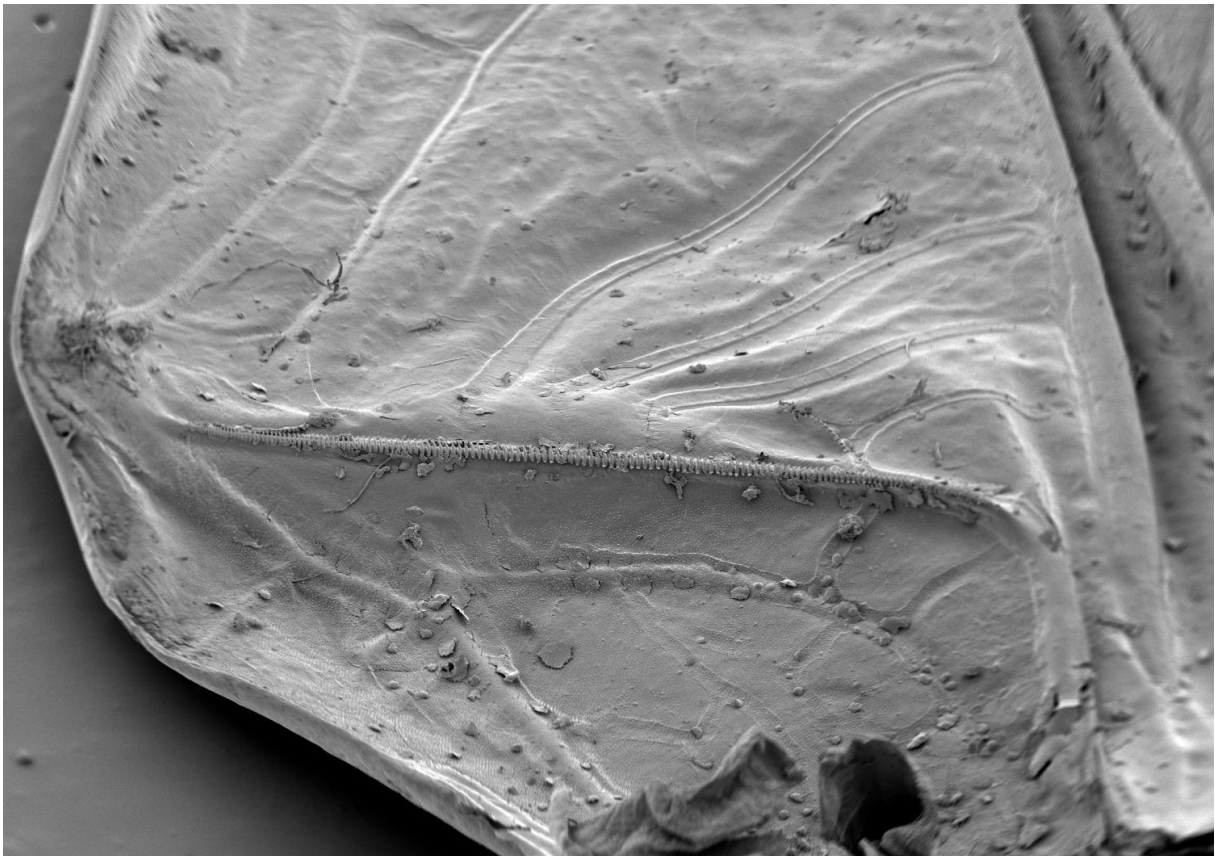


Einflüsse auf die Frequenz des Lock- gesangs männlicher Steppengrillen (*Gryllus assimilis*)



