



ANTON BRUCKNER
PRIVATUNIVERSITÄT
OBERÖSTERREICH

Seyed Amir Abbas Ahmadi
Matrikelnummer: 01171473

**Anwendung computergestützter Programme zur Berechnung von
Stimmungssystemen am Beispiel des iranischen Dotarspielers Mohammad-
Hoseyn Yegane (1918 – 1992)**

Masterarbeit

Schriftlicher Teil der Lecture Performance
KMA Studiengänge Musik

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Arts

des Studiums KMA Komposition

Studienkennzahl: RA066701

an der

Anton Bruckner Privatuniversität OÖ

Betreut durch: Helmut Schönleitner

Zweitleser: Univ.Doz. MMag. Dr. Rainer Holzinger

Linz am 15.11.2021

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	4
1.1. DOTAR.....	5
1.2. DIE IN DEN HISTORISCHEN MUSIKABHANDLUNGEN VORKOMMENDEN STIMMUNGSSYSTEME	5
2. METHODIK	6
2.1. P-YIN-ALGORITHMUS UND TONY SOFTWARE.....	7
2.2. SCHRITTWEISER ABLAUF.....	9
3. VERGLEICHENDE ANALYSE	15
4. SCHLUSSWORT	17
5. LITERATURVERZEICHNIS	18

Abstract (Deutsch)

Die aus insgesamt tausend Jahren erhalten gebliebenen Musikabhandlungen des Nahen Ostens offenbaren präzise mathematische Berechnungen der Musikintervalle.

In den letzten Jahrzehnten erleben wir im Orient und vor allem im Iran eine zunehmende Adaption der hauptsächlich in westlichen Musikkulturen ausgeübten gleichstufigen Stimmung, sodass diese mittlerweile von einigen Musikern der Dastgah Musik des Iran sogar als Standard angenommen wird.

Die Dastgah Musik des Iran, die heute hauptsächlich in der Hauptstadt Teheran ausgeübt wird, findet ihre Wurzeln jedoch in anderen Regionen des Landes. Da es in diesen Regionen in den letzten Jahrzehnten weniger Austausch mit großen Städten gegeben hat, blieben die Musiktraditionen dieser Regionen von der Modernisierung weitestgehend unbeeinflusst. Deshalb kann eine Analyse der Musizierpraxis dieser Gegenden Aufschlüsse über historische Stimmungssysteme der Dastgah Musik geben. Doch viele Meister dieser Tradition sind in den letzten Jahren gestorben, ohne dass die von ihnen praktizierten Stimmungen zu ihren Lebzeiten erforscht wurden.

In der vorliegenden Arbeit kommen Computerprogramme zur Anwendung, mit denen anhand von Originalaufnahmen von Mohammad-Hoseyn Yegane (1918 – 1992), einem der bedeutendsten Dotarspieler der Region *Quchan*, das von ihm benützte Stimmungssystem ermittelt wird.

Es wurde dabei die auf Basis des P-YIN Algorithmus geschriebene Tony Software für die Ermittlung der Frequenzen der Aufnahmen verwendet. Grundsätzlich eignet sich der P-YIN Algorithmus nur für monophone Musik. Da aber bei der Dotar die Melodie und die tiefere Saite gleichzeitig angeschlagen werden, erkennt der Algorithmus manchmal den Differenzton anstatt des tatsächlich gespielten Tons. Diese Arbeit zeigt mittels mathematischer Verfahren eine Methodik für die Korrekturen der Frequenzausgaben.

Nach der Analyse von Yeganes Stimmungssystem werden schließlich daraus abgeleitet die Zusammenhänge mit historischen Stimmungssystemen und außerdem mit der Stimmung der heutigen Dastgah Musik des Irans, vergleichend untersucht.

Abstract (English)

The study of analytic music books from the middle east, which goes back a thousand years, reveals the precise mathematical calculations of musical intervals, indicating the accuracy of the musicians of this region in terms of the intonation of the intervals.

In recent decades, we have come to witness an increasing use of equal-tempered tuning in the Orient and especially in Iran, so much so that some musicians of the Dastgah music of Iran even adopt it as a standard.

The music from certain regions of Iran shows to be more faithful to tradition, and since the Dastgah music, which was mainly practiced in the capital city Tehran, finds its roots in these regions, the musical practice of these regions can explain the tuning system in a much better way. However, many masters of this music have died in recent decades without having the tuning system, that they have used during their lifetime, researched.

Computer programs are used to determine the tuning system of the region of Quchan, which is taken as an example in this work, with the help of available recordings from one of the most important dotar players of this region: Mohammad-Hoseyn Yegane (1918 - 1992).

Tony software, which is programmed based on the P-YIN algorithm, was used to determine the frequencies of recordings. P-YIN is only suitable for monophonic music. Since the melody and the lower strings of Dotar are struck simultaneously, the algorithm sometimes detects the difference tone instead of the real played tone. To solve this problem, this paper uses mathematical techniques to show a methodology for correcting the frequency outputs.

Finally, after determining Yegane's tuning system, this work comparatively examines its relationships with the historical tuning systems and with the tuning of today's Dastgah music of Iran.

1. Einleitung

Die aus insgesamt tausend Jahren erhalten gebliebenen Musikabhandlungen des Nahen Ostens weisen auf komplexe mathematische Berechnungen von Musikintervallen hin, mit deren Hilfe sich das Stimmungssystem dieser Regionen zu jener Zeit erklären lässt.

In den letzten Jahrzehnten verbreitete sich zunehmend die gleichstufige Stimmung in der Musizierpraxis des Orient. Gründe hierfür liegen in der Ausbildung vieler Musiker in westlichen Kulturtraditionen, dem Einsatz des Klaviers in der Praxis und vor allem die Annahme der europäischen Kultur als Vorbild.

