

Was und wie Zebrafinken wirklich singen

12 Zebrafinken singen in einer Voliere (Männchen und Weibchen)
2x-4x-8x verlangsamt mit Spektrogramm und Notation

Text zum Video: <https://youtu.be/0eK9--aq3fA>

Eine Einführung in die Wunderwelt der Spektralklänge von Zebrafinken

"Musik ist die versteckte arithmetische Tätigkeit der Seele, die sich nicht dessen bewußt ist, daß sie rechnet." (Leibniz)

Themen:

- Wie können wir den Gesang der Zebrafinken überhaupt "verstehen"?
- oktavierende Verlangsamung in Tonhöhe und Tempo mit Spektrogrammen vom Overtone Analyzer
- Die Rufe der Zebrafinken sind komplexe Spektralklänge, die miteinander im Spektrum korrespondieren
- Spektralklänge und ihre Analyse
- Spektralklänge werden bei den Singvögeln mit beiden Teilen der Syrinx erzeugt
- das Ohr als Spektrumswandler (bei Vögeln und Menschen)

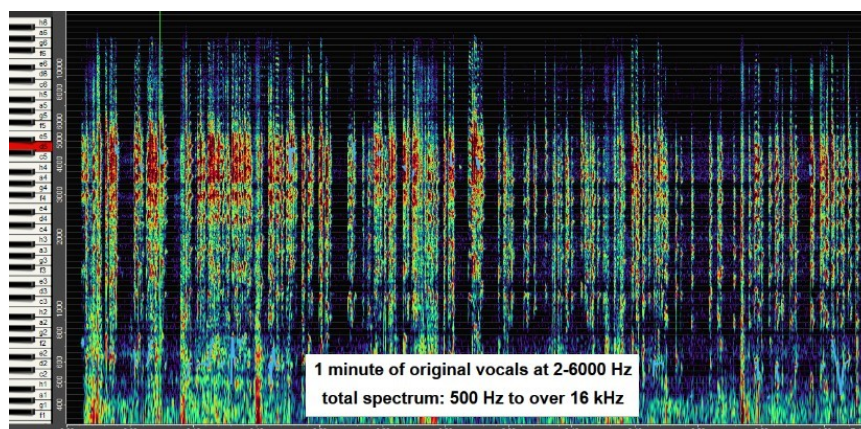
Anhang mit Spektrogrammen und Erläuterungen

- 1) 7 Spektralklänge: F#5 – F#5 – D5 – D5-G5 – G5 – D5 – D5 (S. 11)
- 2) 8 Sequenzen von Spektralklängen von verschiedenen Zebrafinken (S. 17)

Die Notenbezeichnungen sind englisch: D5 = d2 - B4 = h1 - Bb7 = b4 - Eb = Es

In dem Video "Zebrafinken Schwarm in der Voliere" sieht und hört man 6 Paare von Zebrafinken, die in ständiger Bewegung hin und her hüpfen und sich dabei offenbar bestens "miteinander unterhalten". Es ist eine kontinuierliche Abfolge von unterschiedlichen Rufen und Lauten, mal heller und mal dunkler, mal etwas tiefer und mal höher, alle sehr intensiv. Manche Phasen sind sehr aktiv, andere etwas ruhiger. Es wirkt so, als gäbe es einen sehr lebendigen Rhythmus, in dem alle 12, Männchen und Weibchen (!), aufeinander reagieren.

In einem Kommentar zu dem YouTube-Video schreibt jemand, daß seine Zebrafinken ganz aufgeregt und interessiert reagiert haben, als er ihnen das Video vorgespielt hat. Sie hatten offenbar ihre Artgenossen verstanden und waren inspiriert von ihrer Konversation.



Das Eigenartige ist, daß wir mit unser Art von Wahrnehmung auf der einen Seite eigentlich nur eine beliebige Folge von seltsamen Geräuschen hören, die wir nicht identifizieren oder beschreiben können, und daß wir auf der anderen Seite dazu neigen, in diesen Klängen eine Art von Unterhaltung oder Verständigung unter den 12 Zebrafinken zu hören.

Die Frage ist daher, ob wir herausfinden können, wie die Zebrafinken sich mit ihrer Art der Lautgebung und ihrer Art des Hörens untereinander verständigen, und ebenso, ob wir mit unseren Wahrnehmungsfähigkeiten überhaupt die Möglichkeit haben, diese Klänge zu analysieren, zu beschreiben und sogar in gewisser Weise zu verstehen.

Die Rufe der Zebrafinken sind sehr kurz (0,08-0,15 s) und klingen im Bereich zwischen 2500 und 5000 Hz. Diese Kürze und der hohe Frequenzbereich übersteigt akustisch unser Unterscheidungsvermögen. Wenn wir im Gesang einer Amsel eine Art von Melodie zu hören meinen, sind das deutlich längere Töne, die im Bereich von 1500-3000 Hz liegen, wo unser Gehör gerade noch Tonhöhen und Tonfolgen unterscheiden kann. Alles was schneller klingt und im höheren Frequenzbereich liegt, hören wir als Zwitschern, d.h. faktisch als Geräusch und nicht als Tonhöhe oder Klang.

Da das Video im mp4-Format aufgenommen wurde, werden im Spektrogramm nur die Frequenzen bis 16 kHz wiedergegeben. (Beim Wave-Format reicht das Aufnahmespektrum bis 22 kHz.) Da bei den Zebrafinken aber häufig auch noch bei 13 kHz eine stärkere Klangintensität wahrzunehmen ist, gehe ich davon aus, daß das Gesamtspektrum ihrer Klänge noch größer ist als 16 kHz.

Wenn diese „Konversation“ unter den Zebrafinken für unsere Ohren jedoch wie eine zufällige Abfolge geräuschartiger Laute klingt, können wir dann die Rufe und den Gesang dieser Vögel überhaupt „verstehen“?

"Musik ist die versteckte arithmetische Tätigkeit der Seele, die sich nicht dessen bewußt ist, daß sie rechnet." (Leibniz)

In einem Dur-Dreiklang (z.B. c-e-g) bildet sich ein mathematisches Verhältnis von Teiltönen ab (4 : 5 : 6) - das erleben wir als rein, stimmig, klar, hell, aufmunternd usw.

In einem Moll-Dreiklang (c-es-g) reibt sich die Moll-Terz "es" mit dem "e" der Dur-Terz als Oberton des Grundtons - das empfinden wir als nicht so "durus" (hart), sondern eher als "molle", weich und etwas wehmütig, anrührend usw.

Eine Quinte (das Verhältnis 2 : 3) klingt für uns im Zusammenklang offen und leer, eine Quarte (3 : 4) klingt dichter, kompakter; in einer Intervallfolge öffnet eine Quinte in einen weiten Raum, während eine Quarte in die aktive Bewegung drängt.

(Schwingt ein Ton mit 200 Hertz, dann schwingt die sogenannte "reine" Quinte dazu im Verhältnis von 3 : 2, also mit 300 Hz, und die Quarte zu der Quinte im Verhältnis 4 : 3, also mit 400 Hz, der Oktave zu dem Ton mit 200 Hz, also im Verhältnis 2 : 1. Unser Ohr/Gehirn "rechnet" das ganz genau und registriert kleinste Abweichungen, was wir als nicht stimmig oder als besonderen Reiz empfinden können.)

oktavierende Verlangsamung in Tempo und Tonhöhe

Wenn die Rufe und der Gesang der Vögel oktavierend (50 %) in Tempo und Tonhöhe verlangsamt werden, 2-, 4-, 8- und 16-fach, werden sie transponiert, bei der Amsel z.B. von F7 nach F6, F5, F4 und F3. Durch das oktavierende Transponieren (1:2) nach unten verändert sich innerhalb des Klangs und/oder Geräusches nichts in der Struktur (Tonhöhen, Lautstärke, Intervalle, Klangfiguren), in der vertikalen Schichtung und Verteilung der Frequenzen sowie in den zeitlichen und dynamischen Proportionen. Was sich aber immer mehr verändert, je tiefer und langsamer die Klänge zu hören sind, ist das, was wir davon und darin hören und wie wir es hören. Wir hören in jeder tieferen Dimension immer mehr - mehr Klang, mehr Klangfarben, mehr Spektrum, mehr Vielfalt, mehr Klarheit. Und wir hören in den für unser Hörvermögen angemessenen und vertrauten tieferen Frequenzbereichen auch anders, in jeder Lage und in jedem Klangbereich Unterschiedliches und Andersartiges, manches auch als fremdartig und ungewöhnlich, obwohl es physikalisch und akustisch der gleiche Klang ist.

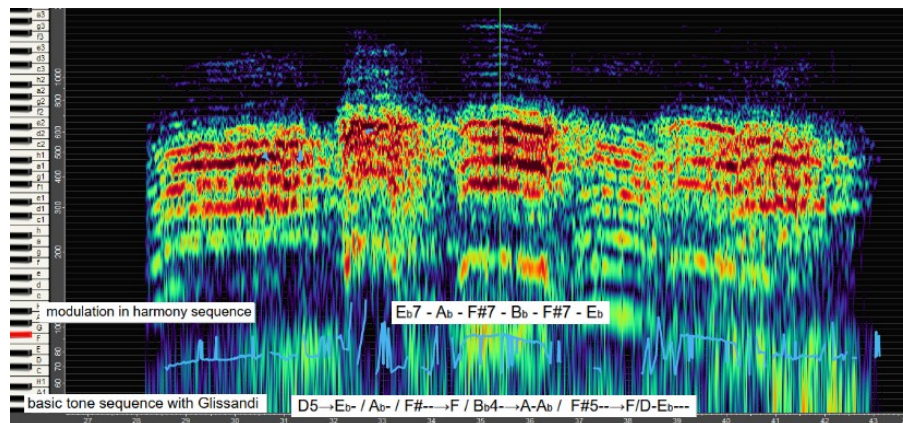
Bei der Amsel mit ihrem hochkomplexen Gesang kann man erst in der 16- oder 32-fachen Verlangsamung erkennen und verstehen, was und wie sie tatsächlich singt.

Im Spektrogramm auf dem Overtone-Analyzer (logarithmisch, nicht linear! s.u.) kann ich in der Verlangsamung schon auf den ersten Blick erkennen, welche Art von Klängen ich höre, eine bestimmte Tonhöhe, eine Tonfolge, Glissandi, 2-stimmige Klänge, Triller, Spektralklänge usw. Und ich kann exakt bestimmen, mit welcher Frequenz nicht nur der Grundton schwingt, sondern

jede einzelne Teilfrequenz im Spektrum eines Klangs. Bei 2-stimmigen Klängen kann ich genau ausrechnen, ob es z.B. eine Quinte ist im Verhältnis 2:3. Dazu ist im Spektrogramm unmittelbar an der Farbe zu erkennen und im Lautstärkewert abzulesen, welche Teiltöne lauter oder leiser sind, was für die Klangfarbe und den Klangcharakter entscheidend ist. Schließlich kann man über einen vertikalen und horizontalen Zoom sehr detailliert in ein Klangspektrum hineinschauen.

Spektralklänge der Zebrafinken

Als ich mir den Gruppengesang dieser Zebrafinken zum ersten Mal im Spektrogramm in der Originallage angeschaut habe, fiel mir gleich auf, daß es keine einfachen Töne mit einer klaren Tonhöhe gibt und auch keine Klänge mit einem markanten Grundton, sondern daß alle Klänge ihre größte Intensität in einem höheren Frequenzbereich haben zwischen 2500 und 5000 Hz oder bei 3-6000 Hz. Wie ich dann zu meinem Erstaunen in der genaueren Analyse erkannte, produzieren die Zebrafinken durchweg Spektralklänge.

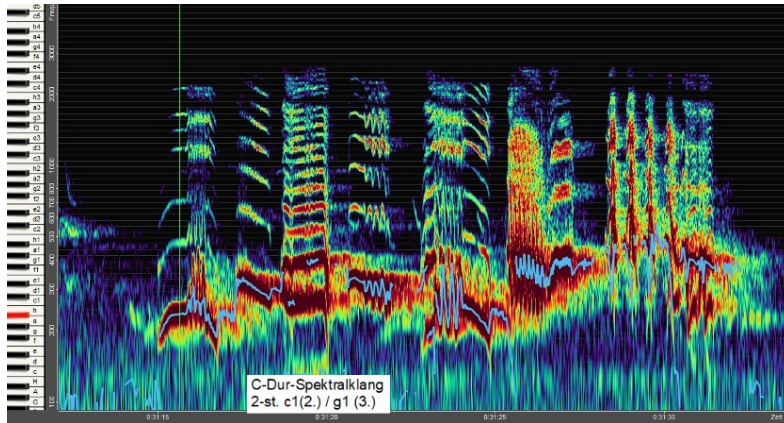


Gruppengesang von 4 Zebrafinken: nur sehr schwache oder virtuelle Grundtöne, im Spektrum korrespondierend

Alle Klänge haben im Unterschied zu Geräuschen ein Frequenzspektrum, in dem alle Teilfrequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen (1:2:3:4:5:6:7:8:9 ...). Wenn der 1. Teilton oder der Grundton ein C ist, ist der 2. Teilton die Oktave C', der 3. die Quinte G', der 4. die 2. Oktave C'', der 5. die Terz E'', der 6. die Quinte G'', der 7. die Septime B'', der 8. wieder die Oktave C''', der 9. die None D''' usw. Dieses Spektrum kann man in einem Spektrogramm auf einen Blick erfassen und genau abzählen, welche Frequenzen, in welcher Lautstärke und bis in welchen Bereich in diesem Klang schwingen, also Teile eines Ganzen (!) sind. Die klingende Tonhöhe ist normalerweise der Grundton, wenn dieser als 1. Teilton am lautesten schwingt, während die Lautstärke bei den höheren Teiltönen des Klangs mehr oder weniger schwächer wird (meist ab dem 4. Teilton).