Gymnasium Münchenstein

Maturarbeit 2023/24

Tim Zimmerli

Betreut von Dr. Loris Scandella

Abstract

Männliche Steppengrillen üben einen Lockgesang, der weibliche Steppengrillen anlocken soll, mit einer bestimmten Tonhöhe aus. Die Erzeugung dieses Tons und dessen Frequenz ist ein Zusammenspiel vieler Eigenschaften der Steppengrille und deren Umgebung. Die Flügel werden über eine komplexe Mechanik durch das Aneinanderstreichen einer Schrillkante über die sogenannten Schrillzähnen in Schwingung versetzt, welche dann schlussendlich zu einer Schwingung der Luft führen, welche für uns als Ton wahrgenommen werden kann. In dieser Arbeit wurden die Einflüsse dreier Faktoren auf die dabei dominante Frequenz untersucht. Die für die Klangerzeugung spezialisierten Organe einer Steppengrille wurden unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht und vermessen. Ausserdem wurden Mikrophoneaufnahmen des Lockgesanges gemacht. Ein Vergleich mehrerer Aufnahmen bei zwei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen hat gezeigt, dass die Steppengrille bei einer erhöhten Temperatur auch mit einer leicht höheren Frequenz ihren Lockgesang ausübt. Durch die Vermessung der einzelnen Schrillzähnen und einen Vergleich mit der dominanten Frequenz während eines Bewegungsablaufs der Schrillkante über diese Schrillzähnen wurde festgestellt, dass die Breite der Schrillzähnen höchstens einen sehr geringen Einfluss auf die dominante Frequenz hat. Des Weiteren wurde untersucht, ob sich die dominante Frequenz in der zweiten Hälfte eines Bewegungsablaufs verändert im Vergleich zu der dominanten Frequenz in der ersten Hälfte dieses Bewegungsablaufs. Es wurde gezeigt, dass die dominante Frequenz im Laufe der Schliessbewegung abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beiden Flügel unterschiedlich gross sind und die grössere Masse des Flügels, der in der zweiten Hälfte des Bewegungsablaufs Frequenz angehend ist, nach einem physikalischen Modell die dominante Frequenz negativ beeinflusst.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	4
2	Einleitung.....	5
3	Theoretischer Hintergrund.....	6
3.1	Steppengrille.....	6
3.2	Stridulation im Allgemeinen.....	6
3.2.1	Stridulation verwandter Grillen.....	7
3.2.2	Syntax des Zirpens.....	8
3.3	Rolle der Temperatur beim Zirpen.....	8
3.4	Einfluss der Grösse des Flügels – Ein physikalisches Modell.....	9
3.5	Schalldruck.....	10
3.6	Fast Fourier Transform - FFT.....	10
3.7	Mikroskope.....	11
3.7.1	Lasermikroskop.....	11
3.7.2	Rasterelektronenmikroskop.....	11
4	Material & Methoden.....	12
4.1	Aufbereitung der Steppengrille für die mikroskopischen Aufnahmen.....	12
4.2	Aufnahmen mit dem REM.....	13
4.3	Zählung und Vermessung der Schrillzähnen.....	14
4.4	Aufnahme des Zirpens.....	15
4.4.1	Vorbereitung - Haltung der Steppengrille.....	15
4.4.2	Aufnahme des Zirpens mit dem Mikrofon.....	16
4.4.3	Untersuchung der dominanten Frequenzen innerhalb einzelner Silben auf einen Zusammenhang zum Grössenverlauf der Schrillzähnen.....	17
4.4.4	Auswertungsverfahren für den Zusammenhang zwischen Flügelgrösse und dominanter Frequenz.....	20
5	Resultate.....	21
5.1	Untersuchung der REM-Bilder.....	21
5.1.1	Zählung und Vermessung der Schrillzähnen.....	23
5.1.2	Grössenverlauf der Schrillzähnen.....	24
5.2	Resultate der mikrophonischen Aufnahmen des Zirpens.....	26
5.2.1	Bestimmung der dominanten Frequenz.....	26
5.2.2	Einfluss einer Temperaturänderung auf die dominante Frequenz.....	27

5.2.3	Veränderung der dominanten Frequenz aufgrund unterschiedlicher Breiten der Schrillzähnen.....	29
5.2.4	Möglicher Unterschied der dominanten Frequenz aufgrund verschieden grosser Flügel	30
6	Diskussion.....	31
7	Schlusswort	33
8	Literaturverzeichnis	34
9	Abbildungsverzeichnis	35
10	Anhang.....	36
10.1	Protokolle.....	36
10.1.1	Zählung und Vermessung der Schrillzähnen	36
10.1.2	Aufnahmen des Zirpens mit dem Mikrofon	40

1 Vorwort

Ich bedanke mich herzlich bei Dr. Loris Scandella für die Betreuung dieser Arbeit und die Hilfe bei der Themenwahl. Seine interessanten Inputs haben mir geholfen, eine Fragestellung zu formulieren. Trotzdem hat er mir Raum gelassen, meine eigenen Interessen einzubringen und seine Anregung, eine Arbeit im Bereich der Bionik zu verfassen, hat bewirkt, dass ich mich verstärkt für die Bioakustik interessiert habe. Ich wollte verstehen, wie solch kleine Insekten im Sommer ihre unüberhörbaren Klänge erzeugen. Durch eine genauere Einarbeitung in die Stridulation und dann genauer noch in das Zirpen der Grillen bin ich auf die Idee dieser Arbeit gekommen.