Der iranische Musikologe Hormoz Farhat bezeichnet in seinem Buch „The Dastgah Concept in Persian Music“ die gleichstufige Stimmung als ein ungültiges Tonsystem in der klassischen iranischen Musik, Dastgah ¹ genannt. Anhand der Originalinstrumente von Meistern der iranischen Dastgah Musik berechnete er die Bundeinteilungsabstände und erschloss daraus ein Stimmungssystem.² (Tabelle 5)

Die Dastgah Musik in der Form, wie wir sie heute kennen, entstand nach der Kadcharen Dynastie (1779- 1925) in der iranischen Hauptstadt Teheran und wurde von Meistern der klassischen iranischen Musik ausgeübt. Der Großteil der Melodien findet aber ihren Ursprung in vielen Regionen des Iran und den dort überlieferten Traditionen.

Obwohl die gleichstufige Stimmung in den Hauptstädten seit einigen Jahren häufiger von den Musikern der Dastgah Musik als Standard angenommen wird, ist die Musik in bestimmten Regionen³ traditionstreuer geblieben. Der geringe musikalische Austausch ist ein wichtiger Grund hierfür.

In den letzten Jahren erwachte das Interesse der Musikologen an der Erforschung traditioneller Musik. Diese Musik gibt Aufschlüsse über die in ihr verborgenen Verbindlichkeiten zur tausendjährigen Musikgeschichte, aber auch Aufschlüsse über die Dastgah Musik des Irans, die

¹ Dastgah, auch Radif genannt, wird In der Iranica Encyclopedia wie folgt definiert:

“modal system in Persian music, representing a level of organization at which a certain number of melodic types (gūšās) are regrouped and ordered in relation to a dominant mode (māya).”

Ehsan Yarshater, Encyclopaedia Iranica Vol. VII: Fascicle I., (California: Mazda Publishers, 1996), S. 104.

² Hormoz Farhat, The Dastgah Concept in Persian Music (Cambridge: Cambridge University Press, 1990).

³ Volksmusik“, „Maqam-Musik“ und „regionale Musik“ sind die Begriffe, die am häufigsten für die Musik außerhalb der Dastgah verwendet werden.

Maqam-Musik der Türkei und die Maqam-Musik arabischer Länder. Wenig Beachtung finden aber im Rahmen dieser Forschungen Untersuchungen von historischen Stimmungssystemen.

Die vorliegende Arbeit erforscht daher am Beispiel des Dotarspielers Mohammad-Hoseyn Yegane (1918 – 1992) das Stimmungssystem der Region Quchan, eine der ältesten Kulturstädte Persiens. Mohammad-Hoseyn Yegane zählt zu den bedeutendsten Dotarspielern und verkörpert die musikalische Ästhetik dieser Region.

In meiner Arbeit analysiere ich mit Hilfe von Computerprogrammen Tonaufnahmen von Yegane, mit dem Ziel, das von ihm verwendete Stimmungssystem zu berechnen. Zudem stelle ich eine vergleichende Analyse dieses Stimmungssystems mit dem von Hormoz Farhat vorgeschlagenen Stimmungssystem der Dastgah Musik des Iran und mit den in den Musikabhandlungen vorkommenden Stimmungssystemen an.

Vor der Analyse wird in den folgenden Abschnitten der Einleitung ein Überblick über das Instrument Dotar gegeben und anschließend werden die in den Abhandlungen vorkommenden Stimmungssysteme zusammengefasst erklärt.

1.1. Dotar

„Dotar“, bestehend aus zwei persischen Wörtern Do دو [zwei] und Tar تار [Saite], hat, wie der Name sagt, zwei Saiten, die in Quarten oder Quinten gestimmt werden. Die beiden Saiten werden immer gleichzeitig mit der rechten Hand und ohne Plektrum angeschlagen. Man spielt die Melodie ausschließlich auf der höheren Saite mittels Zeige-, Mittel-, Ring- und kleinem Finger der linken Hand, wobei manche Dotarspieler, wie auch Yegane, auch den Daumen benützen, um auf der tieferen Saite reine Intervalle (meistens Quart und Quint) zu erzeugen. Das heißt, die höhere Saite ist für die Melodieerzeugung und die tiefere Saite als Unterstützung vorgesehen. Der Ton der offenen Melodiesaite ist immer der Grundton (Tonika) der Skala.

1.2. Die in den historischen Musikabhandlungen vorkommenden Stimmungssysteme

In fast allen Musikabhandlungen des Nahen Osten, die sich mit dem Stimmungssystem befassen, werden die Tonintervalle meistens mittels Bundeinteilungsberechnung auf dem Instrument Ud

dargestellt. Diese Abhandlungen liefern uns eine sehr genaue Vorstellung der historischen Stimmungen einer Region. Al-Kindi (? – 837), Al-Farabi (? – 950) und Ibn Sina (980 – 1037) zählen zu jenen Autoren, deren Abhandlungen neue Tonsysteme beinhalten. Viele andere haben sich mehr oder weniger an ihren Vorgaben orientiert.

Al-Kindi ist der früheste Autor, von dem eine Musikabhandlung erhalten geblieben ist.⁴ Sein Stimmungssystem ist eine pythagoreische 12-tönige Stimmung.⁵ Diese Stimmung diente allen weiteren Autoren als Grundlage ihres Stimmungssystems, wobei sie auch für die Ermittlung zusätzlicher Intervalle verwendet wird.