Die Proportionen zwischen den Frequenzen innerhalb des Spektrums bleiben immer gleich, auch wenn ein Grundton im Original bei 3000 Hz liegt und in der 8-fachen Verlangsamung bei 375 Hz. Eine Quinte bleibt immer eine Quinte, gleich ob sie im Verhältnis von 2:3, 4:6 oder 6:9 steht. Beim Grundton C ist das Intervall C'/G' (2:3) eine Quinte wie das Intervall G''/D''' (6:9), auch wenn die eine Quinte 100 Hz umfaßt und die andere 300 Hz (bei C=100 ist es einmal 200:300 und das andere Mal 600:900). Und wenn eine Amsel eine 2-stimmige Quinte singt mit h3/fis4 (2 kHz/3 kHz) beträgt der Frequenzumfang sogar 1000 Hz, dennoch hören wir diese beiden Töne im Zusammenklang als Quinte und die Amsel offenbar auch, sonst könnte sie eine solche Quinte nicht so präzise singen. Das ist die logarithmische, nicht-lineare Ordnung der Klänge, die im Spektrogramm des Overtone-Analyzers genauso angezeigt und wiedergegeben wird.

(In den in der Vogelgesangsforschung verwendeten Sonagrammen wird die Frequenzskala fälschlicherweise linear angezeigt, in einer 1000 Hz Skala, was nicht übereinstimmt mit der inneren Struktur der Klänge und ihrer ganzzahligen Proportionen.)



zum Vergleich die Strophe einer *Amsel*: Spektrum des Gesangs - G6 bis G7 (1,5-3 kHz), volles Gesamtspektrum bis 16 kHz / alle Klänge mit sehr starkem Grundton / 2-stimmiger "C-Dur"-Spektralklang mit virtuellem Grundton bei C6 und der klingenden Quinte C7/G7 ($S1/S2 = 2./3.$), im gemeinsamen Spektrum exakt koordiniert

Im Spektrogramm ist sofort zu erkennen, daß der c3-Spektralklang ein 2-stimmiger Klang ist und der tiefste klingende Ton C7 nicht der Grundton ist. Direkt davor singt die Amsel ein eindeutig einstimmiges Glissando von E6 nach C7. An der Struktur des Spektrums dieses C7 ist zu erkennen, daß das C7 der Grundton ist mit C8, G8, C9, E9, G9 und Bb9 als 2. bis 7. Teilton. Dagegen folgt beim 2-stimmigen Klang direkt auf das C7 die ebenso intensive Quinte G7, das deshalb nur von der 2. Syrinx erzeugt sein kann. Bei C6 wird dem entsprechend der virtuelle Grundton für diesen 2-stimmigen Quintklang angezeigt.

Spektralklänge

Bei *Spektralklänge* ist der Grundton meist sehr schwach ausgeprägt und auch die ersten Teiltöne sind relativ leise. Die intensivsten Frequenzen liegen dann im Bereich zwischen dem 4. und 10. Teilton (2. Oktave und 2. Terz), manchmal sind es 2 und manchmal 3 Teiltöne nebeneinander bzw. übereinander, die den größten dynamischen Pegel haben. Das kann der Dreiklang Oktave / Terz / Quinte sein (4:5:6), der 5.-6.-7. Teilton (Terz / Quinte / Septime), der 6.-7. oder auch der 8.-9. Teilton. Diese Teiltöne sind dann mehr als doppelt so laut wie der Grundton, teilweise sogar um das Vierfache lauter. Und es gibt Spektralklänge, bei denen gar kein Grundton klingt, sondern nur das höhere Spektrum. Das ist dann ein *virtueller Grundton*, der vom Overton-Analyzer exakt zum entsprechenden Spektrum angezeigt wird, obwohl er physikalisch gar nicht existiert.

Wie gesagt haben alle Rufe und Klänge der Zebrafinken nur einen sehr schwachen Grundtonklang. Nur ein Ausschnitt aus dem Spektrum dieser Klänge ist zu hören und dennoch ist bei allen Klängen der jeweilige Grundton eindeutig wahrzunehmen. Im Video habe ich 7 einzelne Spektralklänge aus dem Gruppengesang ausgewählt und jeden für sich im Spektrogramm hörbar und sichtbar gemacht mit Notation. Zum Beispiel fehlt bei den Spektralkängen mit dem Grundton F#5 und G5 der 1. und 2. Teilton (Grundton und Oktave), bei D5 fehlen der 1.-2.-3. Teilton, also auch noch die Quinte.

Würden wir nur den 1. und 2. Teilton in ausreichender Lautstärke hören, wäre es fast eine Sinuston, wir würden zwar die Tonhöhe hinreichend erkennen, aber wir könnten sie nicht sicher einordnen, weil im Ohr (der Cochlea !) kein Spektrum angeregt wird. Als erfahrener Sänger könnte ich mir zu solch einem neutralen Klang eine Terz oder eine Quinte vorstellen und auch dazu singen, das setzt aber einen Prozeß von Lernen und Trainieren im Großhirn voraus. Die Cochlea selbst kann sich kein Spektrum zu diesem Ton ausdenken oder hinzu phantasieren.

(s.u. zum Hören und Singen beim Menschen)

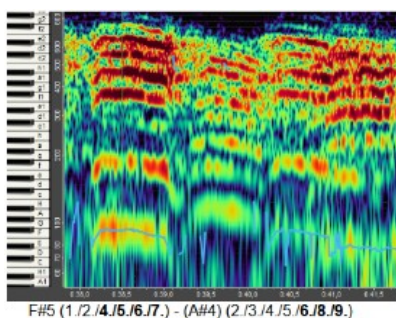
Würde ein Zebrafink nur diese 2 oder 3 Frequenzen eines Tons (1.-2.-3. Teilton) von einem andern Fink hören, könnte sein Gehör sich wegen mangelnder Stimulation kaum orientieren und er selbst könnte mit seinem Gesang keine klare Beziehung zu solch einem neutralen Klang aufnehmen.

(Bei uns Menschen ist das nicht anders. s.u.) Wird das Gehör (bei Zebrafinken und bei Menschen) dagegen allein durch das Frequenzspektrum in der Oktave zwischen dem 4. und 8. Teilton erregt, *repräsentieren diese Teilfrequenzen in ihren Proportionen und in ihrer Struktur den Gesamtklang mit seinem zugehörigen Grundton*, auch wenn er als 1. Teilton nicht schwingt. In der ganzzahligen Struktur dieses Spektrums aus Oktave-Terz-Quinte-Septime-Oktave findet das Ohr den Grundton, unabhängig davon wie stark die einzelnen Teilfrequenzen sind oder ob Quinte und Septime lauter sind als die Oktave.

Die praktische Erfahrung machen wir damit täglich beim Telefonieren. Am Telefon werden nur Frequenzen von 300-3000 Hz übertragen (analog - digital 300-7000 Hz), weil Physiker herausgefunden haben, daß dieser Frequenzbereich ausreicht, um verständlich miteinander zu kommunizieren, wodurch viel Übertragungsleistung eingespart werden kann. Trotzdem versteht mich jeder am Telefon und hört, daß ich als Mann eine tiefe Stimme habe, obwohl meine Sprechlage um 120 Hz liegt. Ich kann auch am Telefon ein Lied singen im Bereich von 110-220 Hz und jeder hört genau diese tiefe Töne in meiner Stimmlage. Und nicht nur das: Meine Partnerin hört sofort, wie es mir geht und in welcher Stimmung ich bin, wenn ich sie anrufe. D.h. sie hört, *wie* meine Stimme klingt, welche *Klangfarbe* und welchen Ausdruck sie hat, also alles das, was im Spektrum der Stimme in Resonanz ist. Umgekehrt gilt das gleiche für meine Partnerin, deren weibliche Sprechlage bei 220 Hz liegt.

Erklärung: Im Spektrogramm meiner Stimme am Telefon gibt es kein Spektrum unterhalb von 300 Hz, statt dessen das komplette Spektrum von 300-3000 Hz, aber der Tonhöhenmarker zeigt in der Tiefe exakt die Tonhöhe der gesprochenen Worte und der gesungenen Melodie an. Fazit: Unser Ohr erkennt einen schwachen und farblosen Klang als schwach und farblos (= wenig Spektrum) und hat zugleich die angeborene Fähigkeit, aus dem hohen Spektrum des Klangs (!) der Sprache eine Vielzahl an Informationen zu erschließen. Und bei reinen Klängen hat das Ohr die ebenso angeborene Fähigkeit, aus der Struktur eines Spektrums die Tonhöhe des Grundtons berechnen.

(→ "Klangspektrum von Sprechstimme und Singstimme" : <https://youtu.be/C5uBeCkFHn4>)



Ein wunderbares Beispiel für die Wirkmächtigkeit des höheren Frequenzspektrums habe ich im Video in einer Sequenz von Spektralklängen von 4 Zebrafinken gefunden (linkes Bild ein Ausschnitt). Der eine singt einen F#5-Klang (= F#7) mit intensivem Spektrum bei F#7/A#/C#8/E (4./5./6./7.).

Man hört deutlich einen vollen farbigen F#5-Klang. Beim anderen hört man überraschenderweise eine Sexte tiefer einen sonoren Ton, obwohl das hohe Spektrum nicht sehr farbige ist und der tiefe Ton bei A#4 gar nicht klingt und nicht mal vom Tonhöhenmarker als virtueller Grundton angezeigt wird. Im Spektrogramm sieht man nur relativ schwache Frequenzen beim 2. bis 5. Teilton und

etwas stärkere beim 6./8./9. Teilton. Das A#7, die Terz (5.) von F#5, ist identisch mit dem Oktav-Teilton (8.) von (A#4). Darauf antwortet vermutlich ein anderer Fink deutlich leiser mit dem gleichen F#5-Klang wie der erste Fink, nun mit virtuellem Grundton, und ein weiterer Fink reagiert mit einem (D#5), ein virtueller Grundton auch mit Spektrum vom 4. bis zum 7. Teilton (= D#7), in dem der Quint-Teilton A#7(6.) identisch ist mit den vorherigen Frequenzen.

Es ist kaum zu glauben, wenn man das Spektrogramm sieht und dann die Klangfolge hört, erst die tiefe Sexte und dann die Kleine Terz: F#5-A#4-F#5-D#. Ich höre die Bewegung der Grundtöne, aber das Innenleben der Klänge, die Wellenbewegungen aller Frequenzen und das Gleiten der Spektren, ihre Dynamik, ihre diversen Erregungszustände und ihr Zusammenspiel vollzieht sich im hohen Frequenzbereich zwischen 4. und 8. Teilton.

Und als ich dann die ganze Sequenz mit ihren 6 Spektralklängen in ihrer Harmoniefolge auf dem Klavier gespielt habe, war ich völlig überwältigt von ihrer Schönheit und der wundervollen harmonikalen Ordnung: E_b7 - A_b - F#7 - B_b - F#7 - E_b

Grundtonfolge mit kleinen Glissandi: D5→E_b- / A_b- / F#---→F / B_b4---→ A_b / F#5---→F/D-E_b---

Harmonikale Ordnung: Quintbeziehung Es-Dur - As-Dur / (As-Dur = Gis-Dur) von Gis-Dur in die doppelte Subdominante F#7 und dann aber nicht nach H-Dur, sondern in die Obermediante A#-Dur (= B_b-Dur) / zurück nach F#7 und weiter in die Untermediante D# = Es-Dur. Das könnte durchaus der Einfall eines Komponisten des 19. Jahrhunderts sein. (die ganze Sequenz mit Spektrogramm S. 14)

Die elementare Komplexität der Spektralklänge von Zebrafinken, ihre *Komplementarität*, *Korrespondenz* und *Konnektivität* hat das gleiche Grundniveau wie viele komplexen Klänge, die auch bei sängerisch höher entwickelten Singvögeln wie der Amsel zu hören sind.

In der Sequenz der Spektralklänge ist die Modulation naturgemäß nicht so klar und rein zu hören, zum einen weil die Spektralklänge wegen der Dichtheit der Teilfrequenzen immer für unsere Ohren etwas leicht Geräuschhaftes haben, zum andern weil die Klänge der Vögel immer in Bewegung sind, in den Halbton-Glissandi, in kleineren Auf- oder Ab-Bewegungen oder in einem stärkeren Vibrato. Es sind eben höchst lebendige Vokalisationen, die einen vegetativen Erregungszustand

(Nervus Vagus→Syrinx) zum Ausdruck bringen und zugleich über das Gehör stimulierend auf die vegetative Grunderregung zurückwirken (Ohr→Syrinx→Nervus Vagus).

Dieser Prozeß der Wechselwirkung gilt für das System Ohr/Syrinx/Vagusnerv in jedem einzelnen Vogel, für die Wirkung von Vogel zu Vogel und für das akustische Feld sowie das Erregungsniveau der ganzen Gruppe.

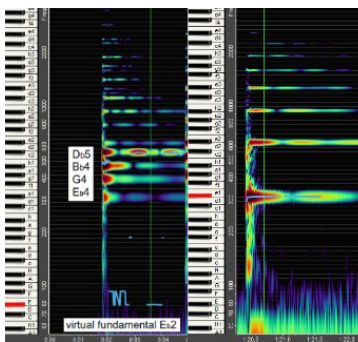
Die Wechselwirkung zwischen Hören, Stimme und Nervus Vagus kenne ich gut aus eigener Erfahrung beim eigenen Singen wie beim Hören von Gesangsstimmen und von Erfahrungen mit Vogelgesang. Es sind die hohen Schwingungsenergien im Klang meiner Stimme (die Brillanz-Formanten um 3000 Hz und höher), die Ausdruck der effizienten Regelung der Klangproduktion sind und wie sie in einem Regelkreis die Effizienz der Schwingung in den Stimmlippen erhöht (*ein selbstorganisierter Prozeß*). Diese hohen Schwingungen höre ich nicht nur im Klang, sondern ich fühle sie in (!) den Ohren und ganz konkret spüre ich sie als Vibrationen in den Gehörgängen. Ein ähnliches Empfinden habe ich, wenn meine Ohren stimuliert werden durch die Brillanz in den Stimmen anderer Sänger. Nach dem Hören solcher Stimmen, hat mein Gesang einen höheren Energielevel. Und auch bei vielen Vogelgesängen ist es nicht anders. Bei intensivem Vogelgesang erlebe ich es oft so, daß die zwitschernden, hochenergetischen Klänge regelrecht in meine Gehörgänge eindringen und dort zu intensiven Turbulenzen führen. Solche Erfahrungen haben immer eine unmittelbare Wirkung auf die vegetative Stimmungslage meines Organismus, ein Gefühl von lebendiger Erregung. (In den Gehörgängen wird durch akustische Impedanz in Röhren der Brillanz-Formant um 3000 Hz verstärkt.)

