

Auswirkung Künstlicher Intelligenz auf Mastering Services

White Paper | Autor: Jona Eisele (je055)
Hochschule der Medien Stuttgart | Wintersemester 2019/20
Aktuelle Themen (AM3) | Prof. Dr. Andreas Koch

ABSTRACT

Online Mastering Services wie LANDR oder eMastered erfahren eine zunehmende Popularität und stellen herkömmliche Mastering-Strukturen in Frage. Das automatisierte Audio-Mastering wurde durch die Anwendung Künstlicher Intelligenz möglich, wobei das Audio Processing mithilfe von Machine-Learning-Algorithmen und Big-Data-Technologien stattfindet. Dieses White Paper beleuchtet die Funktionsweise der kostengünstigen Online Services und stellt resultierende Veränderungen der Mastering-Strukturen dar. Darüber hinaus findet eine Evaluation aktueller Angebote statt, die zuletzt einen Zukunftsausblick und eine Prognose zur Disruptivität der neuen Technologien erlaubt.

1 Einführung

Mastering oder Audio-Mastering bezeichnet den letzten Schritt in der Audio-Postproduktion von Musik. Dabei wird der letzte Schliff an einem Songtitel vor der Distribution, herkömmlicherweise von einem Mastering Engineer, vorgenommen. Die Ziele sind ein ausgewogener Frequenzgang, die Optimierung des Dynamikumfangs und Stereobildes, das Anheben der Lautheit auf ein kommerzielles Niveau und ein konsistenter Klang für alle relevanten Plattformen und Kanäle. [1]

Die Anwendung Künstlicher Intelligenz (KI) hat seit einigen Jahren auch im Bereich des Audio-Masterings beachtliche Erfolge erzielt. Cloudbasierte Online-Dienste bieten automatisiertes Mastering an, wobei der Mixdown eines Songtitels (das ungemasterte Summensignal) über eine Website hochgeladen wird und das Master bereits nach kurzem Processing heruntergeladen

werden kann. [2] Je nach Anbieter sind zudem begrenzte Einstellungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des Klangs möglich. Die Online-Angebote sind insbesondere daher attraktiv, da sie wesentlich günstiger als menschliche Mastering Engineers sind (vgl. Kapitel 4). Über LANDR, einen der populärsten Anbieter, wurden nach Unternehmensangaben seit 2014 mehr als 12 Millionen Tracks gemastert. Zu den Kunden gehörten bereits Major Labels wie Warner Music und Interscope Records. [3][4] LANDR bietet zudem die direkte Online-Distribution der gemasterten Songtitel an.

2 Herkömmliches Mastering

Im herkömmlichen Sinne wird das Audio-Mastering von einem Mastering Engineer, der vom Label oder vom Künstler selbst beauftragt wird, umgesetzt. Für die Signalverarbeitung kann der Mastering Engineer auf

unterschiedliche analoge und digitale Effektgeräte und Signalprozessoren zurückgreifen. Die Auswahl der benötigten Geräte und Plug-Ins findet meist individuell für jeden Songtitel statt und hängt von der Produktion des Mixdowns und vom gewünschten Klang des Endproduktes ab. [7]

Einige relevante Effektgeräte werden nachfolgend kurz vorgestellt. Wichtig ist hierbei auch die Reihenfolge bzw. Anordnung der einzelnen Effektgeräte und Signalprozessoren. Diese wird als Processing Chain oder Signal Chain bezeichnet. [8] [9]

Um einen ausgewogenen Frequenzgang zu erreichen, wird meist auf Equalizer zurückgegriffen. Damit können einzelne Frequenzbereiche beliebig angehoben oder abgesenkt werden. Um den Klang anzureichern oder zu sättigen kann zusätzlich Saturation eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um eine Verzerrung, wobei dem Audiosignal harmonische Oberschwingungen hinzugefügt werden, um das Klangbild zu ergänzen. Das Stereobild kann durch Stereo Imager bearbeitet werden, um beispielsweise ein breiteres Klangbild zu erreichen. Der Dynamikbereich wird durch Kompressoren oder, um einzelne Frequenzbänder unabhängig zu komprimieren, durch Multiband-Kompressoren reguliert. An letzter Stelle in der Processing Chain steht in der Regel ein Limiter. Damit kann die Lautheit des Songtitels erhöht werden. [11]