Al-Farabi beschreibt in seiner Abhandlung „Kitab Al-Musiqi Al-Kabir“ Stimmungssysteme unterschiedlicher Regionen seiner Zeit durch Bemessung von Bundeinteilungs- bzw. Lochabständen diverser Instrumente, darunter die khorasanische Tanbur.⁶

Bei dieser Tanbur erreicht Al-Farabi die zu Al-Kindis Stimmungssystem zusätzlichen Intervalle durch Erweiterung der Quintenspirale der pythagoreischen Stimmung, nämlich 12 Quinten aufwärts und 11 Quinten abwärts.⁷ (siehe Tabelle 5)

Ibn Sina erweitert die 12-tönige pythagoreische Stimmung, indem er Intervalle mit überteiligen Brüchen zu diesen Tönen addiert oder von diesen Tönen abzieht. Zum Beispiel wird Ibn Sinas zalzalische Wusta (neutrale Terz) durch Multiplikation mit dem überteiligen Bruch 13:12 und 9:8 berechnet, woraus sich der Bruch 39:32 ergibt.⁸ (siehe Tabelle 5)

2. Methodik

Wie zuvor bereits erwähnt, wurde die Bundeinteilung von Yeganes Dotar nicht zu seinen Lebzeiten untersucht und meine Arbeit setzt sich das Ziel, mittels der Computerprogramme seine Tonaufnahmen zu analysieren, um das von ihm benützte Stimmungssystem zu bestimmen. Dafür wird im gesamten Arbeitsprozess der P-YIN-Algorithmus verwendet.

⁴ Kindi, Ja'qub Ibn-Ishaq al, Mahud el Hefni, and Robert Lachmann, *Risala Fi Hubr Ta'lif al-Alhan* [Über Die Komposition Der Melodien]: Nach d. Hs. Brit. Mus. Or. 2361 Mit Übers. (Leipzig: Kistner & Siegel, 1931).

⁵ Liberty Manik, *Das arabische Tonsystem im Mittelalter* (Leiden: Brill, 1969).

⁶ Die khorasanische Tanbur ist der Ursprung der Dotar.

⁷ Farābī, Abū-Naṣr Muḥammad Ibn-Muḥammad al, Ḡaṭṭās 'Abd-al-Malik Ḥaṣāba, and Maḥmūd Aḥmad al Ḥifnī, *Kitāb al-Mūsīqā al-kabīr* (al-Qāhira: ār al-Kātib al-'Arabī li-'ṭ-Ṭibā'a wa-'n-Naṣr, 1967).

⁸ Cris Forster, *Musical Mathematics: On the Art and Science of Acoustic Instruments* (San Francisco, Calif.: Chronicle Books, 2010).

2.1. P-YIN-Algorithmus und Tony Software

Um die gespielten Tonhöhen mittels Erkennung der jeweiligen Grundfrequenz in einer Tonaufnahme zu ermitteln, haben 2002 Alain de Cheveigné vom IRCAM-CNRS und Hideki Kawahara von der Wakayama University gemeinsam einen Algorithmus namens YIN mit C++ geschrieben.⁹

Im Artikel „A Comparative study of pitch extraction algorithm on a large variety of singing sounds“ wird der YIN als genauester Algorithmus beurteilt.¹⁰

Der von Matthias Mauch und Simon Dixon geschriebene P-YIN-Algorithmus modifiziert den YIN-Algorithmus, sodass gegebenenfalls auch alternative Grundfrequenzen, Frequenzkandidaten genannt, ermittelt werden können.¹¹ Um die Ergebnisse des P-YIN-Algorithmus visuell darzustellen und auch bei Bedarf bearbeiten zu können wurde 2015 die Tony Software programmiert.¹²

Abbildung 1 zeigt ein Bildschirmfoto der Tony Software.

⁹ Alain de Cheveigné und Hideki Kawahara, „YIN, a Fundamental Frequency Estimator for Speech and Music“, *The Journal of the Acoustical Society of America* 111, Nr. 4 (April 2002).

¹⁰ Onur Babacan u. a., „A comparative study of pitch extraction algorithms on a large variety of singing sounds“, in *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver, 2013)*, 7815–19.

¹¹ Matthias Mauch und Simon Dixon, „PYIN: A fundamental frequency estimator using probabilistic threshold distributions“, in *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, 2014)*, 659–63.

¹² Matthias Mauch u. a., „Computer-aided Melody Note Transcription Using the Tony Software: Accuracy and Efficiency“, in *First International Conference on Technologies for Music Notation and Representation (TENOR), 2015*.