Als ich nun diese erstaunliche harmonische Klangfolge in den 6 Spektralklängen entdeckt hatte, was auch heißt, daß ich sie mir immer wieder angehört hatte, war ich schon allein von dieser Entdeckung ganz bewegt und auch körperlich erregt (Atmung, Herzschlag). Doch als ich endlich herausgefunden hatte, was die Zebrafinken tatsächlich singen, was für eine unglaubliche Modulation das ist, und dann das pure Klangextrakt in der einfachen Akkordfolge auf dem Klavier zum Klingen brachte, überkam mich eine solche Erregung, daß ich nicht nur Herzklopfen bekam, sondern mein Puls extrem hochging.

Als ich meiner Partnerin diese Harmoniefolge auf dem Klavier vorgespielt habe, ohne daß sie wußte, was das ist, sagte sie spontan: "Das klingt wunderschön!" Diese Folge von 6 Akkorden hat offenbar durch die besondere Art der Modulation einen starken Reiz nicht nur auf ihre Ohren ausgeübt, sondern auch unmittelbar auf ihr sensorisches Fühlen und ihr vorbewußtes Lustempfinden, vor jeder ästhetischen Bewertung oder Einordnung. Jede akustische Wahrnehmung wird im limbischen System gefiltert (angenehm / unangenehm - Angst / Lust), bevor sie in den Hörcortex gelangt. Soviel zum Zusammenspiel von Hören und Nervus Vagus. Analogien zur Stimmungslage im Gruppengesang der Zebrafinken sind wohl naheliegend.

→ "Der Regelkreis von Vokalisation-Vagusnerv-Hören" :

<https://www.entfaltungderstimme.de/pdfs/Regelkreis-Vokalisation-Vagusnerv-Hoeren.pdf>



Im Video-Anhang 3 ist diese Akkordfolge auf dem Klavier zu hören, neben dem Gesang der Finken. Im Spektrogramm des Klavierklangs ist zu sehen, daß es zwei übereinstimmende Teiltöne in allen Spektralklängen gibt: Eb5 und Bb4/A#4. Sie sind im Spektrum das Bindeglied zwischen den Klängen.

Im Bild links steht das Spektrum des Eb-Septakkordes neben dem Einzelklang Eb4. Vom Spektrum her könnte so der Ton eines Finken aussehen, den er mit 1 Membran erzeugt, der Grundton Es4 mit seinen Teiltönen (2.-6.). Den Septakkord Eb4/G/Bb/Db5 (4.-7.) dagegen analysiert das Spektrogramm des Overtone-Analyzers als einen Spektralklang mit virtuellem Grundton 2 Oktaven tiefer bei Eb2

- nach dem gleichen Modell, wie die Spektralklänge der Finken analysiert werden.

Der Overtone-Analyzer "hört" (analysiert / berechnet) das Spektrum des Septakkordes im Klang des Klaviers nach dem gleichen Modell wie unsere Ohren einen Klang in seinem Spektrum hören / analysieren / berechnen. Deshalb kann ich zu einem Septakkord gleich in welcher Lage den Grundton erkennen und hören und dann in meiner Stimmlage singen. Das gilt auch für jede Umkehrung des Septakkordes, wenn der Grundton nicht der Baßton des Akkordes ist (G/Bb/Db/Eb oder Bb/Db/Eb/G oder Db/Eb/G/Bb). Und genauso gut und mit ein bißchen Erfahrung kann ich

zu einem einzelnen Ton, den ich vom Klavier höre, einen Septakkord als Tonfolge singen (zu Eb: Eb-G-Bb-Db).

Zwei Klarstellungen:

1. Bei allen Wirbeltieren wird die Vokalisation vom 10. Hirnnerv, dem Nervus Vagus innerviert (rein sensorisch!), beim Menschen die Larynx (Kehlkopf) und bei den Vögeln die Syrinx. Es gibt keine direkte muskuläre Kontrolle von Larynx oder Syrinx durch den Cortex. Beim Menschen und bei den Vögeln gibt es nicht nur afferente Bahnen von der Cochlea ins Gehirn, sondern auch efferente Bahnen aus der Formatio reticularis im Stammhirn in die Cochlea, die eine effektive Grunderregung in der Cochlea erzeugen. Beim Menschen ist bekannt, daß diese cochleären Efferenzen die äußeren Cilien (Sinneshaarzellen) stimulieren, was als otoakustische Emission oder als elektrisches Erregungspotential gemessen werden kann.

Der Nervus Vagus innerviert neben Larynx/Syrinx und Gehörgang auch den Herzschlag, die Atmung, die Verdauung und die sexuelle Erregung.

2. Die sogenannten Obertöne liegen im realen physikalischen Klangspektrum nicht "oberhalb" oder "höher" als der sogenannte Grundton, sondern sind als Teilfrequenzen Elemente eines (1 !) Klangs, eines mehrdimensionalen, vielschichtigen und komplexen Gebildes in Raum und Zeit mit einer bestimmten Energie. Alle Frequenzen vom 1. bis zum 16./64./128. ... Teilton schwingen in (!) diesem einen (!) Klang. Die Spektralanalyse macht es möglich, über das Spektrogramm in das Innenleben und in die Innenstruktur eines Klangs hinein zu hören und hinein zu schauen. *Klang ist die Einheit von Raum und Zeit.* Und es gilt wie bei allen Systemen der Satz:

"Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile".

das Ohr als Spektrumswandler

Als *Spektrumswandler* ist unser Gehör in der Lage, die spezifische Struktur eines Spektrums umzuwandeln in eine Tonhöhenwahrnehmung, was offenbar auch für Singvögel gilt.

Die entsprechende Tonhöhe des Grundtons eines solchen Spektrums kann ich nach dem Gehör singen (in meiner Stimmlage), ohne sie vorher gehört zu haben und ohne zu wissen, welchen Ton ich singen soll. Dazu brauche ich keine Tonhöhenangabe, keine Definition dieses Tons und auch keine harmonische Analyse.

Nur ein kurzer Hinweis: Ich halte das gängige Modell vom Gehör als "Tonhöhen Rekorder" zumindest für beschränkt, wenn nicht für falsch, gemäß dem eine Information über die Tonhöhe über die Cochlea an das Hörzentrum im Gehirn weitergeleitet wird und dort in einer tontopologischen Anordnung weiter verarbeitet wird. So wenig wie es außerhalb des Gehirns und der Augen bestimmte Farben gibt, so wenig gibt es "da draußen" einzelne Töne mit einer bestimmten Tonhöhe. In der Natur gibt es keine Sinustöne, was wir als Töne wahrnehmen, sind Klänge mit einem bestimmten spektralen Muster.

"Es gibt 'da draußen' tatsächlich weder Licht noch Farbe, es gibt lediglich elektromagnetische Wellen; es gibt 'da draußen' weder Schall noch Musik, es gibt nur periodische Schwankungen des Luftdrucks." (Heinz von Förster)

(→ "Der Regelkreis von Vokalisation-Vagusnerv-Hören" :

<https://www.entfaltungderstimme.de/pdfs/Regelkreis-Vokalisation-Vagusnerv-Hoeren.pdf>)

Wie ich in diesem Video dokumentiert habe, brauchen auch die Zebrafinken (wie alle Singvögel) keine Bezeichnungen von Tönen, keine Vorstellung von Tonhöhen und keine Harmonietheorie. Gleich ob in Rufen oder im Gesang und unabhängig vom Entwicklungsniveau ihres Gesangs, sie orientieren sich alle an der Spektrumsstruktur ihrer Klänge. Sie wiederholen in unterschiedlichen Phasen ihrer Kommunikation exakt den gleichen Spektralklang; sie singen gleichzeitig mit einem anderen denselben Klang; sie nehmen ein Spektrum auf und führen es in einen anderen Klang hinein, der wiederum mit dem vorhergehenden Klang über bestimmte Teilfrequenzen in Beziehung steht; lassen auf einen D-Dur D7-Klang des einen Finken einen G-Dur-Klang eines anderen Finken folgen; bilden zu viert oder zu sechst zusammenhängende Sequenzen aus Spektralklängen, die so zusammengefügt und verwoben sind, daß alle Spektren aufeinander bezogen sind; reagieren modulierend während des Singens auf den Klang eines anderen; oder korrigieren sich sogar selbst, wenn die Koordination der beiden Membranen nicht funktioniert.

Über die spektrale harmonikale Ordnung des Klangs stehen also alle stimmlichen Äußerungen dieser Gruppe von Zebrafinken in einer Beziehung zu einander. Diese Klangordnung bildet eine Art *Matrix ihrer vokalen Kommunikation*, die nicht nur darin besteht, mit einem D5-Klang auf einen F#5-Klang zu antworten oder mit einem G5-Klang den D5-Klang eines anderen Finken weiterzuführen. Für die Konversation in der Gruppe scheint es ganz offenkundig nicht nur interessant zu sein, wer mit welchem Klang reagiert, wer auf diesen oder jenen antwortet oder wer einen neuen Klangimpuls setzt, sondern (vor allem?) auch *wie es klingt*, auf welche Weise intoniert wird, welche Farbe und welche Färbung ein Klang hat, heller oder dunkler, offener oder dichter, voller oder feiner, intensiver oder gedämpfter und vieles mehr. Das Besondere an den Spektralklängen der Singvögel ist, daß all diese Polaritäten, die verschiedensten Elemente an Klangfarbe und Klangqualität auch in einem einzigen Spektralklang zugleich vorhanden sein können, als Nuancen oder Facetten eines Klangs erscheinen können, wodurch *eine breite Palette an Ausdrucksmöglichkeiten* eröffnet wird.

Und um das auch nochmal klarzustellen: An dieser Art von Kommunikation oder auch von klingender Konversation sind Männchen und Weibchen offenbar völlig gleichberechtigt beteiligt. Im YouTube Video konnte ich sehen, wie sich mehrmals bei einem von den Weibchen die Kehle weitete, wenn es einen Laut produzierte. Im Spektrogramm gibt es keinen Unterschied zu erkennen, der auf spezielle Rufe der Weibchen schließen lassen könnte. Und aus dem Video "Zebrafinken (2) - Männchen und Weibchen" weiß ich, daß die Weibchen wunderbar klangvolle Spektralklänge im Repertoire haben.

Spektralklänge werden mit beiden Teilen der Syrinx erzeugt

Mit ihrer doppelten Syrinx haben alle Singvögel die Fähigkeit, Spektralklänge zu produzieren, die dann entstehen, wenn die Membranen beider Teile gleichzeitig schwingen und dabei mehr oder weniger miteinander koordiniert sind. Schon ganz junge Vögel im Nest erzeugen vielfarbige Spektralklänge ohne Grundton, die für uns in der Verlangsamung eher geräuschhaft klingen, die aber vermutlich für die Eltern eine Stimmung oder Erregung zum Ausdruck bringen. Selbst das Krächzen einer Krähe ist ein vielfarbiger Spektralklang und hört sich für mich in der Verlangsamung durchaus wie ein sehr eindrucksvoller ("wehmütiger") Glissando-Klang an, aber ohne irgendeine Information über Tonhöhen. Bei einer Krähe habe ich in der Verlangsamung die schönste 2-stimmige Quarte als *einen* Klang entdeckt, die ich je in der Musik gehört habe. (Was beweist, daß auch die Krähen von Natur aus zu den Singvögeln gehören.)

Bei den Lauten der Zebrafinken setzen meist beide Membranen gleichzeitig ein und erzeugen im Zusammenwirken von 2 Klängen 1 spezifisches Spektrum, das über das Gehör kontrolliert wird. Im Vergleich und der Analyse von 7 Spektralklängen (s. S. 11) habe ich herausgefunden, daß das Zusammenspiel von beiden Membranen auch differenzierter ablaufen kann. So kann Syrinx 1 (S1) mit einem kleinen aufsteigenden Glissando beginnen und S2 setzt dann im Verlauf des Hauptklangs ein. Je nach dem wird dadurch nicht einfach der Klang verstärkt, sondern die Intensität in verschiedenen Frequenzen kann sich verlagern. Es ist also nicht ein simpler Lautstärkeeffekt. Auch wenn beide Membranen scheinbar gleichzeitig beginnen, entsteht im Zusammenklang immer ein *flexibler bewegter Prozeß von Korrelation, Koordination, dynamischer Kumulation oder Abschwächung im Gefüge aller Teilfrequenzen*.

Beim vierten Spektralklang von den sieben ausgewählten Klängen wird es noch komplexer. S2 beginnt mit einer eigenen kurzen Wendung, die S1 allein in den Hauptklang führt. Dann setzt S2 auf dem Hauptklang wieder ein, wodurch das Gesamtspektrum etwas moduliert wird, und wenn S1 den Klang beendet, läßt S2 ihn noch etwas weiterklingen. (Dieses Wechselspiel von S1 und S2 kann man sich im Anhang 1 des Videos anhören.)

Ganz deutlich wird das komplexe Zusammenspiel beider Membranen in dem Beispiel der "Klangfolgen" (S. 21), wenn ein Fink seinen B $\flat$ 5 Klang so im Singen (!) moduliert, daß er mit dem Spektrum des E $\flat$ 5-Klangs eines anderen Finken in Übereinstimmung kommt. Beide Membranen lassen die übereinstimmenden Frequenzen von B $\flat$ und E $\flat$ weiterklingen, während andere in das andere Spektrum hinübergleiten - *ein Wunderwerk an Koordination* zwischen beiden Teilen der Syrinx in einem Klang.

Und gleich darauf kann man erleben, wie einem andern Finken die Koordination beider Membranen in seinem eigenen Spektralklang regelrecht mißlingt, obwohl er zweimal dazu ansetzt, d.h. er hört sofort, daß etwas nicht stimmt. (S. 22)

Spektralklänge in noch viel komplexerer Gestaltung gibt es u.a. bei Amsel, Rotkehlchen, Lerche und Star. Bei allen Vögeln sind sie in der Originallage wenn überhaupt nur als unspezifisches Zwitschern zu hören. Auch manche Klänge dieser Vögel, die unsere Ohren als Töne auffassen, sind in Wirklichkeit Spektralklänge, die mit beiden Teilen der Syrinx erzeugt werden.

