Im folgenden gehen wir kurz auf die wesentlichen Inhalte der acht Teile ein.

In **Teil 1** (Music Representations) behandeln wir drei gängige Musikdarstellungen basierend auf Noten (graphische Darstellung), symbolischen Formaten und Wellenformen (Audio). Neben der Einführung der grundlegenden Terminologie, die in den folgenden FMP Notebooks verwendet wird, stellen wir Python-Code zur Verfügung, um musikalische und akustische Eigenschaften von Audiosignalen, einschließlich Aspekten wie Frequenz, Tonhöhe, Dynamik und Klangfarbe, erfahrbar und nachvollziehbar zu machen. So gibt es beispielsweise Python-Funktionen zum Vergleich verschiedener Stimmsysteme (gleichtemperierte, pythagoräische, harmonische Reihen) und zur Erzeugung von Shepard-Tönen.

In **Teil 2** (Fourier Analysis of Signals) nähern wir uns der Fourier-Transformation aus verschiedenen Perspektiven an. Wir stellen Code bereit, um komplexe Zahlen und Exponentialfunktionen und deren mathematische Eigenschaften besser zu verstehen. Diese bilden dann die Grundlage für die diskrete Fourier-Transformation (DFT) und die schnelle Fourier-Transformation (FFT) – ein Algorithmus von großer mathematischer Eleganz und praktischer Relevanz. Als weiteres wichtiges Thema diskutieren wir die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT). In diesem Zusammenhang behandeln wir auch Aspekte wie

Sampling, Padding und Achsenkonventionen – Themen, die in der Theorie oft vernachlässigt, in der Praxis aber sehr wichtig werden.

In **Teil 3** (Music Synchronization) diskutieren wir Verfahren zum zeitlichen Abgleich von verschiedenen Versionen desselben zugrunde liegenden Musikstücks (z. B. unterschiedliche Interpretationen von Beethovens Fünfter Symphonie). Hierbei werden die Versionen in Merkmalsfolgen (sogenannte Chromagramme) transformiert, die harmonische und melodische Eigenschaften über den zeitlichen Verlauf hinweg erfassen, aber robust gegen klangfarbliche Änderungen sind. In diesem Zusammenhang befassen wir uns auch mit Fragen von hoher praktischer Relevanz wie Stimmung von Instrumenten, logarithmische Kompression sowie spektrale und zeitliche Auflösung – Aspekte, die einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Merkmale haben. Weiterhin führen wir die Technik des *Dynamic Time Warping* (DTW) ein, die für die Analyse und Alignierung allgemeiner Zeitreihen anwendbar ist.

In **Teil 4** (Music Structure Analysis) behandeln wir ein zentrales MIR-Themengebiet, bei dem es um die Segmentierung von Musikaufnahme hinsichtlich charakteristischer Strukturelemente geht. In diesem Kontext diskutieren wir grundlegende Segmentierungsprinzipien auf der Grundlage von Wiederholungen, Homogenität und Neuigkeit (Novelty). In den Notebooks stellen wir nicht nur Implementierungen unterschiedlicher Segmentierungsverfahren bereit (z. B. Novelty-Detection und Audio-Thumbnailing), sondern auch Code zur hierarchischen Visualisierung von Musikstrukturen (z. B. mittels Scape-Plots). Schließlich berühren wir kurz das Thema der Evaluation von Algorithmen und führen die Begriffe wie Precision, Recall und F-Measure ein. Diese Maßzahlen werden verwendet, um die berechneten Ergebnisse, die durch ein automatisiertes Verfahren erhalten werden, mit Referenzannotationen (Ground-Truth) zu vergleichen, die typischerweise von einem Domänenexperten manuell generiert werden.