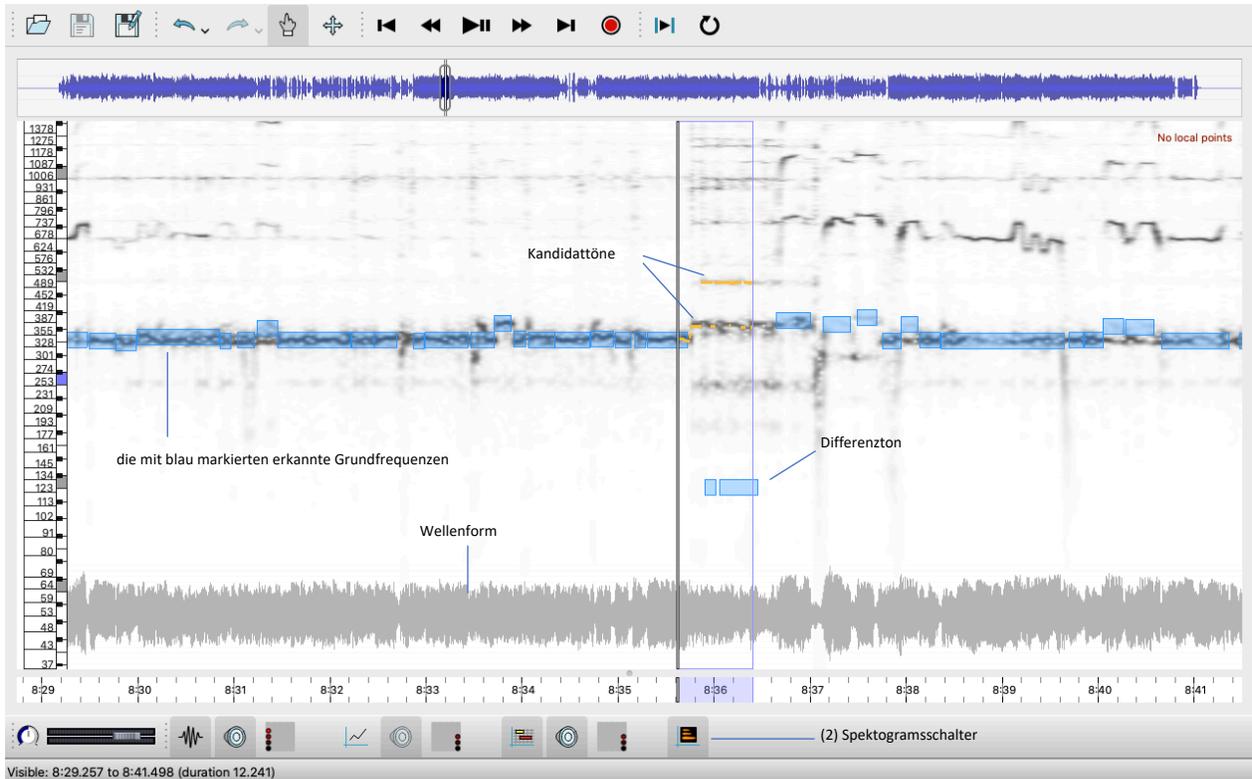


Abb. 1 Bildschirmfoto der Tony Software

Es ist zu beachten, dass sich YIN und P-YIN nicht für polyphone Musik eignen. Da bei der Dotar beide Saiten gleichzeitig angeschlagen werden, stellt sich die Frage, ob das Einflüsse auf die Ergebnisse haben könnte. Eine genaue Analyse der Aufnahmen zeigt, dass nur dann, wenn die tiefere Saite ein reines Intervall mit der Melodiesaite bildet, der Algorithmus den Differenzton des reinen Intervalls als Grundfrequenz erkennt. In solchen Fällen wird vom Algorithmus jedoch eine andere Grundfrequenz als Vorschlag ermittelt und genau das ist der Grund für die Auswahl dieses Algorithmus in meiner Arbeit. Um manuelle Korrekturen zu vermeiden, wird in dem nächsten Abschnitt ein mathematisches Verfahren für die Bearbeitung der Daten erarbeitet.

Von Yegane sind drei Tonaufnahmen veröffentlicht worden, die in dieser Arbeit analysiert werden.^{13 14 15} Sie beinhalten 16 Musiktitel mit einer Dauer von insgesamt 2 Stunden.

¹³ Mohammad-Hoseyn Yegane, Music of Nothern Khorasan, CD (Mahoor institute of culture and art, 2002), M. CD - 92.

¹⁴ Mohammad-Hoseyn Yegane, Music of Nothern Khorasan, CD, The Tale Of Ebrahim Ad-Ham (Mahoor institute of culture and art, 2003), M. CD - 172.

¹⁵ Mohammad-Hoseyn Yegane, Music of Nothern Khorasan, The Story of Zohre (Mahoor institute of culture and art, 2003), M. CD - 157.

Bei manchen Aufnahmen singt er auch während des Spielens. Um nur das Instrument analysieren zu können, wurden diese Gesangsstellen aus den Aufnahmen weggeschnitten.

Im Folgenden wird die Analyse der Tonaufnahmen von Yegane Schritt für Schritt erklärt.

2.2. Schrittweiser Ablauf

- Schritt I- Durchführung des P-YIN-Algorithmus

Zuerst werden die Aufnahmen einzeln in der *Tony* Software geöffnet und der Algorithmus wird durchgeführt.

Falls vorhanden werden die Gesangsstellen herausgeschnitten.

Alle Verzierungen werden ausgeschnitten, um die Genauigkeit der Ergebnisse noch zu erhöhen.

Der ungefähre Frequenzbereich der Tonika, die immer der Ton der offenen Melodiesaite ist, wird für jede Aufnahme notiert.¹⁶

Anschließend werden die Ergebnisse (Frequenzen) als Text-Datei exportiert und in Excel importiert.

- Schritt II- Bestimmung der Differenztonbereiche

Wie zuvor bereits erwähnt, könnte der Algorithmus anstatt des Melodietons den Differenzton des reinen Intervalls zwischen der Melodie und der tieferen Saite als Grundfrequenz der gespielten Tonhöhe erkennen. Um manuelle Korrekturen zu vermeiden, wird eine mathematische Verfahrensweise vorgeschlagen, anhand derer die Daten nach dem Importieren in Excel bearbeitet werden können.

Im Booklet einer der drei CDs gibt die iranische Musikologin Fozie Majd Aufschlüsse über Yeganes Dotar und die auf ihr gespielten Skalen. Sie schreibt, dass Yeganes Dotar 11 Bünde hat und die Saiten im Quartabstand gestimmt werden. Sie erwähnt außerdem, dass Yegane zu jenen Dotarspielern gehört, die auch mit dem Daumen auf die tiefere Saite greifen, um mit der Melodiesaite eine reine Quart, reine Quint, Oktave und manchmal große Sekunde zu bilden.

¹⁶ Das wird im nächsten Schritt für die Bestimmung von Differenztonbereichen benötigt. Eine genaue Bestimmung der Frequenz der Tonika wird jedoch im Schritt III ermittelt.

Außerdem kann man aus notierten Skalen im Booklet die aus 11 Bündeln entstandenen 13 Töne der Melodiesaite wie folgt bestimmen:¹⁷

Melodiesaite: C₄ D_{♭4} D₄ E_{♭4} E₄ F₄ G_{♭4} G₄ A_{♭4} A₄ B_{♭4} C₅ D_{♭5}

Abb. 2 Die 13 Töne von Yeganes Dotar¹⁸

In der Tabelle 1 werden alle möglichen reinen Intervalle zwischen der Melodie und der tieferen Saite aufgelistet.