Ein wahrer Meister der Spektralklänge ist die Dupontlerche (*Chersophilus duponti*), die mit reinen Spektralklängen ohne Grundton im vollen Klang modulierende Glissandi zaubern kann (z.B. aus einem D-Dur-Septnonakkord in einen D-Dur-Dreiklang $F\#/A/C/E \rightarrow D/F\#/A$). Oder: Erst erklingt in S1 ein C-Grundton singt und dann kommt mit S2 zu dem C eine As-Spektralklang hinzu, die Untermediante zu "C-Dur" und es erklingt ein As-Dur-Spektralklang ohne spezifische Tonhöhe. Wenn eine Amsel eine 2-stimmige Quinte, Terz oder Septime singt, sind das 2 eigenständige Schwingungen mit ihrem spezifischen Spektrum, die aber so aufeinander abgestimmt sind, daß beide Grundtöne im genauen Verhältnis einer Quinte (2:3), einer Terz (4:5) oder einer Septime (4:7) stehen und damit ein gemeinsames übereinstimmendes Spektrum aller Teiltöne bilden, das wiederum eine ganz eigene Klangfarbe haben kann. (s.o. das Spektrogramm vom Amselgesang) Die Amsel singt dann zwar eine reine Quinte oder eine "Naturseptime", aber das hört sich nicht nach einem 2-stimmigen Intervall an, ähnlich wie auf dem Klavier, sondern es schwingen alle andern Frequenzen dieser beiden Stimmen mehr oder weniger mit, und das ergibt ein wahres *Spektrum an Farben im Klang*.

Um sich einen Eindruck vom Klangcharakter und der Klangfarbe eines Spektralklang eines Zebrafinken zu verschaffen, kann man auf dem Klavier für einen Spektralklang mit dem Grundton D3 folgende Töne zusammen als Akkord spielen: $F\#/5/A/C6/D/E$. Das sind die Teiltöne 5/6/7/8/9.

Bei einem 2-stimmigen Spektralklang einer Amsel, könnte das die Septime F/E_b sein, die ich als meinen ersten entdeckten Spektralklang analysiert habe. Dazu spielt das Grundintervall $F3/E_b4$ und dazu 2 Oktaven höher die Töne $A5/B_b/C6/E_b/G$. Das sind von F3 die Teiltöne 5/6/7/9 und von E_b4 die Töne 3/4/5, wobei $E_b6(4.)$ und $G6(5.)$ identisch sind mit dem 7. und 9. Teilton von F3. Solche Arten von Spektralklängen ohne die Grundtöne verwendet Olivier Messiaen in seiner "Vogelmusik".

In den Vogelkundebüchern heißt es, daß manche Vögel auch 2-stimmig singen können aufgrund der Doppelsyrinx, was als eine besonders hohe Gesangkunst bezeichnet wird, ohne daß die Vogelgesangsforschung bisher sagen kann, was und wie die Vögel tatsächlich singen.

Nach meiner Analyse des Gesangs der Zebrafinken (s.u. die 5 Videos S. 10) und nach meinen bisherigen Forschungen ist es wahrscheinlich eher so, daß die natürliche und angeborene Form der Lautäußerung bei den Vögeln die Vokalisation mit beiden Membranen in beiden Teilen der Syrinx ist, in all ihrer Geräuschhaftigkeit, wie wir (!) sie zum Beispiel im Krächzen einer Krähe hören.

Die Spektralklänge der Zebrafinken zeigen nun, daß sie wie viele andere Singvögel im Zusammenspiel beider Membranen eine hohe Komplexität der Koordination erreicht haben, die eine *vielfarbige und differenzierte Kommunikation unter Artgenossen* (männlich und weiblich) ermöglicht.

Im echten 2-stimmigen Gesang, zum Beispiel bei der Amsel, wird in jeder Membran eine eigenständige Schwingung erzeugt, mit einem starken Grundton und seinem eigenen spezifischen Frequenzspektrum. Beide unabhängig voneinander schwingenden Stimmen können dennoch so in der Spektrumsstruktur korrespondieren und übereinstimmen, daß sie das gemeinsame Spektrum einer 2-stimmigen Quinte oder eines andern Intervalls bilden. Erstaunlicherweise können beide Stimmen (Membranen) aber auch unterschiedliche eigenständige Klangbewegungen vollziehen, wie gegenläufige Glissandi, unterschiedliche Arten von Intervall-Trillern, gleichzeitige Tenuto-Klänge und Gleittöne. All diese artistischen Gesangkünste bewegen sich aber in einem gemeinsamen und korrelierenden Spektrum, ebenso wie die echten Spektralklänge.

Aus meinem Unterricht als Gesangslehrer weiß ich, daß manche Menschen mit ungenügend trainierten Ohren Schwierigkeiten haben, von einem einzelnen Klavierton mit seinen geringen Frequenzspektrum eine Tonhöhe aufzunehmen und nachzusingen. Wenn ich ihnen aber mit voller farbiger Stimme (großes Spektrum mit sehr hohen Frequenzen von über 3000 Hz) den gleichen Ton vorsinge, können sie den spontan singen, auch wenn ihr Ton noch nicht im vollen Spektrum klingt. Wenn bei Menschen das Gehör vielfältig stimuliert wird durch Hörerfahrungen mit farbigem und hohem Spektrum, können sie sich besser in Klängen und Tönen orientieren, und dann entwickelt sich auch in ihrer Stimme ein größeres Klangspektrum. Und das hat wiederum eine Wirkung auf ihr Hörvermögen - *ein effektiver rückkoppelnder Wirkungskreis*. Dann kann jeder

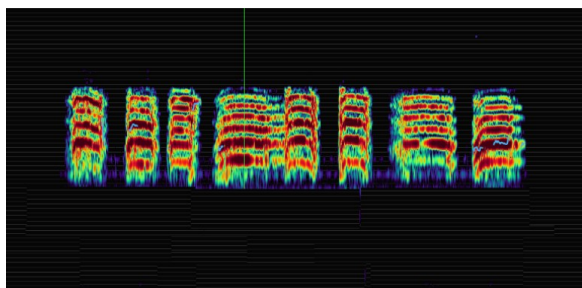
Mensch zu einem voll klingenden Grundton die "richtige" und "saubere" Quinte singen, ohne sich zu bemühen, eine Tonhöhe 5 Töne "höher" über dem "tieferen" Ton zu "treffen". Sind die Ohren effektiv durch den klingenden Grundton mit seinem ganzen Spektrum stimuliert, findet das Ohr unwillkürlich die Quint-Teiltöne im Klangspektrum des Grundtons (3.-6.-12.-24. Teilton), an denen sich die Stimme orientiert, wenn sie ihre Quinte in Korrespondenz mit dem Spektrum des Grundtons intoniert, als Quinte und nicht als eigenständigen Grundton. Das wird während (!) des Singens durch die Ohren ausbalanciert. Wenn die Korrespondenz erreicht ist, bekommen der Gesamtklang und die Stimmen des Grundtons wie der Quinte eine höhere Energie (!), mit der wiederum das vegetative Nervensystem stimuliert wird.

Menschen und Singvögel wie die Amsel können eine Quinte hören und singen, weil es in ihrem System Gehör/Vokalisation einen entsprechenden Schaltkreis gibt, eine angeborene Gestalt-auffassung für Klangstrukturen wie die Gestalt einer Quinte. Es ist der "nicht bewußte ratiomorphe Apparat" (Konrad Lorenz), der aus dem Klang das Schwingungsverhältnis 2:3 errechnet - das Muster oder die Gestalt "Quinte".

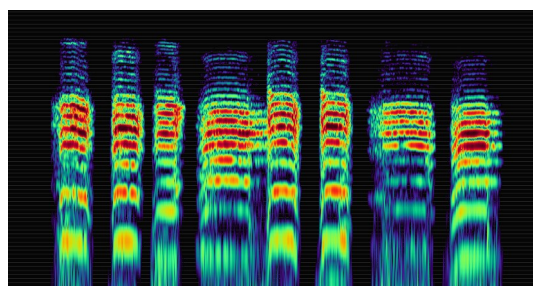
Unsere menschlichen Ohren orientieren sich in dem uns vertrauten Sing- und Hörbereich in erster Linie an dem gleichen Spektrumsbereich, in dem die Zebrafinken ihr Kernspektrum haben, zwischen dem 4. und 8. Teilton, in dem die Oktave, die Terz, die Quinte und die Septime als Teilfrequenzen schwingen.

Und auch Singvögel brauchen für ihr Gesangskünste, für das Lernen ihrer Gesänge und für die Kommunikation mit ihren Artgenossen die *Stimulation durch die schnellen Schwingungen der hohen Frequenzen*, vor allem in den Frequenzbereichen, die noch über ihrem Gesangsspektrum liegen, die auf jeden Fall schneller schwingen als das, was unser menschliches Hörvermögen zu erkennen vermag und was unsere Hörkonzepte als Tonhöhen und Tonfolgen kartographiert und definiert. Die intensiven Schwingungen in komplexen Spektrumsmustern - das ist die entscheidende *Nervennahrung* zur energetischen Aufladung des vegetativen Nervensystems (Vagusnerv), des Hormonhaushalts und aller Gehirnfunktionen vom Stammhirn bis zum Cortex.

Klang - Gestalt



der pure Klang



die Vielfalt der Spektralklänge

Klanggestalten - atmosphärische Gebilde in Raum und Zeit

ohne Definition, ohne Einordnung, ohne Tonhöhe

Die gefilterten Spektralklänge ohne Grundklang wirken wie das Konzentrat der Rufe der Zebrafinken - Klangereignisse - der reine Klang.

Die kompletten Spektralklänge in ihrer ganzen Vielfalt wirken lebendiger, farbiger, vielschichtiger, ausdrucksstärker, individueller - es sind Vokalisationen von Lebewesen.

Der Klang ist mit seinem Basisklang nicht nur grundierter, er hat auch eine Dimension von Tiefe im mehrdimensionalen Sinn. Und er hat durch die hohen Frequenzen über dem Hauptspektrum von 6 bis über 16 kHz eine energetische Aura feinsten Stimulationen für die Ohren und das vegetative Nervensystem. Daneben verstärken die leicht geräuschhaften und rauen Anteile im Spektrum den Ausdruck von Erregung sowie körperlicher und vegetativer Gestimmtheit.

siehe und höre auch die Videos:

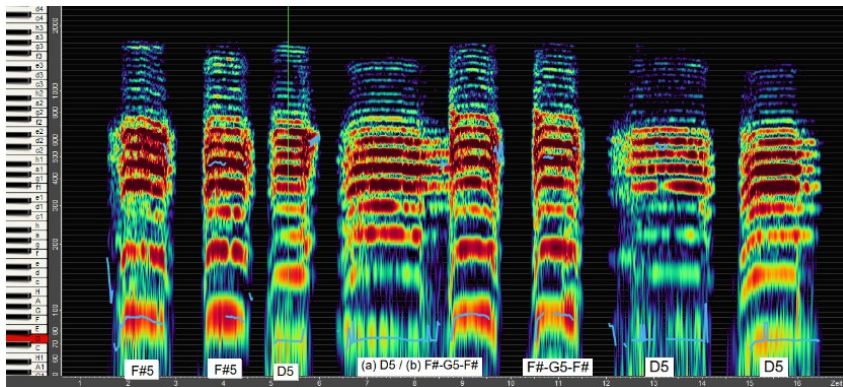
- Zebra Finches (2) : male and female singing together : <https://youtu.be/FOg1O3CogZ4>
- Zebra Finches (3) - sounds and calls in a group of Zebra Finches : <https://youtu.be/txgzXi3lCG0>
- Zebra Finches (4) - sounds in a group of 6 male Zebra Finches : <https://youtu.be/gnK3RHUTAYE>
- Zebra Finches (5) - solo songs of 3 different Zebra Finches : https://youtu.be/dZ_6TB21yOc

Anhang

- 1) 7 Spektralklänge
- 2) 8 Sequenzen von Spektralklängen verschiedener Zebrafinken (in Englisch S. 17)

7 Spektralklänge: F#5 – F#5 – D5 – D5-G5 – G5 – D5 – D5

einzelne Klänge - zusammengestellt in der Reihenfolge ihres Erscheinens

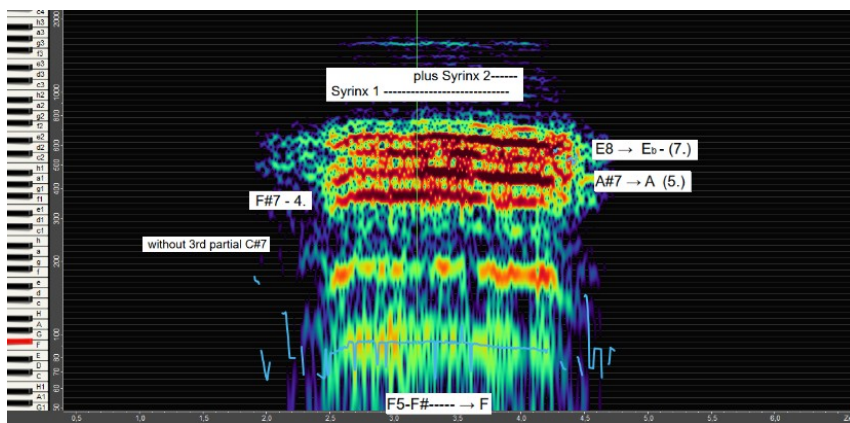


Diese Spektralklänge habe ich aus den insgesamt 77 Lauten in der "Konversation" der Zebrafinken aus mehreren Gründen ausgewählt:

- Sie haben ein markantes klares Spektrum, um die Eigenschaften und Qualitäten der Spektralklänge von Zebrafinken darstellen und analysieren zu können.
- Bis auf die mittlere Klangverbindung D5-G5 werden alle Klänge von einzelnen Finken produziert, ohne daß ein anderer Fink in den Klang hinein mit seinem Ruf reagiert.
- Diese 3 Klänge mit ihren Grundtönen D5, F#5 und G5 kommen am häufigsten vor.