In **Teil 5** (Chord Recognition) geht es um die Analyse harmonischer Eigenschaften eines Musikstücks, insbesondere der Bestimmung einer expliziten Akkordfolge für eine gegebene Audioaufnahme. Die Notebooks erklären zunächst musikalische Konzepte wie Intervalle, Akkorde und Tonleitern anhand audiovisueller Darstellungen. Nach der Einführung eines einfachen Akkorderkennungsverfahrens basierend auf einem Template-basierten Vergleichsverfahren, wird ein erweitertes Verfahren basierend auf Hidden-Markov-Modellen (HMMs) vorgestellt. Neben algorithmischen Aspekten und deren Implementierung dient das Akkorderkennungsszenario dazu, die Bedeutung von Entscheidungen beim Entwurf von Audiomerkmalen und die Wechselwirkung zeitlicher und spektraler Glättungs- und Verarbeitungsstrategien herauszuarbeiten.

In **Teil 6** (Tempo and Beat Tracking) werden Tempo und Beat als grundlegende Eigenschaften von Musikaufnahmen analysiert. Die Notebooks behandeln zunächst energie- und spektralbasierte Verfahren zur Detektion von Noteneinsatzzeiten (Onsets) in Musiksignalen. Um Tempo- und Beat-Informationen abzuleiten, werden Noten-Einsatzkandidaten hinsichtlich quasiperiodischer Muster analysiert. Dieser zweite Schritt führt uns zum Studium

allgemeiner Methoden zur lokalen Periodizitätsanalyse von Zeitreihen. Insbesondere stellen wir zwei konzeptionell unterschiedliche Methoden – basierend auf Fourieranalyse und Autokorrelation – vor.

In **Teil 7** (Content-Based Audio Retrieval) besprechen wir unterschiedliche Suchstrategien für Musikaufnahme, die auf dem Paradigma *Query-by-Example* basieren. Bei der Audio-identifikation soll eine Musikaufnahme anhand eines kurzen, nur aus wenigen Sekunden bestehenden Audioclips identifiziert werden. Wir stellen hierzu ein auf spektralen Peaks basierendes Suchverfahren vor, das auch in kommerziellen Anwendungen wie Shazam⁴ zum Einsatz kommt. In weiterführenden Suchaufgaben geht es dann um Versionsidentifizierung, bei der auch andere Versionen wie z. B. Cover-Songs oder Arrangements gefunden werden sollen. Neben der Bereitstellung von Code für Basissysteme sollen die Notebooks ein grundlegendes Verständnis der praktischen Anforderungen für die verschiedenen Retrieval-Aufgaben vermitteln.

In **Teil 8** (Musically Informed Audio Decomposition) widmen wir uns drei Aufgabenstellungen, die dem allgemeinen Themengebiet der Quellentrennung zugeordnet werden können: harmonisch-perkussive Zerlegung, Extraktion der Hauptmelodie und Notentext-informierte Audiozerlegung. Innerhalb dieser Szenarien bieten die Notebooks detaillierte Erklärungen und Implementierungen grundlegender Techniken wie Momentanfrequenzschätzung, Grundfrequenzschätzung (F0), Inversion von Spektrogrammdarstellungen und nicht-negative Matrixfaktorisierung (NMF). Diese Techniken sind für eine Vielzahl von Verarbeitungsschritten von allgemeinen Multimediadaten nützlich, die über die Quellentrennung und Musikverarbeitung hinausgehen.

4 Weitere Hinweise

Die meisten Menschen haben einen intuitiven Zugang zur Musik. Daher sind viele MIR-Aufgabenstellungen, wie bereits zuvor erwähnt, hervorragend geeignet, um abstrakte Konzepte der Signalverarbeitung, Mustererkennung oder Zeitreihenanalyse in einer konkreten Anwendung einzusetzen und damit besser zu verstehen [MMK21]. Weiterhin hat die zunehmende Verfügbarkeit von geeigneten Software-Toolboxen und webbasierten Frameworks nicht nur die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen vereinfacht, sondern auch die Ausbildung in der Informatik und anderen technischen Disziplinen erheblich verbessert [Mc19]. Seit ihren Anfängen vor mehr als zwanzig Jahren hat die MIR-Community zu solchen Open-Source-Entwicklungen mit unterschiedlichen Toolboxen beigetragen, welche modularen Quellcode für die Verarbeitung und Analyse von Musiksignalen bereitstellen.