Tabelle 1: alle möglichen¹⁹ reinen Intervalle zwischen der Melodiesaite und der tieferen Saite von Yeganes Dotar

auf der Melodiesaite	C ₄	D _{♭4}	D ₄	E _{♭4}	E ₄	F ₄	G _{♭4}	G ₄	A _{♭4}	A ₄	B _{♭4}	C ₅	D _{♭5}
auf der tieferen Saite	G ₃	A _{♭3}	A ₃ G ₃	B _{♭3}	A ₃	C ₄ B _{♭3}	D _{♭4}	D ₄ C ₄ G ₃	E _{♭4}	E ₄	F ₄ E _{♭4}	G ₄ F ₄	A _{♭4} G _{♭4}

Um die Differenztöne zu korrigieren, müssen wir zuerst ihren Bereich bestimmen. Bei der Betrachtung der Aufnahmen sieht man, dass die Differenztöne unter dem gespielten Tonumfang liegen, was darauf hindeuten könnte, dass sich die Bereiche der Differenztöne und des tatsächlich gespielten Tonumfangs nicht überschneiden.

Um das zu beweisen, wird mittels mathematischer Berechnungen der größtmögliche Differenzton bestimmt.

Den exportierten Daten ist zu entnehmen, dass der gespielte Tonumfang den Frequenzbereich 230 Hz – 560 Hz nicht unter- oder überschreitet. Außerdem zeigt die Tabelle 1, dass die größtmögliche Quart zwischen A_{♭4} und D_{♭5} liegt, die größtmögliche Quint zwischen G_{♭4} und D_{♭5} und die größtmögliche Oktave zwischen G₃ und G₄.

Da D_{♭5} nahe an der oberen Grenze des gespielten Tonumfangs liegt, stellen wir uns einen extremen Fall vor und nehmen wir die höchstgespielte Frequenz 560 Hz an, um die größtmöglichen Intervalle A_{♭4}– D_{♭5} und G_{♭4} - D_{♭5} zu ermitteln. Trotz dieser extremen Annahme

¹⁷ Fozie Majd, CD Booklet, in Music of Nothern Khorasan, The Story of Zohre, Mahoor institute of culture and art M. CD - 157, 2003, CD.

¹⁸ In Fozie Majds Skalenangaben kommt D_♭ vor. Aber wie wir später sehen werden, handelt es sich eigentlich nicht um einen Halbtonschritt. Er wird tiefer bzw. höher gestimmt.

¹⁹ bei vielen Noten auf der Melodiesaite wurden keine Oktaven auf der tieferen Saite erwähnt, weil sie technisch nicht spielbar sind.

wird der Differenzton des größtmöglichen Intervalls $A\flat_4 - D\flat_5$ unter dem gespielten Frequenzbereich bleiben, weil:

$$560 - \left(560 \div \left(\frac{4}{3} \right) \right) = 140 \text{ Hz} < 230 \text{ Hz}$$

Das Gleiche gilt auch für das Intervall $G\flat_4 - D\flat_5$:

$$560 - \left(560 \div \left(\frac{3}{2} \right) \right) = 187 \text{ Hz} < 230 \text{ Hz}$$

Da G_4 nicht wie $D\flat_5$ an der oberen Grenze (560 Hz) liegt, könnte die obere Verfahrensweise nicht angewendet werden. Laut Tabelle 1 ist das Intervall zwischen G_4 und der oberen Grenze sicherlich nicht kleiner als eine große Terz und da diese 350 Cent auf keinen Fall unterschreiten kann, können wir die höchstmögliche Frequenz von G_4 mittels der Cent-Frequenz Umrechnungsformel wie folgt berechnen:

Formel 1

$$z \text{ (cent)} = 1200 \times \log_2 \frac{x \text{ (Hz)}}{y \text{ (Hz)}}$$

→

Formel 2

$$y \text{ (Hz)} = \frac{x \text{ (Hz)}}{2^{\frac{z \text{ (cent)}}{1200}}}$$

$$350 \text{ cent} = 1200 \times \log_2 \frac{560 \text{ Hz}}{\text{maxf}(G_4)\text{Hz}} \rightarrow \text{maxf}(G_4) = \frac{560 \text{ Hz}}{2^{\frac{350}{1200}}} \rightarrow \text{maxf}(G_4) = 458 \text{ Hz}$$

Schließlich können wir mittels Berechnung des Differenztons festlegen, dass auch der Differenzton des größtmöglichen Intervalls $G_3 - G_4$ unter dem gespielten Frequenzbereich liegt:

$$458 - \left(458 \div \left(\frac{2}{1} \right) \right) = 229 \text{ Hz} < 230 \text{ Hz}$$

Auf der anderen Seite zeigen uns die exportierten Daten, dass zwischen 200 Hz und 230 Hz keine Daten existieren und damit erhalten wir das Ergebnis, dass alle Frequenzen der exportierten Daten, die unter 200 Hz liegen, ausnahmslos als Differenztöne gelten.

Um den Differenztonbereich von jedem reinen Intervall der Tabelle 1 zu bestimmen, können wir wiederum durch die Anwendung der Formel 2 und mit oben beschriebener Verfahrensweise den größten- bzw. den kleinstmöglichen Differenzton jedes einzelnen reinen Intervalls berechnen.

Diesmal muss die aus Schritt I vermutete Frequenz von C4 (offene Saite) als Bezugston angenommen werden. Dieses Verfahren zeigen wir in Tabelle 2 am Beispiel der dritten Aufnahme, wo die Frequenz der offenen Saite auf 251 Hz eingeschätzt wurde. Natürlich ist eine Einschätzung keine genaue Ermittlung und die tatsächliche Frequenz der offenen Saite kann davon abweichen, aber da wir nur die Bereiche der Differenztöne damit bestimmen wollen, spielt hier diese Abweichung keine Rolle. Im letzten Schritt wird diese Frequenz genau berechnet.