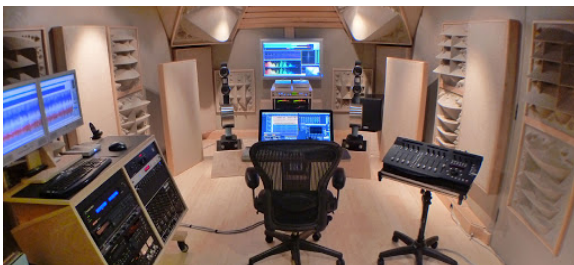


Abbildung 1: Skylab Mastering Studio. Quelle: <http://skylabstudios.com/mastering-sub-title/> (Zugriff: 18.02.2020)

In einem professionellen Mastering-Studio sind optimierte Abhörbedingungen unabhängig. Daher arbeiten Mastering

Engineers meist in Studios, die raumakustisch optimiert wurden. Es soll sichergestellt werden, dass die Klangwahrnehmung nicht durch den Raumklang verzerrt wird. [12]

Abbildung 1 zeigt das Skylab Mastering Studio in Florida. Es sind diverse Absorber und Diffusoren zu sehen, die der raumakustischen Optimierung dienen.

Bei dem Prozess des Masterings ist die Kommunikation zwischen Künstler oder Label und Mastering Engineer ein wichtiger Aspekt. Einerseits geben erstere die gewünschten Klangeigenschaften vor, andererseits kann der Mastering Engineer Feedback zum Mixdown geben. Es kann hilfreich sein, wenn der Mixing Engineer bestimmte Probleme im Mixdown noch vor dem Mastering-Prozess behebt. Nach dem Mastering kann der Kunde rückmelden, ob das Ergebnis den Vorstellungen entspricht, oder ob eine Nachbearbeitung gewünscht wird. [8]

3 Automatisierte Mastering Services

Automatisierte Mastering Services sind cloubasierte Online-Dienste, die automatisiertes Mastering durch die Anwendung Künstlicher Intelligenz anbieten. Der Begriff der Künstlichen Intelligenz ist allgemein nicht eindeutig abgrenzbar und soll in diesem Zusammenhang die Anwendung von Machine-Learning-Algorithmen in Kombination mit Big-Data-Technologien und Digital Signal Processing beschreiben.

Nachfolgend wird beschrieben, wie automatisiertes Mastering durch Künstliche Intelligenz realisiert werden kann. Hierbei sei anzumerken, dass die verschiedenen Anbieter sehr wenige Informationen zur konkreten Funktionsweise ihrer Algorithmen angeben und diese daher jeweils abweichen können. Üblicherweise kann der Nutzer automatisierter Mastering Services den Mixdown über ein Webinterface auf den Server des Anbieters hochladen. Daraufhin findet eine algorithmische Analyse des Audiomaterials statt und es ergibt sich die Einordnung des Audiomaterials in eine Musikstil-Kategorie.

Darauf basierend wird die Processing Chain für das Mastering gewählt. Der Nutzer hat je nach Anbieter nach dem Upload begrenzte Einstellmöglichkeiten, um den gewünschten Klang des Masterings zu beeinflussen (vgl. Kapitel 4). Anschließend lernt ein Machine-Learning-Algorithmus die einzelnen Parameter für die jeweiligen Signalprozessoren in der Processing Chain. [13] Die nachfolgende Abbildung soll einen Überblick über die Funktionsweise geben.