⁴ <https://www.shazam.com/>

Prominente Beispiele sind `essentia`⁵ [Bo13], `madmom`⁶ [Bö16], `Marsyas`⁷ [Tz09], oder die `MIRtoolbox`⁸ [LT07].

Diese Toolboxes sind hauptsächlich für einen forschungsorientierten Zugang zur Audio- und Musikverarbeitung konzipiert und stellen eine breite Palette von Funktionalitäten für die Extraktion von semantischen Merkmalen zur Verfügung. Das Python-Paket `librosa` [Mc15] geht darüber hinaus, indem es modularen und didaktisch aufgearbeiteten Code für ganze MIR-Pipelines anbietet. Die FMP Notebooks greifen diesen Ansatz auf und erweitern `librosa`, indem Code und Implementierungen mit Lehrbuchelementen verquickt werden, um dadurch das Verständnis von MIR-Konzepten zu fördern. Anstelle von kompaktem und möglichst effizientem Code ist der Programmierstil der FMP Notebooks daher eher einfach und explizit gehalten – mit einer flachen funktionalen Hierarchie (auch auf Kosten einer gewissen Redundanz). Die mathematische Notation und die Namenskonventionen der FMP Notebooks sind sorgfältig aufeinander abgestimmt, um einen engen Bezug zwischen Theorie und Praxis herzustellen. Zusammenfassend sind pädagogische und didaktische Überlegungen der Hauptleitfaden bei der Entwicklung der FMP Notebooks. Daher hoffen wir, dass diese Notebooks bestehende Open-Source-Toolboxes gut ergänzen und Bildung sowie Forschung im Bereich der digitalen Musikverarbeitung und Informatik fördern.

Bei der Entwicklung von Lernenden zu Forschenden sollten Studierende über die Anwendung der FMP Notebooks hinauswachsen und ihre eigenen Methoden für die Musikverarbeitung entwickeln [MMK21]. Das Python-Paket `librosa` [Mc15] ist geeignet, um Studierende bei diesem Übergang zu unterstützen, da es die richtige Softwareunterstützung für das Erstellen und Experimentieren mit komplexen MIR-Pipelines bietet. Hiervon inspiriert wurde in einem ähnlichen Stil das Python-Paket `libfmp` [MZ21] entwickelt. Während die FMP Notebooks schrittweise in grundlegende MIR-Konzepte einführen, bündelt das `libfmp`-Paket die vorgestellten Kernkonzepte in Form einer gut dokumentierten und einfach zu bedienenden Python-Bibliothek. Zum einen integriert `libfmp` das `librosa`-Paket und baut auf diesem auf. Zum anderen stellt `libfmp` auch zum ersten Mal verschiedene Referenzimplementierungen von zuvor in der Forschungsliteratur veröffentlichten MIR-Methoden bereit, die von `librosa` und anderen öffentlich verfügbarer Python-Paketen noch nicht abgedeckt wurden.

Wir wollen abschließend erwähnen, dass der Code von `libfmp` in einem GitHub-Repository⁹ unter einer MIT-Lizenz öffentlich verfügbar ist. Neben den als Jupyter Notebooks und HTML-Export¹⁰ verfügbaren FMP Notebooks, in denen man didaktisch aufgearbeitet Erklärungen fast aller `libfmp`-Funktionen findet, wurde auch eine für Entwickler übliche API-Dokumentation¹¹ erstellt. Weiterhin wurde das `libfmp`-Paket in dem Python-Paketindex

⁵ <https://essentia.upf.edu>

⁶ <https://madmom.readthedocs.io/>

⁷ <http://marsyas.info/>

⁸ <https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials/mirtoolbox>

⁹ <https://github.com/meinardmueller/libfmp>

¹⁰ <https://www.audiolabs-erlangen.de/FMP>

¹¹ <https://meinardmueller.github.io/libfmp>

PyPi aufgenommen, sodass `libfmp` mit dem Standard-Python-Paketmanager `pip` installiert werden kann.