Tabelle 2: Ermittlung der höchst- bzw. tiefst möglichen Frequenzen der Töne der Melodiesaite
(am Beispiel der Aufnahme Nr. 3)

		Annahme eines extremen Falls			
Aufnahme Nr. 3: Frequenz der offenen Saite $f(x) = 251 \text{ Hz}$		A	B	C	D
		kleinstmögliches Intervall zur offenen Saite	größtmögliches Intervall zur offenen Saite	tiefst mögliche Frequenz	höchstmögliche Frequenz
		Cent	Cent	$f(x) \times 2^{\frac{A1 \cdot A13}{1200}}$	$f(x) \times 2^{\frac{B1 \cdot B13}{1200}}$
1	C4	-50	50	244	258
2	D \flat 4	50	150	258	274
3	D4	150	250	274	290
4	E \flat 4	250	350	290	307
5	E4	350	450	307	326
6	F4	450	550	326	345
7	G4	550	650	345	365
8	G \flat 4	650	750	365	387
9	A \flat 4	750	850	387	410
10	A4	850	950	410	434
11	B \flat 4	950	1050	434	460
12	C5	1150	1250	460	488
13	D \flat 5	1250	1350	488	517

Aus der Obertonreihe wissen wir jedoch, dass das Frequenzverhältnis zwischen dem Differenzton und dem auf der Melodiesaite tatsächlich gespielten Ton (der obere Ton des Intervalls) bei einer reinen Quart 4:1, einer reinen Quint 3:1 und einer Oktave 2:1 ist. Somit können wir anhand der Daten der Tabelle 2 den Differenztonbereich für die möglichen reinen Intervalle wie folgt bestimmen:

Tabelle 3: Ermittlung der Differenztonbereiche aller möglichen reinen Intervalle

mögliche reine Intervalle		Differenztonbereiche aller möglichen reinen Intervalle			Frequenz des tatsächlich gespielten Tons
		tiefst mögliche Differenztonfrequenz		höchstmögliche Differenztonfrequenz	
G3 - C4	$C1 - (C1 \div (4 \div 3))$	61	$D1 - (D1 \div (4 \div 3))$	65	x 4
A \flat 3 - D \flat 4	$C2 - (C2 \div (4 \div 3))$	65	$D2 - (D2 \div (4 \div 3))$	68	x 4
G3 - D4	$C3 - (C3 \div (3 \div 2))$	68	$D3 - (D3 \div (3 \div 2))$	72	x 3
B \flat 4 - E \flat 4	$C4 - (C4 \div (4 \div 3))$	72	$D4 - (D4 \div (4 \div 3))$	77	x 4
C4 - F4	$C6 - (C6 \div (4 \div 3))$	81	$D6 - (D6 \div (4 \div 3))$	86	x 4
D4 - G4	$C8 - (C8 \div (4 \div 3))$	86	$D8 - (D8 \div (4 \div 3))$	91	x 4
A3 - D4	$C3 - (C3 \div (4 \div 3))$	91	$D3 - (D3 \div (4 \div 3))$	97	x 4
D \flat 4 - G \flat 4	$C7 - (C7 \div (4 \div 3))$	91	$D7 - (D7 \div (4 \div 3))$	97	x 4
E \flat 4 - A \flat 4	$C9 - (C9 \div (4 \div 3))$	97	$D9 - (D9 \div (4 \div 3))$	103	x 4
A3 - E4	$C5 - (C5 \div (4 \div 3))$	102	$D5 - (D5 \div (4 \div 3))$	109	x 3
E4 - A4	$C10 - (C10 \div (4 \div 3))$	103	$D10 - (D10 \div (4 \div 3))$	109	x 4
B \flat 4 - F4	$C6 - (C6 \div (3 \div 2))$	109	$D6 - (D6 \div (3 \div 2))$	115	x 3
F - B \flat 4	$C11 - (C11 \div (4 \div 3))$	109	$D11 - (D11 \div (3 \div 2))$	115	x 4
C4 - G4	$C8 - (C8 \div (3 \div 2))$	115	$D8 - (D8 \div (3 \div 2))$	122	x 3
G4 - C4	$C12 - (C12 \div (4 \div 3))$	122	$D12 - (D12 \div (4 \div 3))$	129	x 4
D \flat 4 - A \flat 4	$C9 - (C9 \div (4 \div 3))$	129	$D9 - (D9 \div (4 \div 3))$	137	x 3
A \flat 4 - D \flat 5	$C13 - (C13 \div (3 \div 2))$	129	$D13 - (D13 \div (4 \div 3))$	137	x 4
D4 - A4	$C10 - (C10 \div (3 \div 2))$	137	$D10 - (D10 \div (3 \div 2))$	145	x 3
E \flat 4 - B \flat 4	$C11 - (C11 \div (3 \div 2))$	145	$D11 - (D11 \div (3 \div 2))$	153	x 3
F4 - C4	$C12 - (C12 \div (3 \div 2))$	163	$D12 - (D12 \div (3 \div 2))$	172	x 3
G \flat 4 - D \flat 5	$C13 - (C13 \div (3 \div 2))$	172	$D13 - (D13 \div (3 \div 2))$	182	x 3
G3 - G4	$C8 - (C8 \div (2 \div 1))$	172	$D8 - (D8 \div (2 \div 1))$	183	x 2

Wir sehen einige überlappende Bereiche. In der Praxis wird jedoch D \flat 5 viel tiefer intoniert, sodass es mit keinem Ton ein reines Intervall bildet. Außerdem kommen die Töne A und E nie in den Intervallen als tiefere Töne vor, und somit kommt nur der Bereich 109 Hz – 115 Hz in Frage, dies bedeutet, dass die Aufnahme einmal überprüft werden muss, um erkennen zu können, welche Ersatztöne die Software für diesen Bereich vorgeschlagen hat.