Auch wenn die einzelnen Klänge nicht in direktem Zusammenhang auftauchen, sondern aus verschiedenen Phasen stammen, erkennt man in ihren Grundtönen und in ihrem Spektrum, daß es sowohl zusammenhängende Grundklänge gibt als auch gemeinsame Strukturen und Ordnungen im Frequenzspektrum. Es ist eine Art *Matrix*, nach der Einzelemente und ein System geordnet und verbunden sind: die Elemente jedes Klangs (Teilfrequenzen / Grundton), jeder Klang als spezifisches Schwingungssystem (Struktur / Dynamik / Wechselwirkung der Teilfrequenzen), die harmonikalen Muster in allen Klängen (Oktave-Quinte-Terz...) und das System der Kommunikation / "Konversation" unter diesen Finken (Rezeptivität und Aktivität im Hören und Singen / Erregungsdynamik / Rollen in der Gruppe). Alles steht miteinander und untereinander in Verbindung und in wechselseitiger Beziehung.

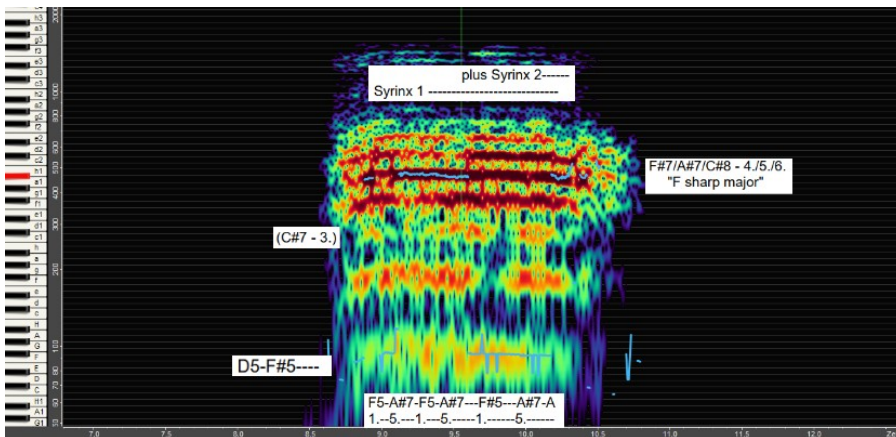
1) F#5 – Halbton-Glissando F#→F-----



partials: F#5(1.)-F#6(2.)-F#7(4.)-A#7(5.)-C#8(6.)-E8(7.)

Syrinx 2 setzt etwas später genau im gleichen Spektrum ein und verstärkt 5. und 7. Teilton

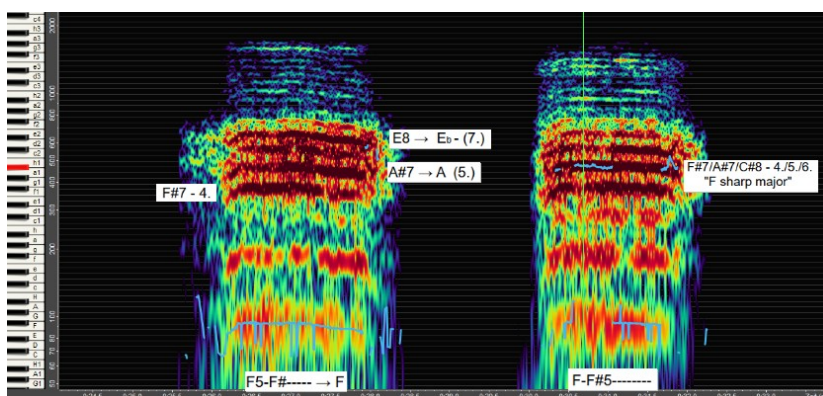
2) F#5



Syrinx 2 setzt auch in diesem Klang später ein. Der 5. Teilton A#7 ist so intensiv, daß der Tonhöhenmarker des Overtone-Analyzers mehrmals zwischen Terz und Grundton hin und her springt.

Mit dem 4.-5.-6. Teilton erklingt faktisch ein Fis-Dur-Dreiklang. Das sind die 3 Teiltöne im Spektrum, die am wichtigsten für die Bestimmung des Grundtons und der klingenden Tonhöhe eines Klangs sind. Wenn man nur die 3 Frequenzen in einem Filter hört, erkennt unser Ohr eindeutig den richtigen eigentlich tieferen Grundton.

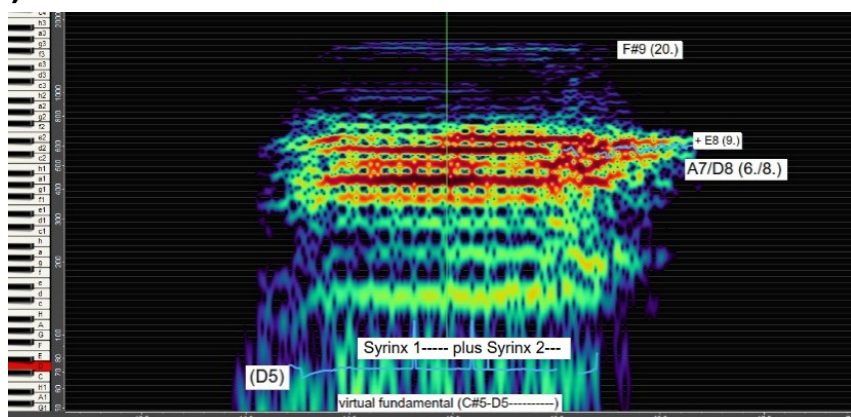
beide F#5 Klänge im Vergleich



Beide F#5-Klänge nebeneinander mit gleichem Grundton und fast gleichem Spektrum: Der zweite Klang hat eine andere Klangfarbe, weil der 5. Teilton intensiver ist (Terz A#7) und das Spektrum

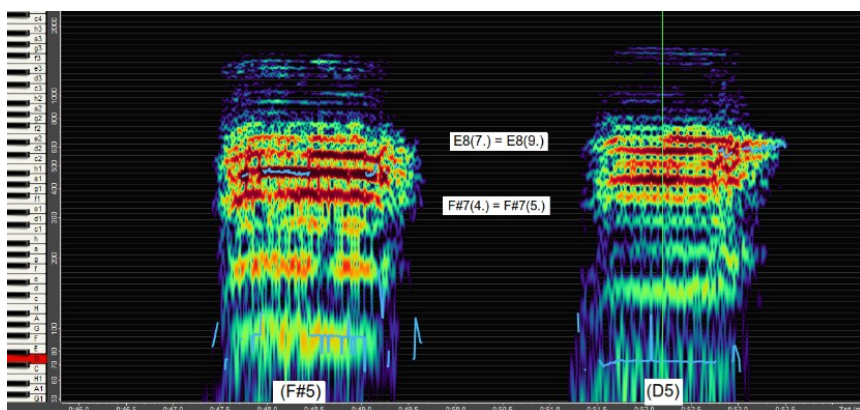
einen stärkeren Brillanz-Formanten bei 12 kHz hat (um F#9). Vor allem durch die von Anfang an starke Terz wirkt dieser Klang voller und runder.

3) D5 mit virtuellem Grundton



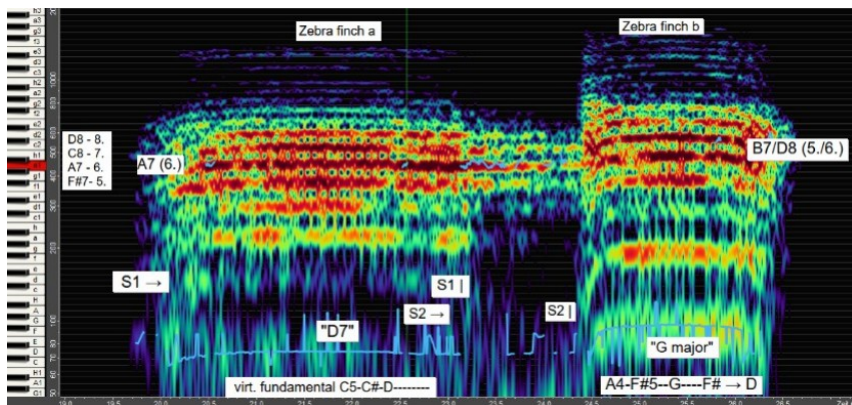
D5 – ein virtueller Grundton, der physikalisch nicht existiert
Nur die dominanten Frequenzen A7 und D8 (6./8.) repräsentieren den Grundklang. Wenn auch Syrinx 2 beginnt zu schwingen, wird auch noch der 9. Teilton (E8) stärker.

F#5 und D5 im Vergleich



Die 2. Oktave F#7 von F#5 ist die Terz von D5 - F#7(4.) = F#7(5.) - und die Septime E8 von F#5 ist die None von D5 (E8 ist die doppelte Quinte zu D6 - D:A:E = 2:3-4:6-6:9.)
Obwohl der D5-Klang ein höheres Spektrum hat, ist er deutlich als tieferer Ton zu hören, sogar dann wenn man im Filter nur die Frequenzen von F#7 bis C#8 hört. Beim ersten Klang ist der Grundton F#5 nur schwach und bei D5 kaum zu hören.

4) D5--- G5---



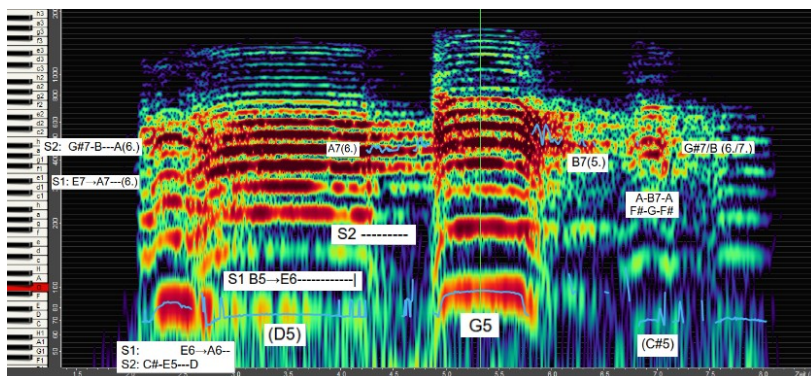
Erst singt "Zebrafink a" einen D5-Klang und dann "Zebrafink b" einen G5-Klang. Beide Klänge sind keine Tenuto-Töne, sondern das D5 beginnt bei C5 und gleitet über C# ins lang gezogene D, während der Klang des anderen Zebrafinken die Quinte A des D5-Klanges aufnimmt und von A4 über F#5 zum G gleitet und am Ende über F# zum D5 hinabgleitet -

a: C5-C#-D----- A7 - - **b:** (A4)-F#5--G----F#→D.

Das D5 ist eindeutig ein virtueller Grundton und beim G5 ist der 1. Teilton sehr schwach. Das klingende Spektrum von D5 ist F#7(5.)-A7(6.)-C8(7.)-D8(8.), der lauteste Teilton ist die Quinte A7. Beim G5 bilden G7(4.)-B7(5.)-D8(6.)-F8(7.) das Hauptspektrum, in dem die Terz (B7) und die Quinte (D8) die dominanten Frequenzen sind. Der 8. Teilton von D5 (D8) entspricht dem 6. Teilton (D8) von G5.

Im ersten Klang ist faktisch ein Septakkord zu hören ("D7" - D5 mit der Septime C8), im zweiten deutlicher ein "G-Dur" Dreiklang und in der Abfolge erklingt die Quarte D5-G5. Da die Quinte von D5 sehr "dominant" ist, hören alle musikalischen Ohren in dieser Klangbeziehung sofort einen D-Dur Dominantseptakkord (D7), der in die Tonika G-Dur führt. Musikalisch wird diese Verbindung dadurch noch interessanter, daß der klingende D7-Klang faktisch ein Quintsextakkord ist (die 1. Umkehrung eines Dominantseptakkordes mit der Terz im Baß), F#/A/C/D, dessen verminderte Quinte F#/C in die Auflösung der G-Dur Terz (G/B) der Tonika strebt.

die komplette Klangsequenz D5 - G5



Um diese harmonische Klangbeziehung etwas einfacher darstellen zu können, habe ich zunächst weggelassen, was davor und danach passiert. Kurz gesagt macht "Zebrafink a" ein kleines Intro zu dem langen D5-Klang, und nach der Antwort von "Zebrafink b" gibt es noch einen kurzen C#5-Klang mit Echo. Es kann sein, daß ein anderer Zebrafink sich damit noch kurz einmischt in die klingende Konversation von "a" und "b", oder aber "Zebrafink a" macht noch eine kleine Nachbemerkung zu der interessanten Klangfolge.

Das Erstaunliche, was ich bei der genauen Analyse entdeckt habe, war, daß es am Beginn nicht irgendein "Intro" ist, sondern daß zuerst "Syrinx 2" *) beginnt mit C#-E5--D und dann "Syrinx 1" zu dem E5 mit E6→A6--- beginnt. Bei Syrinx 2 klingt das komplette Spektrum des Grundtons, besonders aber die Quinte B7(6.). Bei Syrinx 1 ist die Frequenz E7→A7(6.) am stärksten, die dann als Quinte den F#/A/C/D-Klang dominiert.

Noch faszinierender ist, daß da, wo ich das "A7(6.)" eingefügt habe, ein kleiner Bruch im Spektrum zu erkennen ist und die Intonation minimal tiefer wird, was nur heißen kann, daß hier Syrinx 2 wieder einsetzt und sich in das D5-Spektrum einfügt. Nachdem Syrinx 1 geendet hat, schwingt Syrinx 2 weiter mit einem hörbaren "D-Dur"-Dreiklang, in den hinein "Zebrafink b" seinen G5-Klang intoniert. (eine Analyse des Spektrums von D5 im Anhang oben)

*) "Syrinx 1" ist in diesem Klang die Nebenstimme.