Ausserdem möchte ich mich bei Monica Schönenberger und Evi Bieler von der Nanoimaging Abteilung der Universität Basel bedanken. Sie haben sich für meine Arbeit interessiert und mir die Möglichkeit und die nötige Hilfestellung gegeben, mit einem Lasermikroskop und einem Rasterelektronenmikroskop zu arbeiten, was mein persönliches Highlight dieser Arbeit darstellt.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Paul Etter aus dem Biologiestock des Gymnasium Münchensteins. Er hat mir die Tiere für die Untersuchungen mit den Mikroskopen zur Verfügung gestellt, und mir geholfen, diese dafür vorzubereiten.

Ich bestätige, dass ich diese Arbeit selbständig durchgeführt habe. Fremdbeiträge sind als solche klar bezeichnet. Verwendete Hilfsmittel und Quellen sind nach den Regeln des wissenschaftlichen Arbeitens in den angefügten Verzeichnissen aufgelistet.

Ort, Datum: Münchenstein, 19.10.2023

Unterschrift:



2 Einleitung

Paarungsreife, männliche Steppengrillen (*Gryllus assimilis*) üben einen Lockgesang aus, um weibliche Steppengrillen anzuziehen. Des Weiteren verfügen Grillen im Allgemeinen noch über einen Gesang, der eine Paarung einleiten soll und über einen Rivalengesang, der sich gegen andere männliche Steppengrillen richtet (1). Der Lockgesang ist jedoch der prägnanteste dieser Gesänge. Der Klang dieses Lockgesangs ertönt mit einer bestimmten Frequenz. In dieser Arbeit soll der Einfluss drei verschiedener Faktoren auf die Frequenz des Lockgesangs männlicher Steppengrillen untersucht werden

Die Art und Weise der Klangerzeugung bei Grillen wird Stridulation genannt. Diese kommt bei verschiedenen Gliederfüssern vor, wie zum Beispiel bei Spinnen, Krebsen oder Insekten, zu denen die Grillen gehören. Die Stridulation beschreibt eine Klangerzeugung, bei der zwei spezialisierte Körperpartien durch ein Gegeneinander- oder Übereinanderreiben Töne erzeugen. Eine dieser Körperpartien nennt man «Pars stridens» oder Schrillleiste. Sie besteht aus einer Fläche, auf der kleine Zähnnchen aneinandergereiht sind. Bei Grillen befinden sie sich auf der Unterseite der Vorderflügel. Über diese Schrillleiste streicht ein sogenanntes «Plektrum», das auch Schrillkante genannt wird und sich am inneren Rand der Vorderflügel befindet (2). Während einer Schliessbewegung der beiden Vorderflügel streicht jeweils die Schrillkante des einen Vorderflügels über die Schrillleiste des anderen Flügels. Es liegt stets der rechte über dem linken Vorderflügel (3). Dadurch werden die Vorderflügel in Schwingung versetzt, welche am Ende einen hörbaren Klang erzeugt. Dahinter liegen physikalische Mechanismen. Es bestehen verschiedene Modelle, die diese näher beschreiben.

Für diese Arbeit wurde der Lockgesang männlicher Steppengrillen mit einem Mikrofon aufgenommen. Die Aufnahmen wurden auf die jeweiligen Amplituden ihrer Frequenzen analysiert. Es wurden Aufnahmen bei zwei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen getätigt. Dadurch sollte festgestellt werden, ob die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Frequenz des Lockgesangs hat.

Mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops wurde die Anzahl, die Struktur und die Breite der Schrillzähnnchen einer männlichen Steppengrille erforscht und deren Einfluss auf die Frequenz des Lockgesangs untersucht. Als Grundlage dient die Hypothese, dass ein breiteres Schrillzähnnchen einen grösseren Widerstand auf die Schrillkante darstellt und somit die Flügelbewegung verlangsamt, was eine niedrigere Frequenz zur Folge haben könnte.