- Schritt III- Vorbereitung der Daten für die Analyse

Die Bestimmung der Häufigkeiten jeder Frequenz dient in dieser Arbeit zur Berechnung der Intervalle.

Außerdem müssen, da die Stimmungen der offenen Melodiesaiten in den Aufnahmen voneinander abweichen, alle Frequenzen in Cent umgerechnet werden, um sie vergleichbar zu machen (siehe Formel 1). So beseitigen wir den Einfluss der unterschiedlichen Frequenzen der offenen Melodiesaiten und erleichtern außerdem die Auswertung der Daten, da der Vergleich der Intervalle in Cent für uns leichter nachvollziehbar ist als in Hz.

Folgend zeigen wir die Auswertung der Daten am Beispiel des ersten Intervalls (C4 - D \flat 4). Tabelle 4 zeigt die Häufigkeit dieses Intervalls im Bereich zwischen 106 – 163 Cent. Wir sehen, dass die Häufigkeiten bis 119 Cent steigen und danach wieder sinken. Ab dann sehen wir wieder eine steigende Zahl an Häufigkeiten bis 138 Cent. Dieses Intervall tritt mit Abstand am häufigsten auf. Nun wird der gesamte Bereich in zwei Unterbereiche aufgeteilt, wobei jedem ein Intervall, das durch die Mittelwertberechnung bestimmt wird, zugewiesen wird. Grund dafür ist, dass Yegane bei manchen Aufnahmen ausschließlich das kleinere Intervall, bei den meisten hingegen das größere gespielt hat, wie auch Tabelle 3 bestätigt. Die Änderung der Greifposition innerhalb der Bünde verursacht minimale Abweichungen der entstehenden Frequenzen bzw. deren Häufigkeiten, wie in der Tabelle 4 zu sehen ist. Um diesen Einfluss zu beseitigen, wird der Mittelwert jedes Bereiches für die Ermittlung der Intervalle berechnet.

Tabelle 4: vom Algorithmus ermittelte Frequenzen zwischen 106 -163 Cent und deren Häufigkeiten

Cent	Häufigkeit		Cent	Häufigkeit
106	1		137	4
107	8		138	84
111	1		139	12
113	38		140	35
114	4		142	42
117	1	Bereich I	143	21
118	2		144	6
119	48		147	13
121	6		148	19
125	5		149	3
126	42		150	15
127	19	Bereich II	151	1
129	10		153	1
130	4		154	8
131	35		156	3
132	35		157	5
134	45		160	5
135	24		162	2
136	11		163	1

Durch Anwendung dieses Verfahrens bei allen weiteren Intervallen kann das Stimmungssystem von Yegane wie in der Tabelle 5 ergänzt werden.

3. Vergleichende Analyse

In der Tabelle 5 wird Yeganes Stimmungssystem den jeweiligen von Al-Farabi, Ibn-Sina und der persischen Dastgah Musik des Iran gegenübergestellt.

Da es sich hier um monophone Musik handelt und weil eine Abweichung in der Höhe von 6 Cent für das menschliche Gehör kaum bis nicht wahrnehmbar ist, werden diejenigen Intervalle in einer Reihe nebeneinander gezeigt, die bis max. 6 Cent voneinander abweichen. Somit können wir mittels dieser Tabelle prüfen, ob ein bestimmtes Intervall von Yeganes Stimmungssystem mit dem eines anderen Stimmungssystems übereinstimmt.

Auf den ersten Blick sehen wir, dass Yeganes Stimmungssystem mehr als 13 Töne hat, was eigentlich widerlegen würde, dass ein 11-bündiges Instrument gespielt wurde. Das liegt daran, dass Dotarspieler in der Praxis bei bestimmten Maqams aus Interpretationszwecken manche Bünde verschieben, wenn diese über einen längeren Zeitraum gespielt werden. Diese Intervalle kommen jedoch seltener vor.

Das zeigt uns den Vorteil der Computerprogramme, denn sie können unabhängig von Zeit und Ort und ohne Anwesenheit der Musiker anhand der Aufnahmen auch Ausnahmefälle analysieren. Diese Intervalle wurden in der Tabelle 4 mit einem Stern gekennzeichnet.

Die Übereinstimmungen vieler Intervalle mit der vor tausend Jahren beschriebenen Stimmung der khorasanischen Tanbur deuten darauf hin, dass die Dotar nicht nur den Ursprung ihrer Bauweise in der khorasanischen Tanbur findet, sondern auch ihr verbreitetes Stimmungssystem. Bemerkenswert ist ebenfalls die Übereinstimmung von u.a. neutralen Intervallen aus Yeganes Stimmungssystem mit der Dastgah Stimmung und der Ibn-Sina Stimmung.

Ein weiteres Merkmal dieser Stimmung ist außerdem das Vorkommen von Apotome-Halbtonschritten im ersten Tetrachord und Limma-Halbtonschritten im zweiten Tetrachord. Diese, zusammen mit der um ein Comma versetzten Oktave, die mit der Stimmung der khorasanischen Tanbur übereinstimmen, geben uns darüber Aufschluss, dass trotz der Einschränkung des Tonumfangs in einer Oktave die musikalische Entwicklung innerhalb eines Stücks durch eine feine Änderung der Intonation ermöglicht wird. Das ist u.a. ein wichtiger Grund für die Ablehnung der 24-tönigen gleichstufigen Stimmung als Ersatzsystem.