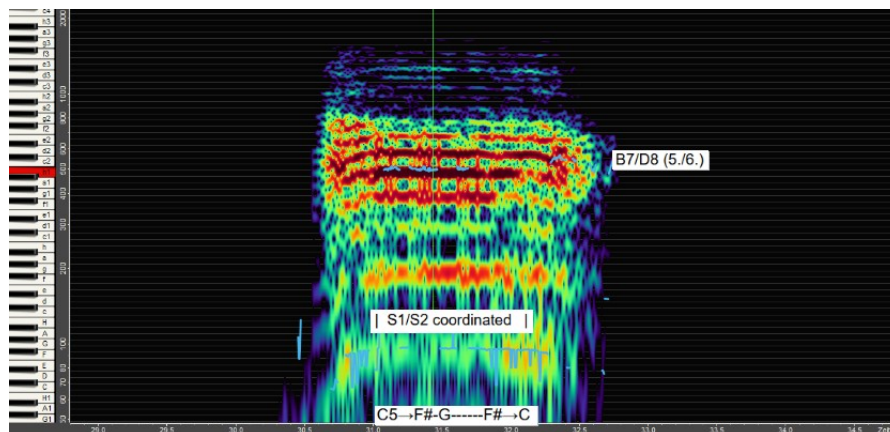
Der Beginn mit dem E5 macht in einem harmonischen Gefüge Sinn, denn das E ist die doppelte Quinte zu D (D/A/E). Und das anklingende C#5-E---D kann man auch als Umkreisung des Grundtons D hören, also von A-Dur mit Terz und Quinte nach D-Dur. Die Klänge in Syrinx 1 und 2 finden also durch ein Quintverhältnis zueinander und ineinander, ein Vorgang, den ich im Vogelgesang immer wieder beobachtet und gehört habe.

Die Nachbemerkung mit dem tiefen C# kommt vermutlich schon von "Zebrafink a", denn das C#5 als virtueller Grundton am Ende ist das gleiche virtuelle C#5 wie zu Beginn. Im hohen Klang-

spektrum ist dieser kurze Klang die Terzfigur F#/A-G#/B-F#/A. Danach ist noch ein sehr leises Echo bei C#5 wahrnehmbar.

Im Ganzen ist die Klangfolge: C#5-E--D----- G--- C#. Wäre das G5 nur 3 Hz höher ständen beide Klänge im exakten Verhältnis von 3:4 und wir würden eine ganz "reine Quarte" hören, die aber durch die Glissandi am Beginn und am Ende von G5 eh nicht so klar wäre. Die ganze Figur dauert im Original 0.3 s. So schnell und so genau können die Ohren und die Stimmen von Zebrafinken reagieren und sich aufeinander abstimmen!

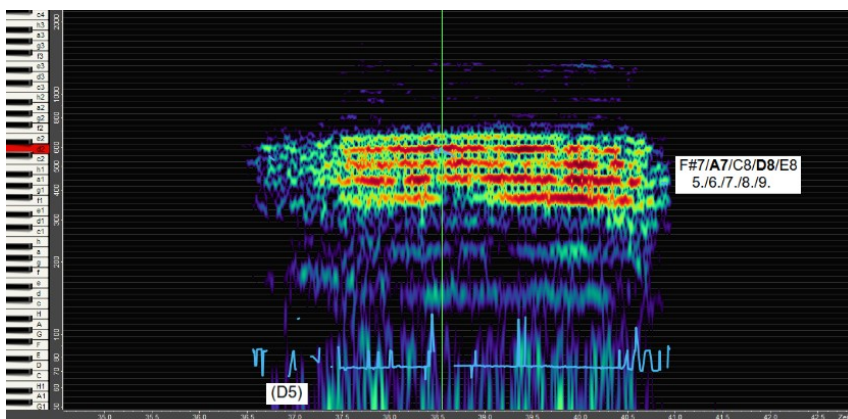
5) G5 – C5→F#-G-----F#→C



Syrinx 1 und Syrinx 2 beginnen nicht exakt gleichzeitig und sind erst auf dem Hauptklang G5 koordiniert. Die intensivsten Frequenzen sind die Terz B7 und die Quinte D8.

Es ist ein sehr farbiger und kräftiger Klang. Wenn ich ihn höre, singe ich spontan dazu die Oktave G3 in meiner Stimmlage. Ganz leicht ist es auch, die Terz zu intonieren, in meiner Lage ist das B3.

6) D5 – virtueller Grundton

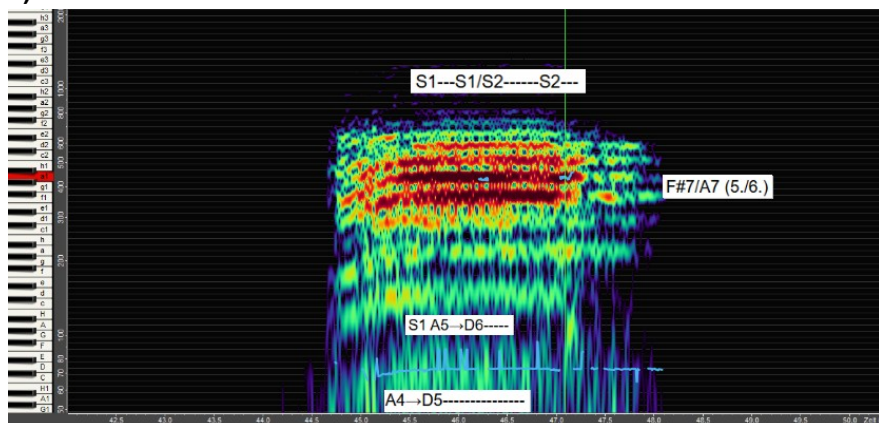


Ein Spektralklang mit einem dichten Spektrum in hoher Lage vom 5. bis zum 9. Teilton und tiefem Grundton D5, der im Filter nur sehr leise wahrzunehmen ist. Alle Teilfrequenzen haben ein feines Vibrato, was dem Klang einen besonderen Charakter gibt.

Harmonisch gehört und gelesen ist es ein Septakkord in der 1. Umkehrung mit der Terz im Baß, ein Quintsextakkord. Es ist ein tiefer Klang mit schillerndem Farbspektrum. Der Grundton ist

dennoch zu erkennen und ich kann leicht einen Septakkord dazu singen: D3-F#-A-C4, mit der Naturseptime, die anders intoniert wird als auf dem Klavier.

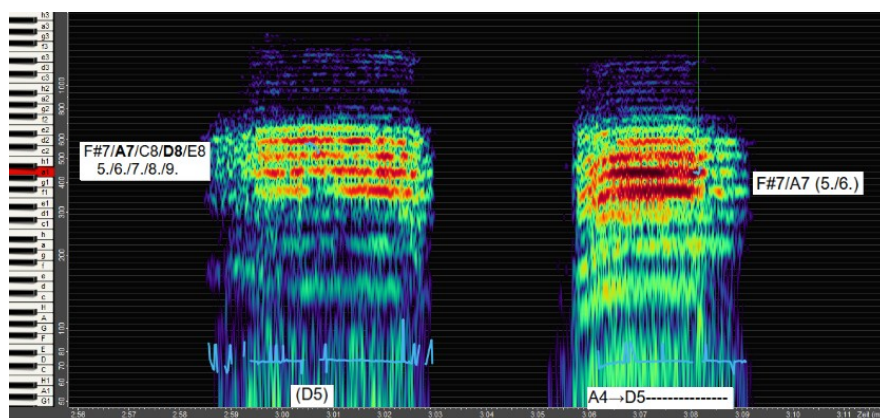
7) D5



An diesem Spektralklang ist interessant, daß im Spektrogramm deutlich zu erkennen ist, das er mit beiden Stimmköpfen produziert wird. Erst beginnt Syrinx 1, zu sehen an der 1. Oktave A5→D6----, dann kommt im vollen Klang Syrinx 2 dazu und schwingt weiter, wenn Syrinx 1 endet, wie man bei D6 sieht. Es ist also kein Nachklang, sondern ein echter Klang mit Markierung des Grundtons D5. Weiter ist in diesem Spektrogramm zu erkennen, daß der alleinige Klang von Syrinx 2 gar nicht so stark ist. Der zusammenklang von S1 und S2 wirkt aber nicht einfach doppelt so laut, sondern viel stärker und voller. D.h. das koordinierte Zusammenwirken zweier eigenständiger Klänge führt zu einer *kumulierenden Wechselwirkung* im Gesamtspektrum. Die Schwingungssysteme von S1 und S2 mit ihrer jeweiligen Spektrumsstruktur und -dynamik ergänzen, verstärken und stimulieren sich rückkoppelnd, so daß das ganze System Klang ein höheres Energieniveau erreicht.

Dieser D5-Klang, aus der "Dominante" A4 in die "Tonika" D5, ist ein Spektralklang, der stark vom Grundton dominiert wird, obwohl der nur ganz schwach klingt. Das liegt an der sehr intensiven Terz F#7 und der Quinte A7. In diesem Klang ist ganz selbstverständlich der D-Dur-Dreiklang in der 2. Oktave zu hören, wie es sich für jeden gut intonierten und voll gesungenen Klang gehört (bei menschlichen Sängern).

D5 und D5 im Vergleich

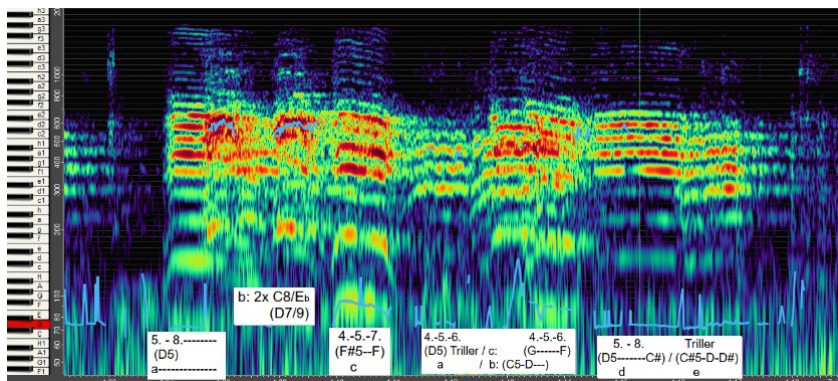


Der erste D-5 Klang ist veritabler Spektralklang mit eindrucksvollen Klangfarben. Im Hören habe ich den Eindruck, ich würde in einen weiten tiefen Raum hineinhören, der ganz erfüllt ist von mannigfaltig schillernden Farbschwingungen.

Der zweite D-5 Klang wirkt auf mich tiefer, erdiger, sonorer, wenn er aus der Tiefe (vom A4) kommt und mit Quinte und Terz seinen Raum als Dreiklang voll ausfüllt.

8 Sequences of Spectral Sounds from several Zebra Finches

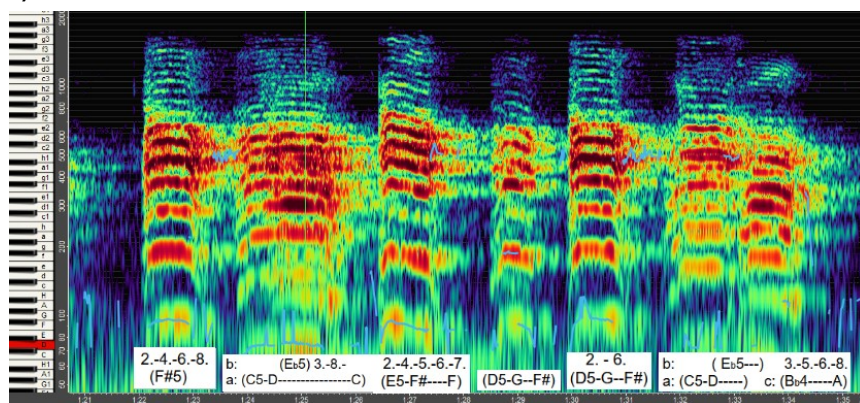
1) six Zebra Finches in one sequence



Of course I can't say for sure which Zebra Finch sings what. I based the assignment on the type of sound figure and the intensity. The two D5 trills could also be from the same finch. You can hear a very attractive modulation in this sound sequence: D major - (D) dim7 - F#7-F - D - G - D, although the diminished seventh chord (F#/A/C/E_b) sounds a bit noisy.

5. - 8.----- (D5) a-----	b: 2x C8/E _b (D7/9)	4.-5.-7. (F#5-F) c	4.-5.-6. (D5) Triller / c: a / b: (C5-D---)	4.-5.-6. (G----F) b: (C5-D---)	5. - 8. (D5----C#) / (C#5-D-D#) d	Triller e
--------------------------------	-----------------------------------	--------------------------	---	--------------------------------------	---	--------------

2) nine calls



A sequence of 7 calls with the following basic tones:

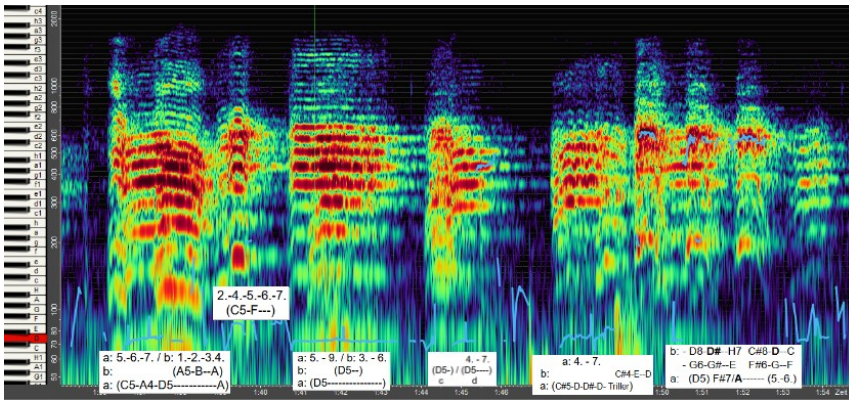
F#5 – D5 – F#5-F – G5-F# – G5 – D5 – Bb4-A.

The 1st, 3rd and 5th calls appear to come from the same finch. With the 4th call, with the same pitch and sound as the 5th, you can hear how different it can sound when the spectral sound has a different structure, which is not due to the volume.

On the 2nd and 6th calls (D5) another finch sings an Eb5, which results in a little more intense rubbing sound. Maybe the birds don't even see this as a mistake, but instead have a special appeal for them. It is interesting how the last call on the low A seems to comment on the somewhat dissonant sound of the other two finches.