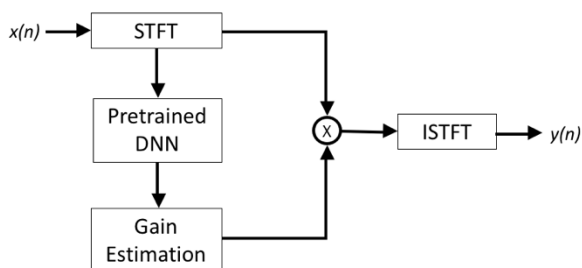


Abbildung 2: Vereinfachte Architektur einer automatisierten Mastering-Anwendung. Quelle: Eigene Darstellung nach [1]

Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Beispielarchitektur für eine automatisierte Mastering-Anwendung. Die Eingabe ist der Mixdown in Form eines digitalen Audiosignals $x(n)$ mit der diskreten Anzahl von n Samples. Das Audiosignal wird zunächst durch eine Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. short-time Fourier transform, kurz *STFT*) in den Frequenzraum transformiert, wodurch die Analyse des Frequenzspektrums möglich wird. Die gewonnene Information wird in ein vortrainiertes Tiefes Neuronales Netz (engl. deep neural network, kurz *DNN*) gegeben, um geeignete Parameter für die jeweiligen Signalprozessoren in der Processing Chain zu lernen. Das DNN wird mit einer großen Anzahl an Mixdowns und dazugehörigen professionellen Masterings (Big Data) trainiert. Je größer die Menge der Trainingsdaten-Paare, desto besser ist der Lernerfolg des Algorithmus. [1]

Nachdem die Parameter für die Processing Chain gelernt wurden, wird das Signal Processing entsprechend im Frequenzraum

angewandt (in Abbildung 2: \otimes). Letztlich wird das Signal über eine inverse Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. inverse short-time Fourier transform, kurz *ISTFT*) zurück in den Zeitraum transformiert. Dies ergibt schließlich die Ausgabe bzw. das gemasterte Audiomaterial.

Das DNN kann für die Anwendung von automatisiertem Mastering auf zwei vernetzten Autoencodern basieren, die bestimmte Parameter des DNNs im Voraus lernen. [1]

Bei einem Autoencoder werden über die Transformation in eine komprimierte Repräsentation der Eingangsdaten relevante Merkmale gelernt. Da die Eingabedaten eines Autoencoders nicht klassifiziert sein müssen, spricht man von unüberwachtem Lernen. [14] [10] Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Autoencoder.

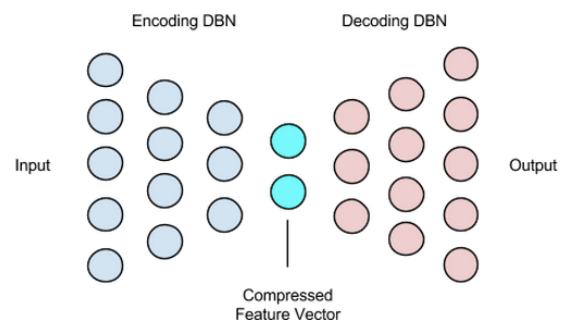


Abbildung 3: Darstellung eines Autoencoders. Quelle: <https://www.ai-united.de/deep-autoencoders> (Zugriff: 24.02.2020)

Die linke Seite eines Autoencoders wird als Encoder und die rechte Seite als Decoder bezeichnet. Encoder und Decoder sind symmetrisch angeordnet und bestehen jeweils aus mindestens einem Layer mit mehreren Neuronen. Dazwischen befindet sich die komprimierte Repräsentation der Eingabe. Dieser Layer wird auch als Bottleneck bezeichnet und ist der Layer mit den wenigsten Neuronen. Im Bottleneck sind die relevantesten Informationen bzw. Merkmale der Eingabedaten enthalten. Die Eingabe eines Autoencoders kann nach der Komprimierung im Encoder durch die gelernten Merkmale im Decoder wiederhergestellt werden.