Es ist bekannt, dass zu Beginn einer Schliessbewegung die Vibration des linken Flügels, und gegen Ende die Vibration des rechten Flügels dominant ist (4). Ausserdem wird davon ausgegangen, dass der linke Vorderflügel tendenziell kleiner ist als der rechte Vorderflügel (5). Dementsprechend hätte der linke Vorderflügel auch eine geringere Masse. Deshalb wurde überprüft, ob sich die dominante Frequenz im Laufe einer Schliessbewegung ändert, was darauf hindeuten würde, dass die Masse und somit auch die Grösse eines Flügels einen Einfluss auf ebendiese Frequenz hat.

3 Theoretischer Hintergrund

3.1 Steppengrille

Die Steppengrille (*Gryllus assimilis*) gehört zu den Langfühlerschrecken. Sie ist Teil der Familie der Echten Grillen (*Gryllidae*) und der Gattung *Gryllus*. Bekannt ist sie vor allem für ihre Nutzbarkeit als Futterinsekt. Weibliche Steppengrillen werden bis zu 35 mm gross, männliche ein wenig kleiner. Man kann zwischen den Männchen und den Weibchen gut unterscheiden, weil die Weibchen eine lange, schwarze Legeröhre haben. In freier Natur kommt die Steppengrille in Mexiko, Texas, Südflorida, Jamaika und auf den Westindischen Inseln vor. Die adulten, männlichen Steppengrillen zirpen überwiegend, um die Weibchen anzulocken. Das Zirpen dient aber auch der Einleitung einer Paarung oder der Verteidigung des eigenen Reviers gegenüber anderen Männchen (6).

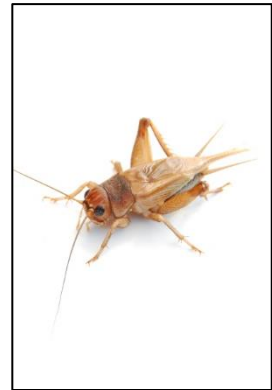


Abb. 1 Adulte, männliche Steppengrille

3.2 Stridulation im Allgemeinen

Der Begriff «Stridulation» kommt vom lateinischen «stridere» und bedeutet so viel wie «zischen», «knirschen» oder «knarren». «Ein Stridulationsorgan setzt sich zusammen aus einer Pars stridens (einer meist aufgerauhten oder Kamm-ähnlichen Fläche) sowie einem Plektrum (einer Kante). Durch das Gegeneinander- oder Übereinanderstreichen entsteht das Geräusch.» (1).

3.2.1 Stridulation verwandter Grillen

Unter den Grillen sind vor allem drei verschiedene Gesänge bekannt. Zum einen gibt es einen Rivalengesang, der anderen Männchen vorgetragen wird. Zum anderen gibt es einen Gesang, der der Anlockung von Weibchen dient. Dieser ist der wichtigste und lauteste Gesang. Des Weiteren gibt es noch einen Gesang, der eine Paarung einleiten soll.

Die Feldgrille (*Gryllus campestris*) stellt zur Stridulation zunächst ihre beiden Vorderflügel auf. Der rechte Vorderflügel ist dabei stets über dem linken Vorderflügel, obwohl beide Vorderflügel identisch ausgestattet sind. Auf der Unterseite der Vorderflügel befindet sich jeweils eine Schrilleiste, welche auch als Schrillader bekannt ist. Sie besteht aus einer Aneinanderreihung von kleinen Schrillzähnen (Siehe Abb. 2). Im Durchschnitt befinden sich darauf 140 Schrillzähnen. Die Schrillkante befindet sich am inneren Rand des Vorderflügels. Zur Anwendung kommt die Schrillkante des linken Vorderflügels. Die Stridulation wird durch eine Einwärtsbewegung der Vorderflügel vollbracht. Bei dieser Einwärtsbewegung klemmt die Schrillkante bei jedem Schrillzähnen ein. Dadurch baut sich an dem jeweiligen Schrillzähnen ein Druck auf. Das abrupte Lösen des Drucks bewirkt eine Schwingung im Vorderflügel, genauer, der sogenannten Harfe des Vorderflügels (8,9).

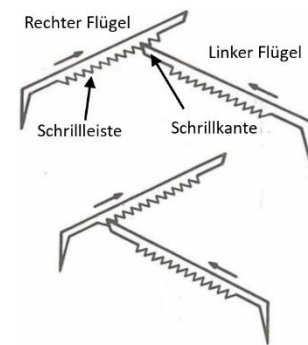


Abb. 2 Visualisierung der Schließbewegung der beiden Vorderflügel. Darauf zu sehen ist die Schrillkante und die Schrilleiste mit den einzelnen Schrillzähnen.