2.-4.-6.-8. (F#5) a: (C5-D-----C)	b: (Eb5) 3.-8.- (E5-F#----F)	2.-4.-5.-6.-7. (D5-G--F#)	2. - 6. (D5-G--F#)	b: (Eb5---) 3.-5.-6.-8. a: (C5-D-----) c: (Bb4----A)
---	---------------------------------	------------------------------	-----------------------	---

3) 12 mostly simultaneous calls



On the first call, ZFa begins with C5-A4-B5-- (5.-6.-7.), to which ZFb sings a low A-B4-A (4.-9.). The F#7 (5.) of D5 corresponds exactly to the F#7 (6.) of B4, as do A7(6.) and A7(7.).

In the third call, both finches are in the same spectrum of D5 with a difference in the distribution of partials.

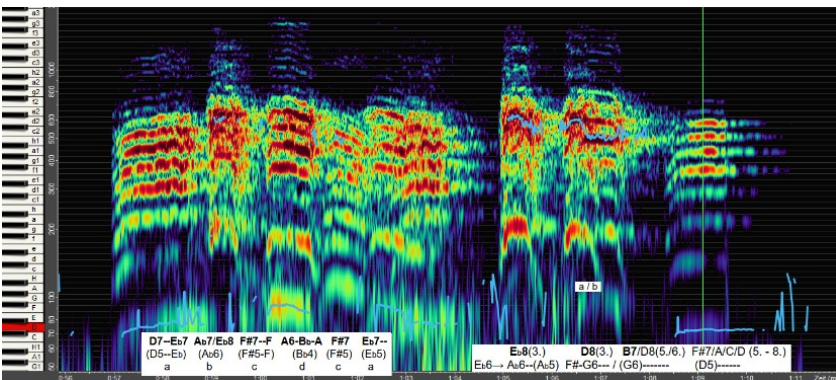
At ZFa are the 5.-9. strongest, with ZFb it is the 3.-6. partial tone.

At the fifth call you hear the figure C#-D-D#-D-E-D due to the interaction of 2 finches.

In the last figure, ZFa holds the A7 while ZFb produces three intense calls: D8-D#-B7 (2x) and C#8-D-C.

a: 5.-6.-7. / b: 4.-9.	2.-4.-5.-6.-7.	a: 5.-9. / b: 3.-6.	4.-7.	a: 4.-7.	b: - D8-D#-H7 C#8-D-C
b: (A4-B--A)	(C5-F--)	b: (D5--)	(D5-) / (D5-----)	b: C#4-E-D	- G6-G#-E F#6-G-F
a: (C5-A4-D5-----A)		a: (D5-----)	c	a: (C#5-D-D#-D- Triller)	a: (D5) F#7/A----- (5.-6.)

4) four ZF in harmonical "Conversation"



Although the core spectrum of all 4 Zebra Finches is in the same range between C7 and C8, the calls sometimes sound higher and sometimes lower because the virtual and actual fundamental tones have a different position: D5-D# - G#6 - F#5 - A4 - F#5 - D#. In the spectrogram you can clearly see how one spectrum emerges from the previous one and continues to the next.

A kind of melody is formed in the sequence of sounds: C#-D#-D#-F#-E#-A#-F#-D#. After 2 somewhat loud, noisy sounds, a nice, clear spectral sound follows with D5 as a virtual grunt tone.

D7--Eb7	Ab7/Eb8	F#7--F	A6-Bb-A	F#7	Eb7--	Eb8(3.)	D8(3.)	B7/D8(5./6.)	F#7/A/C/D (5.-8.)
(D5--Eb)	(Ab6)	(F#5-F)	(Bb4)	(F#5)	(Eb5)	Eb6--> Ab6--(Ab5)	F#-G6--- / (G6)---	(D5)---	
a	b	c	d	c	a				

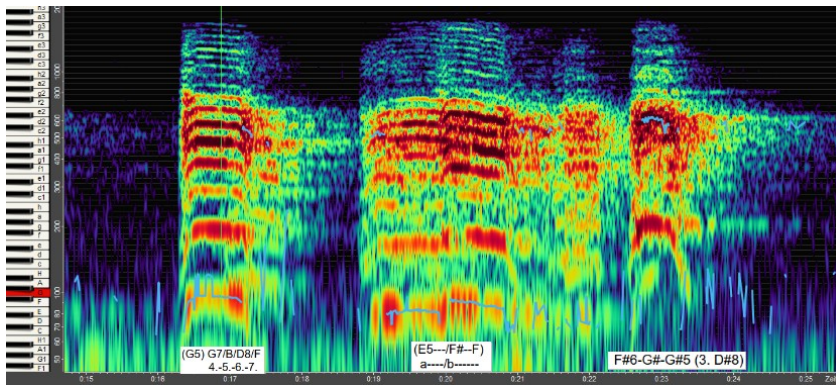
harmonic order:

Eb7 - Ab - F#7 - Bb - F#7 - Eb

basic tone sequence with Glissandi: D-->Eb5--/ Gb-Ab6--Gb / F#5-->F / Bb4-->A-Ab / F#5-->F / D-Eb5---

For a detailed description and analysis of this particular sequence, see below p. 20

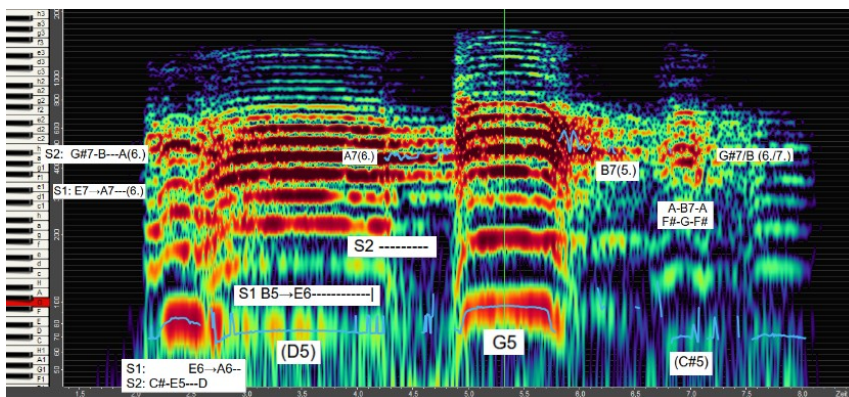
5) two Zebra Finches together E5 → F#5



- 1) G5 spectral sound: partials G7/B/D8/F (4.-5.-6.-7.)
- 2) ZFa: E5---- / ZFb: F#5—F – The spectrum of E5 (a) flows smoothly into the spectrum of F#5 (b), which can also be seen in the high spectrum G8-C#9.

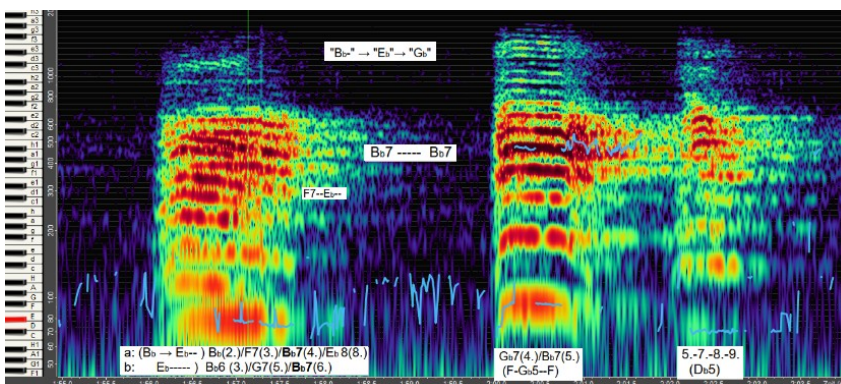
F#8(9.) → F#8(8.)
 E8(8.) → E8(7.)
 D8(7.) → C#8(6.)
 B7(6.) → A#(5.)
 a b

6) two ZF D5 / G5



ZFa: (D5)----- ZFb: G5--- : detailed analysis see “7 spectral sounds” (p. 12)

7) Modulation Bb → Eb while singing



A wonderful example of how elegantly these Zebra Finches can react to each other in the sound spectrum.

a: (Bb → Eb--) Bb(2.)/F7(3.)/Bb7(4.)/Eb 8(8.)
 b: Eb----) Bb6 (3.)/G7(5.)/Bb7(6.)

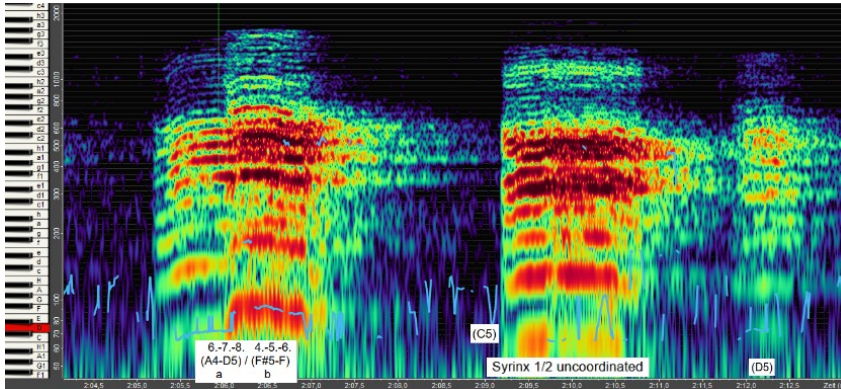
ZFa starts on a B $\flat$ 4 spectral sound and then when ZFb starts with an E $\flat$ 5 spectral sound, ZFa also modulates sliding into an E $\flat$ 5 sound until its B $\flat$ 7 as the 8th partial matches the B $\flat$ 7 (6.) of ZFb. As you can see in the spectrogram, the two fifths of the B $\flat$ 4 sound clearly slide into the E $\flat$ 5 sound, the F7(6.) to the E $\flat$ 7(4.) and the double fifth C8(9.) to the B $\flat$ 7(6.).

G $\flat$ 7(4.)/B $\flat$ 7(5.) 5.-7.-8.-9.
(F-G $\flat$ 5--F) (D $\flat$ 5)

And the modulation goes even further. The next finch follows the "B flat major" and "E flat major" with the B $\flat$ 7 with another very loud B $\flat$ 7, which is now the intense third (5.) of G $\flat$ 5 – a sophisticated modulation from "E flat major" to "G flat major", which the following finch continues after "D flat major" (fifth to G flat major).

What amazingly musical ears the Zebra Finches have!

8) two ZF: successful modulation D major → F sharp major / one ZF: failed coordination of S1 and S2

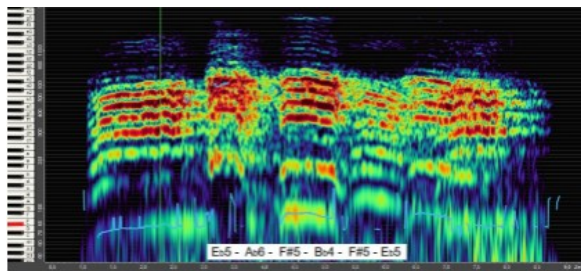


After a short break there is another musically well-known modulation into the third, from "D major" to "F sharp major", a relationship of thirds, called "mediant". The D5 and F#5 are connected via the F#7 (5./4.). ZFa also comes from "A major" (A4-D5---) and ZFb slides from F#5 to F5.

After this musically and vocally high-quality performance, a small disaster follows. The next Zebra Finch fails to coordinate both parts of the Syrinx. Syrinx 1 begins with B $\flat$ 4-C5--- and 0.02 s later Syrinx 2 begins with B4, which results in a clear discord. After 0.7 s the finch starts again, but again he doesn't manage to get both membranes to oscillate in the same spectrum.

Just as the Zebra Finch was previously able to adapt to the other finches by hearing while singing (B $\flat$ to E $\flat$), this finch hears when singing that the sound is not right and tries to start again to correct itself. We humans can also correct the intonation of a tone via our ears while singing in less than 0.5 s.

Analysis of Sequence 4 - four ZF in harmonical "Conversation"



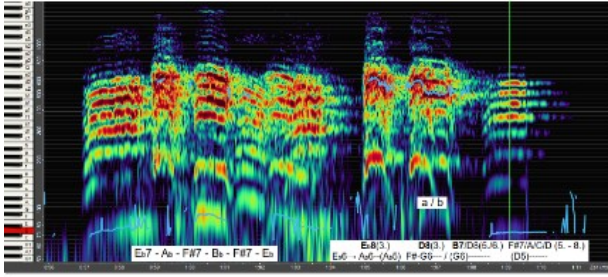
4 Zebra Finches sing 6 spectral sounds in this sequence: Eb7 - Ab - F#7 - Bb - F#7 - Eb.

The first and last sound is probably sung by the same finch as well as the two F#7s by another finch. All sounds have a slight glissando movement in the fundamental tones: D5→Eb- / G $\flat$ -Ab--G $\flat$ / F#---→F / B $\flat$ 4→A-A $\flat$ / F#5---→F / D-Eb---.

The first sound is actually a seventh chord made up of the partials Eb7/G/B $\flat$ /D $\flat$ 8 (4.-7.) with the virtual

fundamental at Eb5. The sound starts at C#/D5 glides to Eb5 and develops a strong vibrato. Another Fink reacts to this with the "lower fifth" Ab5 (6.-Eb8 = 8.- Eb5), a strong noisy sound. This is followed by another seventh chord, F#5 (4.-7.), which slowly slides a semitone lower to F5. All 3 sounds move in the same spectrum, but then from the fourth finch comes a sound with the virtual fundamental note B $\flat$ 4, which sounds significantly lower than the others and slides even lower to Ab4. Then the 3rd Fink comes again with his slightly quieter F#5, into which the 1st Fink again sounds his Eb5 with a moving figure in the upper voice: C8-C#-C-B7-B $\flat$.

The harmonic order of this sequence can be analyzed as follows: fifth relationship E flat major - A flat major / (A flat major = G sharp major) from G sharp major to the double subdominant F#7 and then not to B major, but to the upper mediant A# major (= B $\flat$ major) / back to F#7 and further into the lower mediant D# = E flat major. This could well be the idea of a 19th century composer.