Diese Wiederherstellung ist verlustbehaftet und entspricht einer Kompression, wobei die relevantesten Merkmale erhalten bleiben. [10]

In der beschriebenen Mastering-Anwendung entsprechen die durch die Autoencoder gelernten Merkmale bzw. Parameter den Gewichten, mit welchen das finale DNN vor dem Training mit den Trainingsdaten (überwachtes Lernen) initialisiert wird. Dadurch werden letztlich bessere Mastering-Ergebnisse erzielt, als wenn auf das vorhergehende Lernen (Pretraining) der Initial-Gewichte des DNNs verzichtet würde. Des Weiteren sollten die Trainingsprozesse jeweils in mehreren Iterationen (Epochen) durchgeführt werden. [1]

4 Vergleich der Anbieter

Mittlerweile gibt es mehrere Anbieter automatisierter Mastering Services. Die Geschäftsmodelle sind dabei meistens Abonnement- und teilweise auch Freemium-Modelle, vereinzelt kann ein Festbetrag pro gemastertem Track gezahlt werden. Bei den Freemium-Modellen ist ein kostenloses Mastering lediglich in komprimierter Audioqualität verfügbar. [15] - [19]

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Preise unterschiedlicher Online-Anbieter und Mastering Studios.

Anbieter	Preis
Online Mastering Services	
LANDR	0 – 25€/Monat
eMastered	15 – 35€/Monat
CloudBounce	4€/Track oder 16€/Monat
MajorDecibel	0 – 5€/Monat
MasteringBox	4 – 29€/Monat
Mastering Studios	
Middle Mastering	75€/Track
Peak Studios	75€/Track
HOFA-Studios	ca. 70 – 200€/Track
Abbey Road Studios	100€/Track
Sage Audio	ca. 40 – 50€/Track

Tabelle 1: Vergleich der Mastering-Angebote. Quelle: Eigene Darstellung nach [15]-[24]

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die Angebote der Online-Mastering Services wesentlich günstiger als die der Mastering Studios sind. Dabei wurden die Preise der Mastering Studios durch die Online-Angebote bereits stark gedrückt. [6] Die günstigen Preise ergeben sich aus der autarken Funktionsweise der Online-Dienste und sind deren großer Vorteil gegenüber teuren Mastering Studios. Dadurch sind sie besonders für Künstler und Produzenten mit geringem Budget attraktiv. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Einstellungsmöglichkeiten für den Klang des Masterings über das Webinterface der Anbieter LANDR und eMastered.

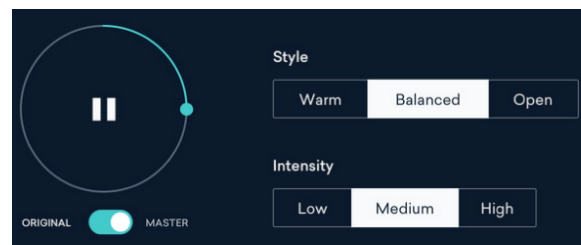


Abbildung 4: Einstellungen bei LANDR. Quelle: Screenshot.

Die Einstellungsmöglichkeiten bei LANDR sind, wie aus Abbildung 4 hervorgeht, sehr begrenzt. Es kann einerseits der „Style“ gewählt werden (Warm, Balanced oder Open) und andererseits die „Intensity“ (Low, Medium, High). Der Style „Warm“ resultiert, wie der Name impliziert, in einem wärmeren Klang. Dies kann im Processing durch die Anhebung von tiefen Frequenzbändern erreicht werden (etwa 100 – 400 Hz). Der Style „Open“ wiederum führt zu einem helleren bzw. höhenlastigeren Klang (etwa 2000 – 10 000 Hz). Eine höhere Intensity führt primär zu erhöhter Lautheit, was darauf schließen lässt, dass mehr Limiting - auf Kosten des Dynamikumfangs - eingesetzt wird. Teilweise kann dies sogar zu unerwünschten Verzerrungen führen. Die konkreten Auswirkungen im Processing durch die Einstellungsmöglichkeiten werden von LANDR nicht erklärt. Über den Button links unten kann der Klang vom Mixdown und vom Mastering verglichen werden.

Der Anbieter eMastered, der seit dem Jahr 2016 auf dem Markt ist, stellt dem Nutzer mehr Möglichkeiten zur Beeinflussung des Klangs zur Verfügung (vgl. Abbildung 5).