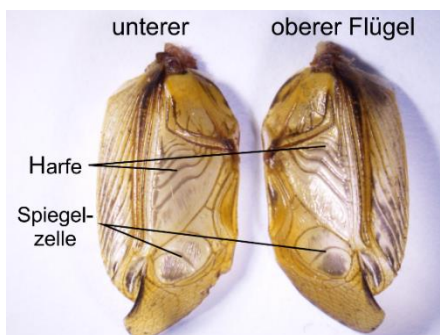


Abb. 3 Fotografie der Vorderflügel der Mittelmeer-Feldgrille (*Gryllus bimaculatus*)

Bei der Harfe handelt es sich um eine dünne, aber steife Membran, welche mit unterstützenden Venen durchzogen ist. Die Form der Harfe ist einem Dreieck ähnlich. Beide Vorderflügel verfügen über eine Harfe (7). Es ist nicht selbstverständlich, dass die männliche Steppengrille ihre Vorderflügel so bewegt, dass «die wiederholten Anschläge der Schrillkante gegen die Schrillzähnen die Harfe in ihrer Eigenfrequenz schwingen lässt (und nicht auf eine andere Weise)» (8).

Koch et. al untersuchen in einer Publikation im Journal of Comparative Physiology (1988) (8) drei hypothetische Modelle, welche die genaue Mechanik beschreiben, die zu einer harmonischen Schwingung der sogenannten Harfe führt, welche schlussendlich für die Schwingungen der Luft verantwortlich ist.

Eines dieser Modelle hält sich an die Theorie eines Idiophons. Ein Idiophon, auch «Selbstklinger» genannt, ist ein Musikinstrument, welches durch die Eigenschwingung des Körpers Töne erzeugen kann (10). Dazu gehören auch Ratschen welche als Vorbild für diese Theorie gelten. Das Resonanzsystem bekommt die zur Schwingung benötigte Energie aus den wiederholten Anschlägen eines Plektrums auf die Zähnen, sei dies bei der Ratsche oder der Grille. Jeder Anschlag der Schrillzähnen auf den Oszillator bewirkt eine Schwingung. Dementsprechend würde die Anzahl an Schwingungen beziehungsweise Perioden mit der Anzahl der betroffenen Schrillzähnen übereinstimmen. Es müssen jedoch nicht per se alle Schrillzähnen

angeschlagen werden. Die Frequenz würde damit von der Geschwindigkeit der Flügelbewegung abhängen. Je schneller die Flügelbewegung wäre, umso grösser wäre die resultierende Frequenz.

3.2.2 Syntax des Zirpens

Eine einzelne Schliessbewegung der Flügel entspricht einer Silbe (11). Eine Silbe besteht aus mehreren Impulsen. Impulse bilden die kleinste hörbare Einheit. Mehrere Silben bilden einen Vers, der auch «Chirp» genannt wird. Eine Aneinanderreihung von Versen bildet eine Strophe (Sequenz 1. Ordnung, siehe Abb. 4). Mehrere Strophen bilden einen Gesang (Sequenz 2. Ordnung) (12).

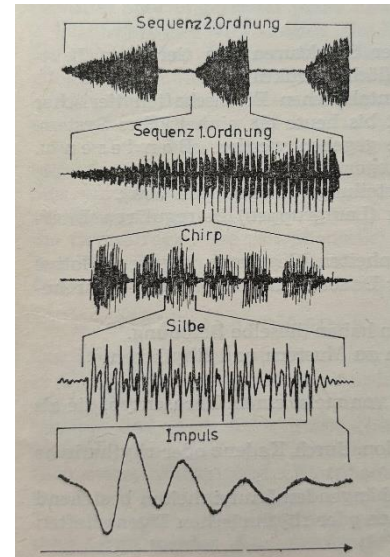


Abb. 4 Schwingungsdiagramme der verschiedenen syntaktischen Einheiten des Zirpens

3.3 Rolle der Temperatur beim Zirpen

Aus der Chemie ist bekannt, dass die Erhöhung der Temperatur eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit mit sich bringt. Die Schliessbewegung bei Grillen wird durch Muskelkontraktion gesteuert, deren Prozess einen chemischen Teil beinhaltet. Deshalb kann es sein, dass die chemische Reaktion schneller abläuft und dadurch die Geschwindigkeit des Flügels zunimmt (9). Es ist aber auch bekannt, dass dieser Einfluss bei der Feldgrille, welche sehr ähnlich wie die Steppengrille ist, sehr gering ist (11).