The complete sequence

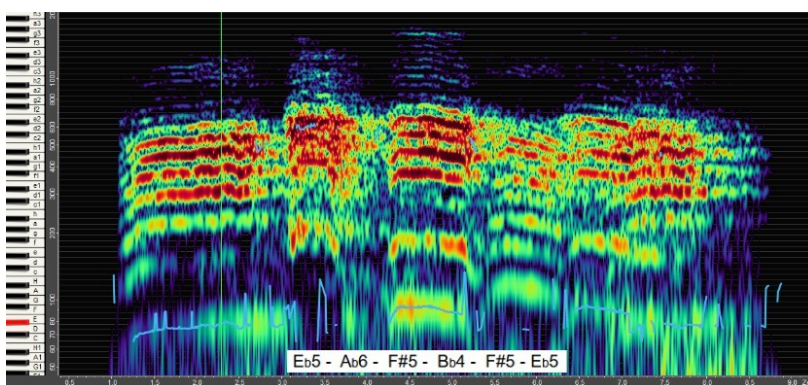
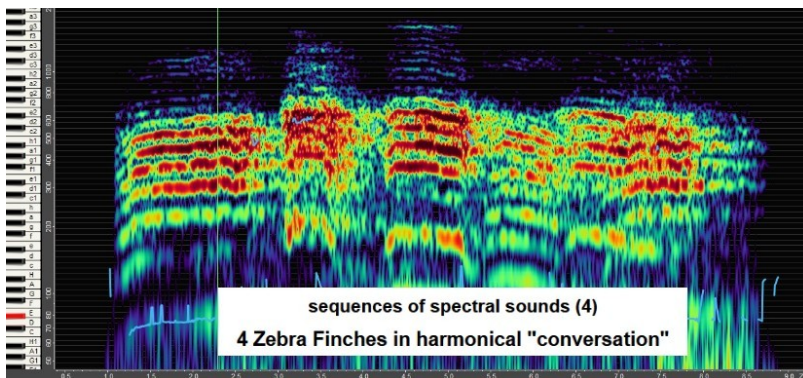
After the 6 spectral sounds, the 2nd finch appears again with two intense sounds Eb8 (3. of Ab6) and D8 (3. of G6). And there is another Fink in precise intonation with B7, the third of G6. The conclusion of this sequence is a 6th (?) Fink with a strangely low D5, after "G major" so "D major".

Eb8(3.) D8(3.) B7/D8(5./6.) F#7/A/C/D (5. - 8.)
 Eb6→ Ab6--(Ab5) F#-G6--- / (G6)----- (D5)-----

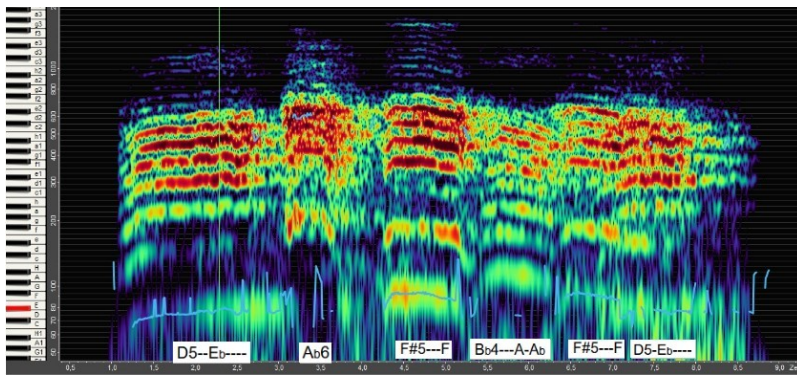
The entire fundamental tone sequence is: Eb5 - Ab6 - F#5 - Bb4 - F#5 - Eb5 - Ab6- G6/G6 - D5

In the sequence of the spectral sounds, the modulation cannot naturally be heard as clearly or pure, on the one hand because the spectral sounds always have a slightly noisy quality to our ears due to the density of the partial frequencies, and on the other hand because the sounds of the birds are always in motion, in the semitone Glissandi, in smaller up or down movements or in a stronger vibrato. They are extremely lively vocalizations that express a vegetative state of excitement (Vagus nerve→Syrinx) and at the same time have a stimulating effect on the basic vegetative excitation via the hearing (ear→syrinx→vagus nerve). This process of interaction applies to the ear/syrinx/vagus nerve system in each individual bird, to the effect from bird to bird, and to the acoustic field and arousal level of the entire group.

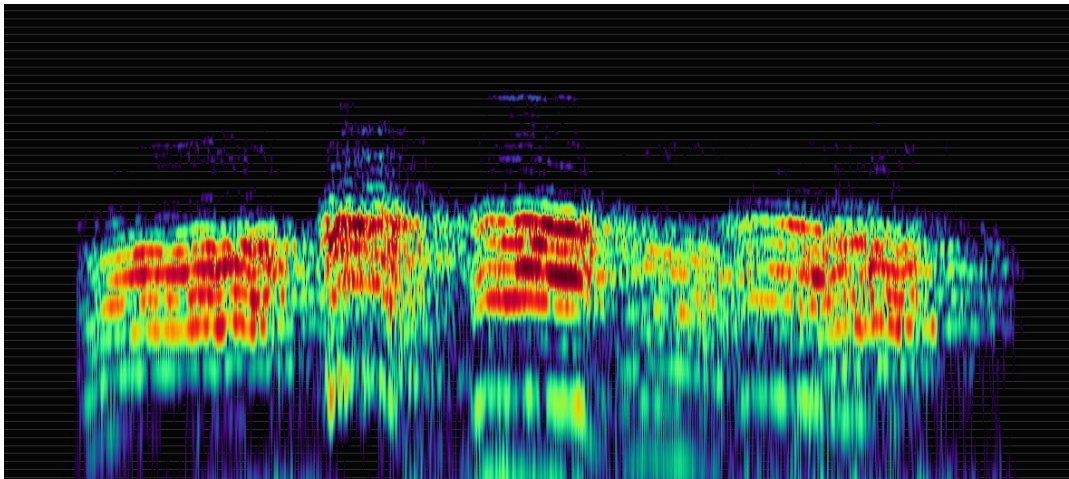
alle Spektrogramme zu Sequenz 4: vier ZF in harmonikaler "Konversation"



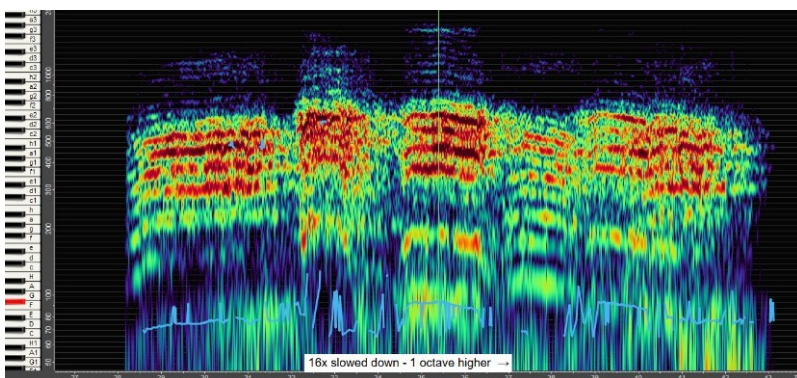
virtuelle Grundtöne



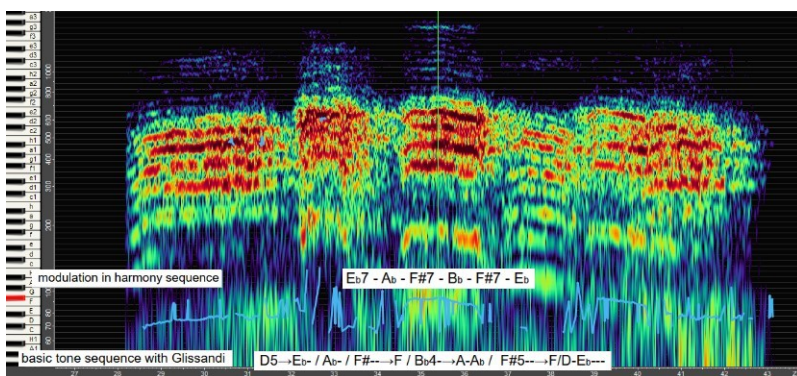
Grundtöne mit Glissandi



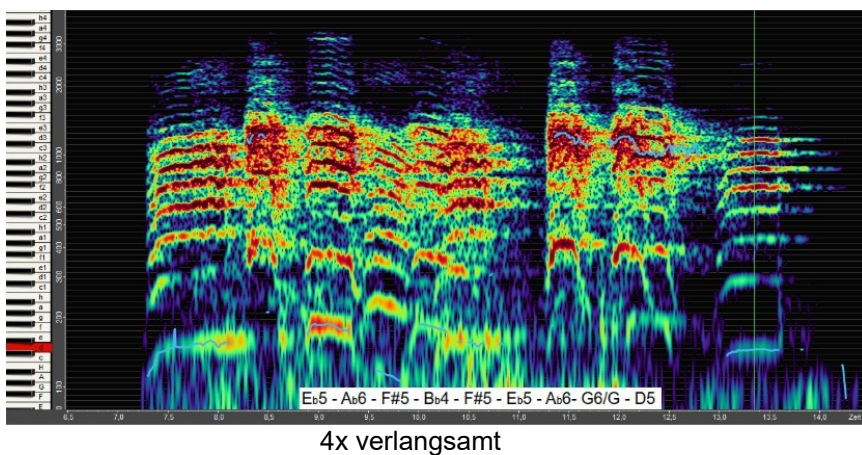
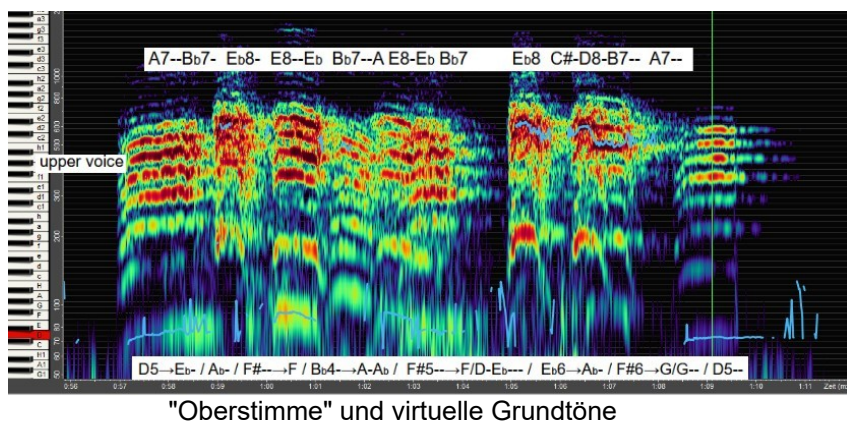
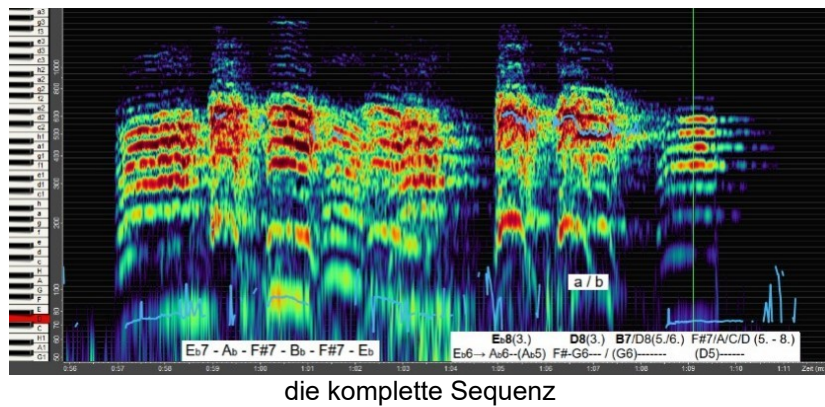
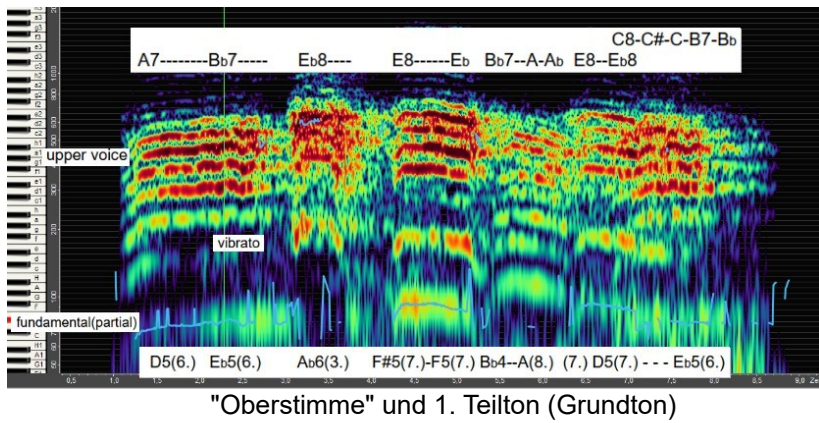
16x verlangsamt

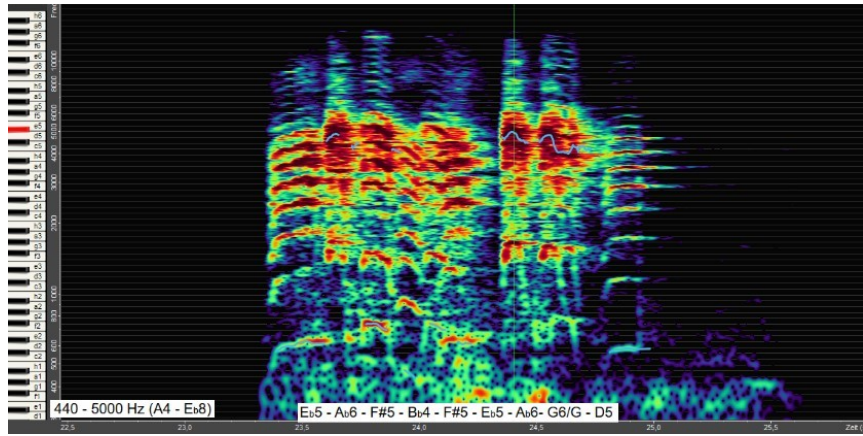


16x verlangsamt - 1 Oktave höher



Modulation in der Harmonie- und der Grundtonsequenz





Original bei 440 - 5000 Hz (A4 - Eb8)