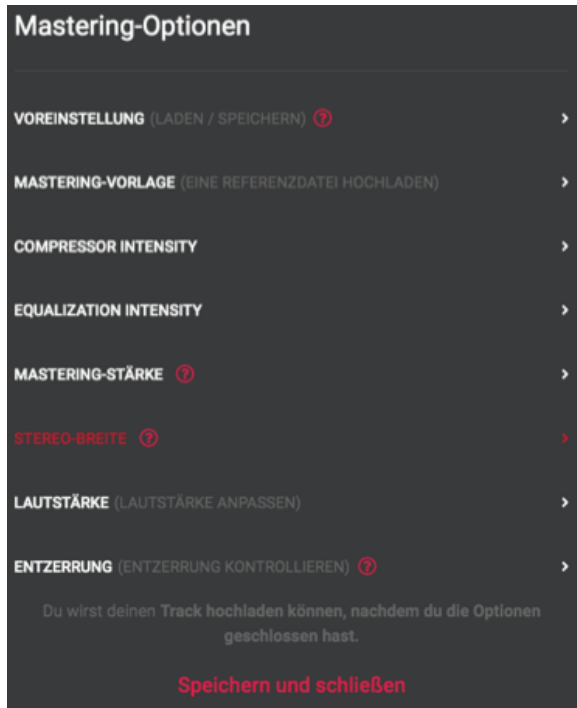


Abbildung 5: Einstellungen bei eMastered. Quelle: Screenshot

Bei eMastered kann die Intensität der Kompressoren und der Klangcharakter des Equalizers beeinflusst werden. Bei der „Mastering-Stärke“ lässt sich einstellen, wie stark das Processing insgesamt eingreifen soll. Auch die Stereo-Breite kann eingestellt werden. Die Einstellung der Lautstärke entspricht in etwa der „Intensity“ von LANDR. Auch kann der Grad der Entzerrung kritischer Frequenzbänder bestimmt werden. Die Einstellungen umfassen jeweils fünf Rasterpunkte.

Ein Vergleich der Lautheit in LUFS nach dem Mastering durch unterschiedliche Online Services wird in Abbildung 6 aufgezeigt. Die Tracks sind unterschiedlichen Musikgenres zuzuordnen und weisen unterschiedliche Instrumentierungen auf. Es wurde bei den Klang-Einstellungen der Online-Dienste jeweils der Standard-Wert eingestellt. [26]

Es sei hierbei anzumerken, dass durch die Lautheit nicht auf die Qualität des Masterings geschlossen werden kann. Eine Untersuchung der Lautheit soll an dieser Stelle lediglich die Funktionsweisen der unterschiedlichen Algorithmen beleuchten.

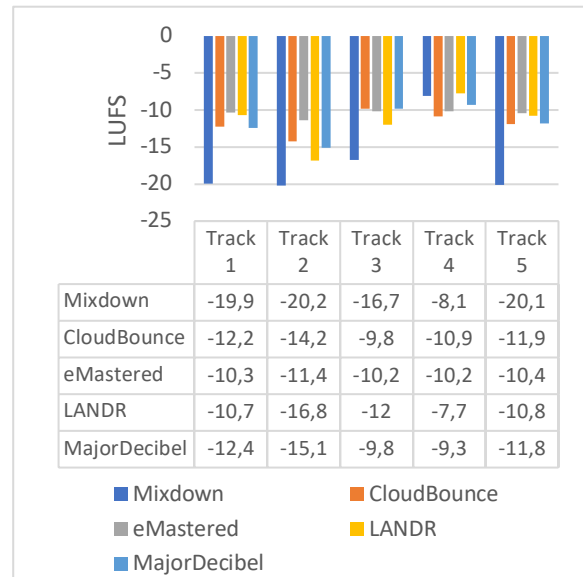


Abbildung 6: Vergleich der Lautheit unterschiedlicher Anbieter. Quelle: Eigene Darstellung nach [26]