3.4 Einfluss der Grösse des Flügels – Ein physikalisches Modell

Die Frequenz (f) lässt sich im Allgemeinen durch den Quotienten aus der Anzahl Schwingungen (n) in einem gewissen Zeitabschnitt (Δt) berechnen. Für $n = 1$ ist $\Delta t = T$. T entspricht also der Dauer für eine Periode.

$$f = \frac{n}{\Delta t} \qquad f = \frac{1}{T}$$

T lässt sich auch durch die Formel eines Federpendels ausdrücken. In dieser ist m die Masse des Oszillators, welcher bei Grillen der Harfe entspricht, und k die Steifigkeit. Die Formel sieht folgendermassen aus:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Wenn man die Formel für T in die vorherige Gleichung einsetzt, erhält man die Formel:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Bei gleichbleibender Steifigkeit (k) gilt Folgendes: Je grösser die Masse m ist, umso kleiner ist die Frequenz (f).

Die Steifigkeit beider Flügel der Steppengrille ist dieselbe. Beide bestehen aus dem gleichen Material. Es wird davon ausgegangen, dass der linke Vorderflügel bei *Grylloidea* tendenziell kleiner ist als der rechte Vorderflügel (5). Dementsprechend wäre auch dessen schwingungsfähige Harfe kleiner. Dies hat zur Folge, dass der linke Flügel auch über eine geringere Masse verfügt. Nach der oben gezeigten Formel sollte die Frequenz des linken Flügels also grösser sein als die Frequenz des rechten Flügels.

Ausserdem ist bekannt, dass zu Beginn der Schliessbewegung die Vibration des linken Flügels dominant ist. Dies ändert sich im Laufe der Schliessbewegung. Gegen Ende ist die Vibration des rechten Flügels dominant (4).

Wenn die Grösse der Flügel der Steppengrille also einen Einfluss auf die dominante Frequenz haben sollte, wäre ein Unterschied zwischen der dominanten Frequenz in der ersten Hälfte einer Silbe gegenüber der dominanten Frequenz in der zweiten Hälfte dieser Silbe ersichtlich, vorausgesetzt die Flügel der Steppengrille sind unterschiedlich gross.

3.5 Schalldruck

Der Schalldruck ist eine physikalische Grösse, mit der Druckschwankungen beschrieben werden können. Diese Druckschwankungen entstehen durch die Ausbreitung des Schalls. Der Schall breitet sich in einem bestimmten Medium aus. Normalerweise wird von dem Medium Luft ausgegangen. Durch eine Krafteinwirkung werden Luftteilchen in Schwingung versetzt. Dies bewirkt Verdichtungen und Verdünnungen der Luft. Diese Schwingungen werden dann mit einem Gehör, sei es das eines Menschen oder einer Steppengrille, als Klänge wahrgenommen. Der Schalldruck hat in den folgenden Versuchen keine Masseinheit, sondern eine willkürliche Grösse. Diese dient lediglich zur Erkennung von Druckschwankungen in der Luft.

3.6 Fast Fourier Transform- FFT

Die Fast Fourier Transform ist ein Algorithmus, mit dem ein Klang in seine Bestandteile zerlegt werden kann. Ein Klang hat einen Grundton mit einer bestimmten dominanten Frequenz. Jedoch besteht ein Klang nicht nur aus diesem Grundton, sondern auch aus Obertönen. Diese haben jeweils ein Vielfaches der Grundfrequenz. Auf einem FFT - Diagramm sieht man anhand lokaler Maxima, bei welcher Frequenz die relative Amplitude am grössten ist. Je grösser diese Amplitude ist, umso lauter erklingt der Ton. Ein FFT kann auf jedes Schwingungsdiagramm oder auf einzelne Bereiche eines Schwingungsdiagramms angewendet werden. Dadurch wird ersichtlich welche Frequenzen dort jeweils dominant sind.

3.7 Mikroskope

Für die Untersuchungen an den Mikroskopen habe ich eine männliche Steppengrille und eine männliche Wanderheuschrecke verwendet. Beide hatte ich von Paul Etter aus der Biologieabteilung des Gymnasium Münchensteins.

Um die kleinen Stridulationsorgane der Steppengrille genauer betrachten zu können, wurden zwei unterschiedliche Mikroskope zur Hilfe genommen.