Ibn Sina	Farhat	Yegane	Al-Farabi	Ibn Sina	Farhat	Yegane	Al-Farabi	Ibn Sina	Farhat	Yegane	Al-Farabi	Ibn Sina	Farhat	Yegane	Al-Farabi
0	0	0	0	498	500	503	498	498	500	503	498	841	835		
												906	905		
111						524*	522					906	897		
		120*			565							906	905		
				609			588			592		906	905		
139	135	138		609			612					996	995		
204	205			637	630							996	995		
		226										1020	1040		
294	295						679					1020	1040		
				702	700	702	702			702		1107	1110		
342	340	339*				727*						1135			
				792	790	796	792					1200	1200		
408	410	410	408				816					1200	1200		

Tabelle 5:

Gegenüberstellung folgender Stimmungen:

1. Ibn Sinas Stimmungssystem
2. von Hormoz Farhat ermitteltes Stimmungssystem der Dastgah Musik des Iran
3. von Yegane verwendetes Stimmungssystem
4. von Al-Farabi ermitteltes Stimmungssystem der khorasanischen Tanbur

4. Schlusswort

In dieser Arbeit habe ich mit Hilfe von Computerprogrammen Tonaufnahmen des iranischen Dotarspielers Mohammad-Hoseyn Yegane (1918 – 1992) analysiert, um das von ihm benützte Stimmungssystem zu ermitteln. Motiviert durch die Tatsache, dass die Bundeinteilungsabstände zu seinen Lebzeiten nicht bemessen wurden, entstand die Idee seine Intervalle unter Anwendung einer computergestützten Analyse zu berechnen.

Dabei wurde die, auf Basis des P-YIN Algorithmus geschriebene Tony Software, für die Ermittlung der Frequenzen der Aufnahmen und Excel für die Bearbeitung und Analyse der Frequenzen verwendet. Grundsätzlich eignet sich der P-YIN Algorithmus nur für monophone Musik. Da jedoch bei der Dotar die Melodiesaite und die tiefere Saite gleichzeitig angeschlagen werden, erkennt der Algorithmus manchmal den Differenzton anstatt des tatsächlich gespielten Tons. Das passiert allerdings nur, wenn die beiden Saiten ein reines Intervall bilden. Um das Problem zu lösen und den Algorithmus trotzdem zielführend zu verwenden, wurde in dieser Arbeit ein mathematisches Verfahren für die Bearbeitung der Daten erarbeitet. In weiterer Folge wurde mittels Ermittlung der Häufigkeiten von Frequenzen und Mittelwertberechnungen das von Yegane gespielte Stimmungssystem berechnet und schließlich durch Vergleiche mit historischen Stimmungssystemen seiner Heimatregion gezeigt, dass der Ursprung dieses Stimmungssystems bis weit in die Vergangenheit zurückreicht. Außerdem bemerkenswert ist die Übereinstimmung der neutralen Intervalle mit der Stimmung in der heutigen Dastgah Musik des Iran und mit der Ibn Sina Stimmung.

5. Literaturverzeichnis

Babacan, Onur, Thomas Drugman, Nicolas d’Alessandro, Nathalie Henrich, und Thierry Dutoit. „A comparative study of pitch extraction algorithms on a large variety of singing sounds“. In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 7815–19. Vancouver, 2013.

Cheveigné, Alain de, und Hideki Kawahara. „YIN, a Fundamental Frequency Estimator for Speech and Music“. *The Journal of the Acoustical Society of America* 111, Nr. 4 (April 2002).

Farābīal, Abū-Naṣr Muḥammad Ibn-Muḥammad al, Ġaṭṭās ‘Abd-al-Malik Ḥašaba, and Maḥmūd Aḥmad al Ḥifnīal. *Kitāb al-Mūsīqā al-kabīr*. al-Qāhira: ār al-Kātīb al-‘Arabī li-ṭ-Ṭibā‘a wa-’n-Našr, 1967.

Farhat, Hormoz. *The Dastgah Concept in Persian Music*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Forster, Cris. *Musical Mathematics: On the Art and Science of Acoustic Instruments*. San Francisco, Calif.: Chronicle Books, 2010.

Kindi, Ja’qub Ibn-Ishaq al, Mahud el Hefni, and Robert Lachmann. *Risala Fi Hubr Ta’lif al-Alhan [Über Die Komposition Der Melodien]: Nach d. Hs. Brit. Mus. Or. 2361 Mit Übers.* Leipzig: Kistner & Siegel, 1931.

Majd, Fozie. CD Booklet. Mahoor institute of culture and art, 2003. M. CD - 157.

Manik, Liberty. *Das arabische Tonsystem im Mittelalter*. Leiden: Brill, 1969.

Mauch, Matthias, Chris Cannam, Rachel Bittner, George Fazekas, Justin Salamon, Jiajie Dai, Juan Bello, und Simon Dixon. „Computer-aided Melody Note Transcription Using the Tony Software: Accuracy and Efficiency“. In *First International Conference on Technologies for Music Notation and Representation (TENOR)*, 2015.

Mauch, Matthias, und Simon Dixon. „PYIN: A fundamental frequency estimator using probabilistic threshold distributions“. In *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 659–63. Florence, 2014.

Yarshater, Ehsan. Encyclopaedia Iranica Vol. VII: Fascicle I. California: Mazda Publishers, 1996.

Yegane, Mohammad-Hoseyn. Music of Nothern Khorasan. CD. Mahoor institute of culture and art, 1381. M. CD - 92.

Yegane, Mohammad-Hoseyn. Music of Nothern Khorasan. CD. The Tale Of Ebrahim Ad-Ham. Mahoor institute of culture and art, 2003. M. CD - 172.

Yegane, Mohammad-Hoseyn.. Music of Nothern Khorasan. The Story of Zohre. Mahoor institute of culture and art, 2003. M. CD - 157.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Stellen oder Passagen der vorliegenden Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für die Reproduktion von Noten, grafischen Darstellungen und anderen analogen oder digitalen Materialien. Ich räume der Anton Bruckner Privatuniversität das Recht ein, ein von mir verfasstes Abstract meiner Arbeit sowie den Volltext auf der Homepage der ABPU zur Einsichtnahme zur Verfügung zu stellen.