5 Danksagung

Die FMP Notebooks bauen auf Ergebnissen, Materialien und Erkenntnissen auf, die in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Personen gewonnen wurden. Wir möchten unseren Dank an ehemalige und aktuelle Studierende, Kolleginnen und Kollegen aussprechen, die uns bei der Erstellung der FMP Notebooks unterstützt haben, einschließlich Vlora Arifi-Müller, Stefan Balke, Michael Krause, Brian McFee, Sebastian Rosenzweig, Fabian-Robert Stöter, Steve Tjoa, Angel Villar-Corrales, Christof Weiß und Tim Zunner. Außerdem danken wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung über die letzten zehn Jahre, ohne die eine Grundlagenforschung in der digitalen Musikverarbeitung kaum möglich wäre. Schließlich danken wir für die Unterstützung durch die International Audio Laboratories Erlangen – einer gemeinsamen Einrichtung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und des Fraunhofer Instituts für Integrierte Schaltungen IIS.

Literatur

- [Bo13] Bogdanov, D.; Wack, N.; Gómez, E.; Gulati, S.; Herrera, P.; Mayor, O.; Roma, G.; Salamon, J.; Zapata, J. R.; Serra, X.: *Essentia: An Audio Analysis Library for Music Information Retrieval*. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Curitiba, Brazil, S. 493–498, 2013.
- [Bö16] Böck, S.; Korzeniowski, F.; Schlüter, J.; Krebs, F.; Widmer, G.: *madmom: A New Python Audio and Music Signal Processing Library*. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia (ACM-MM)*. Amsterdam, The Netherlands, S. 1174–1178, 2016.
- [Kl16] Kluyver, T.; Ragan-Kelley, B.; Pérez, F.; Granger, B.; Bussonnier, M.; Frederic, J.; Kelley, K.; Hamrick, J.; Grout, J.; Corlay, S.; Ivanov, P.; Avila, D.; Abdalla, S.; Willing, C.; development team, J.: *Jupyter Notebooks—a publishing format for reproducible computational workflows*. In: *Proceedings of the International Conference on Electronic Publishing*. Göttingen, Germany, S. 87–90, 2016.
- [LT07] Lartillot, O.; Toiviainen, P.: *MIR in MATLAB (II): A Toolbox for Musical Feature Extraction from Audio*. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Vienna, Austria, S. 127–130, 2007.
- [Mc15] McFee, B.; Raffel, C.; Liang, D.; Ellis, D. P.; McVicar, M.; Battenberg, E.; Nieto, O.: *Librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python*. In: *Proceedings the Python Science Conference*. Austin, Texas, USA, S. 18–25, 2015.

- [Mc19] McFee, B.; Kim, J. W.; Cartwright, M.; Salamon, J.; Bittner, R. M.; Bello, J. P.: Open-Source Practices for Music Signal Processing Research: Recommendations for Transparent, Sustainable, and Reproducible Audio Research. *IEEE Signal Processing Magazine* 36/1, S. 128–137, 2019.
- [MMK21] Müller, M.; McFee, B.; Kinnaird, K.: Interactive Learning of Signal Processing Through Music: Making Fourier Analysis Concrete for Students. *IEEE Signal Processing Magazine* 38/3, S. 73–84, 2021.
- [Mü21a] Müller, M.: An Educational Guide Through the FMP Notebooks for Teaching and Learning Fundamentals of Music Processing. *Signals* 2/2, S. 245–285, 2021.
- [Mü21b] Müller, M.: *Fundamentals of Music Processing – Using Python and Jupyter Notebooks*. Springer Verlag, 2021.
- [MZ19] Müller, M.; Zalkow, F.: FMP Notebooks: Educational Material for Teaching and Learning Fundamentals of Music Processing. In: *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*. Delft, The Netherlands, S. 573–580, 2019.
- [MZ21] Müller, M.; Zalkow, F.: libfmp: A Python Package for Fundamentals of Music Processing. *Journal of Open Source Software (JOSS)* 6/63, 3326:1–5, 2021.
- [Tz09] Tzanetakis, G.: Music analysis, retrieval and synthesis of audio signals MAR-SYAS. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia (ACM-MM)*. Vancouver, British Columbia, Canada, S. 931–932, 2009.