Die unterschiedlichen Lautheits-Werte lassen darauf schließen, dass die Algorithmen der Anbieter zu unterschiedlichen Mastering-Ergebnissen führen. Die Unterschiede der Algorithmen werden auch dadurch deutlich, dass nicht bei jedem Track der gleiche Anbieter die höchste Lautheit erzeugt. Zudem fällt auf, dass bei sehr lauten Mixdowns die Lautheit durch einige Services sogar reduziert wird. Auch der Klang der gemasterten Tracks ist unterschiedlich, das Processing von eMastered führt beispielsweise zum hellsten Klang (viele hohe Frequenzanteile). [26]

Die Algorithmen der Anbieter können sich durch unterschiedliche Processing Chains, die Architektur der Tiefen Neuronalen Netze und deren Hyperparameter, die Methoden zum Pretraining und die zugrundeliegenden Trainingsdaten unterscheiden, wodurch die Mastering-Ergebnisse variieren.

5 Evaluation

Die Klangqualität der Masterings der Online-Dienste ist erstaunlich gut und Services wie LANDR oder eMastered werden allmählich auch zu einem Player im professionellen und kommerziellen Bereich. Auch wenn beispielsweise der CEO von eMastered, Collin McLoughlin, proklamiert, dass eMastered vielmehr einen neuen Markt für Künstler, die sich bislang kein professionelles Mastering leisten konnten, erschaffen soll als bisherigen Strukturen zu ersetzen, haben bereits vereinzelte Major-Labels und Weltstars die Online-Dienste genutzt. [3] Auch der Rückgang der Preise der Mastering Studios seit der zunehmenden Popularität der Online-Dienste ist ein Indiz für die Disruptivität der neuen Technologie. [6] Im Direktvergleich zwischen algorithmisch generierten Masterings und der Arbeit eines professionellen Mastering Engineers gewinnt die Klangqualität des menschlichen Produkts jedoch noch knapp. [1] [8] Es bleibt die Frage allerdings offen, ob sich dies in der Zukunft noch ändern wird.

Das Arbeiten mit einem Mastering Engineer hat aber weitere Vorteile gegenüber der Nutzung von Online-Diensten. An erster Stelle steht hierbei die menschliche Kommunikation. Der Künstler bzw. Auftraggeber kann mit einem Mastering Engineer jederzeit Rücksprache halten. Dabei können konkrete Klangvorstellungen oder Referenz-Tracks vermittelt werden. Es wird eine iterative Feedbackschleife möglich: Der Mastering Engineer kann das Mastering je nach Bedarf nachträglich verändern. Die Einstellungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des Klangs bei den Online-Diensten sind hingegen sehr begrenzt (vgl. Kapitel 4). Auch ein Feedback des Engineers zum Mixdown und potentiellen Problemen, die an dieser Stelle noch gelöst werden können, bleibt bei den Online-Diensten aus.

Beim Mastering eines Albums kommen weitere Schwächen der Online-Dienste auf. Während ein Mastering Engineer die

Lautheit der einzelnen Tracks im Gesamtkontext betrachtet und entsprechend agiert, ist dies bei den Online-Diensten bislang nur begrenzt möglich. Zwar bietet LANDR beispielsweise eine „Album-Option“, wodurch die Lautheit aller Tracks eines Albums gleich sein soll. Dadurch ergibt sich allerdings das Problem, dass eine Ballade mit vielen ruhigen Parts auf einem Album, auf dem ansonsten stärker komprimierte Rock-Songs sind, im Kontext zu laut erscheint. [12] Um dieses Problem zu lösen, müssten die Algorithmen in der Zukunft in der Lage sein, den Stil der einzelnen Songs zu erkennen und im Kontext des Albums zu verarbeiten.

Ein ähnliches Problem kann bei Sonderfällen auftreten. Während die KI besonders gut bei Eingaben ist, die der Norm entsprechen, können die Ergebnisse bei Ausnahmefällen weniger gut ausfallen. Ein Beispiel ist hierfür ein Bass-Solo in einem Rock-Song, welches relativ selten ist. Die KI würde das Bass-Solo nicht als ein solches erkennen, sondern analysieren, dass ein hoher Anteil an tiefen Frequenzen vorhanden ist. Dieses Ungleichgewicht würde die KI ausgleichen, wodurch in diesem Fall ein unnatürlicher Klang entstünde. Ein Mastering Engineer erkennt die Instrumentierung, die Songstruktur und den Kontext auf menschliche Art und Weise und ist daher von ebensolchen Problemen befreit. [12]

Dennoch sind die Online-Mastering-Angebote in verschiedener Hinsicht attraktiv. Das Hauptargument für viele Künstler, die keine großen finanziellen Budgets oder Deals bei Major-Labels haben, sind die geringen Kosten (vgl. Kapitel 4). Durch die Abo-Modelle der meisten Anbieter können die Mastering-Algorithmen beliebig oft verwendet oder getestet werden, ohne dass Mehrkosten entstehen.

Doch auch die ständige Verfügbarkeit der Online-Dienste ist ein Vorteil gegenüber menschlichen Mastering Engineers. Zudem kann der gemasterte Track nach kurzem Processing direkt heruntergeladen werden, während die Bearbeitung in einem

Mastering Studio in der Regel mehrere Tage in Anspruch nimmt. Services wie LANDR bieten auch direkt die Online-Distribution über relevante Plattformen wie Spotify, iTunes, Amazon, etc. an, ohne dass weitere Kosten dafür anfallen würden. Damit übernimmt LANDR zusätzlich Aufgaben, die üblicherweise ein Label übernimmt und verkürzt die Wertschöpfungsketten zum Künstler, indem keine Anteile an den Tantiemen abgegriffen werden. [4]

6 Schlussbetrachtung

Die zunehmende Popularität der Online Mastering Services hat bereits einen Einfluss auf die Mastering-Branche, indem Mastering Studios ihre Preise reduzieren mussten und die Wertschöpfungsketten zum Künstler über Anbieter wie LANDR verkürzt werden. Dies unterstreicht die Disruptivität des automatisierten Masterings. [6] Noch bringt die Nutzung der Online-Dienste allerdings einige Nachteile im Vergleich zu der Arbeit mit einem professionellen Mastering Engineer mit sich. Primär fehlen bislang die Möglichkeiten der Kommunikation und iterativen Feedbackschleifen. Die begrenzten Einstellungsmöglichkeiten bei den Online-Diensten können die menschliche Interaktion nicht ersetzen und werden insbesondere bei sehr bestimmten Klangvorstellungen zum Problem. Wenn die KI-basierten Anwendungen in Zukunft die Arbeit in den Mastering Studios übertreffen wollen, muss zudem ein besserer Umgang mit Sonderfällen und spezifischen Klangvorstellungen gewährleistet werden.

Zuerst werden voraussichtlich kleinere Mastering Studios, die nicht von Kontakten und Deals mit Major Labels profitieren, sondern mit weniger bekannten Künstlern und Bands arbeiten, betroffen sein. Für diese Zielgruppe mit geringerem Budget sind die günstigen Online-Dienste besonders attraktiv. Auch die permanente Verfügbarkeit und das schnelle Processing der Online-Dienste können überzeugende Faktoren sein.

Das Mastering durch einen menschlichen Mastering Engineer wird folglich zur Premium-Option für die Künstler und Labels, die es sich finanziell und zeitlich leisten können. Ob auch die Jobs von Mastering Engineers in der großen Mastering Studios in der Zukunft bedroht werden, kann an dieser Stelle noch nicht zuverlässig beantwortet werden und hängt von der weiteren Entwicklung der KI-Anwendungen ab.

References

- [1] Mimitakis et al. (2016): Deep Neural Networks for Dynamic Range Compression in Mastering Applications. In: Audio Engineering Society, Convention Paper 9539.
- [2] Brown, Harley (2019): LANDR Brings Music Mastering to the Cloud, Helping Major Labels & Bedroom Acts Alike. Online: <https://www.billboard.com/articles/business/8499104/landr-music-mastering-online-cloud-major-labels-bedroom-artists> (Zugriff: 18.02.2019)
- [3] Roberts, Dave (2019): Will AI revolutionize the way artists make music and find samples? LANDR says yes... Online: <https://www.musicbusinessworldwide.com/will-ai-revolutionize-the-way-artists-make-music-and-find-samples-landr-says-yes/> (Zugriff: 18.02.2020)
- [4] LANDR (o. J.): Über LANDR. Online: <https://support.landr.com/hc/de/categories/360000461253-%C3%9Cber-LANDR> (Zugriff: 18.02.2020)
- [5] Deahl, Dani (2019): How AI is solving one of music's most expensive problem. Online: <https://www.theverge.com/2019/1/30/18201163/ai-mastering-engineers-algorithm-replace-human-music-production> (Zugriff: 18.02.2020)
- [6] Bonedo (2017): LANDR Digital Distribution – Ein Mehrwert für Musiker? Online: <https://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/landr-digital-distribution-ein->

- mehrwert-fuer-musiker.html (Zugriff: 02.03.2020)
- [7] San Segundo, Carlos (o. J.): Audio Mastering: Was ist das? Online: <https://www.delamar.de/musikproduktion/audio-mastering-3208> (Zugriff: 02.03.2020)
- [8] Birtchnell, Thomas (2018): Listening without ears: Artificial intelligence in audio mastering. In: *Big Data & Society* 5.2.
- [9] Zambrano, Oscar (2019): What Is an Ideal Mastering Signal Chain? Online: <https://www.izotope.com/en/learn/what-is-an-ideal-mastering-signal-chain.html> (Zugriff: 02.03.2020)
- [10] Badr, Will (2019): Auto-Encoder: What Is It? And What Is It Used For? (Part 1). In: *Towards Data Science*. Online: <https://towardsdatascience.com/auto-encoder-what-is-it-and-what-is-it-used-for-part-1-3e5c6f017726> (Zugriff: 22.02.2020)
- [11] Baarß, Felix (o. J.): Mastering Plugins: Die 10 Präzisionswerkzeuge. Online: <https://www.delamar.de/mastering/best-mastering-plugins-49012/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [12] Sterne & Razlogova (2019): Machine Learning in Context, or Learning from LANDR: Artificial Intelligence and the Platformization of Music Mastering. In: *Social Media+ Society* 5.2.
- [13] LANDR (o. J.): Audio Online Mastern. Online: <https://www.landr.com/de/audio-online-mastern/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [14] Hinton, Geoffrey E. (2006): Reducing the dimensionality of data with neural networks. In: *Science* 313.
- [15] LANDR (o. J.): Pricing. Online: <https://www.landr.com/de/preise> (Zugriff: 02.03.2020)
- [16] eMastered (o. J.): Pricing. Online: <https://emastered.com/#pricing> (Zugriff: 02.03.2020)
- [17] CloudBounce (o. J.): Pricing. Online: <https://www.cloudbounce.com/#pricing> (Zugriff: 02.03.2020)
- [18] MajorDecibel (o. J.): Pricing. Online: <https://majordecibel.com/pricing.php> (Zugriff: 02.03.2020)
- [19] MasteringBox (o. J.): Pricing. Online: <https://www.masteringbox.com/pricing/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [20] Middle Mastering (o. J.): Prices. Online: <https://www.middlemastering.com/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [21] Peak Studios (o. J.): Preise. Online: <https://www.peak-studios.de/PREISE/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [22] HOFA Studios (o. J.): Mastering. Online: <https://hofa-studios.de/mastering/> (Zugriff: 02.03.2020)
- [23] Abbey Road Studios (o. J.): Mastering. Online: <https://www.abbeyroad.com/online-mastering> (Zugriff: 02.03.2020)
- [24] Sage Audio (o. J.): Audio Mastering Rates. Online: <https://www.sageaudio.com/rates.php> (Zugriff: 02.03.2020)
- [25] Dubplates & Mastering (o. J.): Prices. Online: <http://www.dubplates-mastering.com/prices.html> (Zugriff: 02.03.2020)
- [26] Piotrowska et al. (2017): A Study on Audio Signal Processed by “Instant Mastering” Services. In: *Audio Engineering Society, Convention Paper 9719*.