3.7.1 Lasermikroskop

Mit einem Lasermikroskop können Aufnahmen verschiedenster Art gemacht werden. Verwendet wurde ein Keyence VK-X1000 der Universität Basel. Dieses Mikroskop kann gleich wie ein klassisches Lichtmikroskop verwendet werden, nur dass die Bilder auf dem Computer angezeigt werden. Mit dem Lasermodus und dem zugehörigen Programm namens Multi File Analyzer kann es aber auch noch dreidimensionale Aufnahmen machen, in denen man die Tiefen sieht. Ausserdem kann man das Objekt digital drehen und von verschiedenen Seiten betrachten.

3.7.2 Rasterelektronenmikroskop

Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) können, dank dessen hoher Auflösung, kleinste Strukturen scharf und detailreich aufgenommen werden. «Beim REM wird die zu untersuchende Probe rasterförmig mit Elektronen beschossen. Die dabei freigesetzten Elektronen der Probe (sog. Sekundäre Elektronen, (SE) werden von einem Detektor aufgefangen und in ein Bild umgewandelt, dass man auf einem Monitor anschauen kann.» (13). Für die Untersuchung der kleinen Schrillzähnnchen der Steppengrille eignete sich ein REM also sehr gut.

4 Material & Methoden

4.1 Aufbereitung der Steppengrille für die mikroskopischen Aufnahmen

Damit die Steppengrille problemlos untersucht werden konnte, musste sie zuvor eingeschläfert werden. Zunächst wurde eine männliche Steppengrille aus ihrem Terrarium im Gymnasium Münchenstein genommen und in ein Glas gelegt, welches danach verschlossen wird. Dann musste ein Tuch in Ethylacetat getränkt werden. Dieses Tuch wurde in das Glas zu den Insekten gelegt. Das Glas wurde danach wieder verschlossen. Nach kurzer Zeit ist ein Gas entstanden, welches die Steppengrille zuerst betäubt und nach wenigen Minuten eingeschläfert hat. Danach konnte die Steppengrille aus dem Glas genommen werden. Diese wurde danach einen Tag lang ohne weitere Vorkehrungen gelagert und konnte dabei ein wenig trocknen, was für die folgende Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop wichtig ist. Zunächst wurden die Proben aber unter einem Lasermikroskop betrachtet. Dort sollten die Stridulationsorgane auf den Flügeln lokalisiert werden, was dann Zeit für die Arbeit mit dem Rasterelektronenmikroskop sparen sollte.

Um die Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop zu begutachten, mussten sie noch weiter behandelt werden. Die Proben wurden in 96-prozentigem Alkohol gesäubert. Dann wurden sie sorgfältig auf einen Stecker geklebt. Die Flügel, welche eigentlich ein wenig gefaltet sind, mussten so flach wie möglich ausgebreitet und aufgeklebt werden. Bei der Steppengrille musste die Innenseite des rechten Flügels nach oben schauen, da sich dort die Schrillzähnnchen befinden. Die Aussenseite des linken Flügels musste nach oben schauen, da sich dort die Schrillkante befindet. Danach wurden die Proben unter einem Vakuum mit einer dünnen Goldschicht versetzt.



Abb. 5 Dieses Foto zeigt die Proben, welche zuvor mit einer Goldschicht überzogen wurden. Die beiden Flügel der Steppengrille befinden sich oben links. Des Weiteren sind noch Oberschenkel und Flügel einer Wanderheuschrecke zu sehen. Diese spielen aber in dieser Arbeit keine Rolle.

4.2 Aufnahmen mit dem REM

Die beiden Vorderflügel wurden unter dem REM auf ihre Stridulationsorgane untersucht. Ziel war es Aufnahmen der ganzen Schrillleiste, einzelner Schrillzähnen und der Schrillkante zu machen.

Um eine übersichtliche Aufnahme der ganzen Schrillleiste zu machen, wurde die Innenseite des rechten Flügels untersucht. Mit einer Vergrößerung mit dem Faktor 30 wurde eine solche Aufnahme getätigt (Abb. 14). Der Arbeitsabstand betrug dabei 18,7 mm. Für Aufnahmen einzelner Abschnitte der Schrillleiste, auf denen die einzelnen Schrillzähnen noch besser zu erkennen sind, wurde mit einer Vergrößerung mit dem Faktor 200 und einem Arbeitsabstand von 18,5 mm gearbeitet. Für eine scharfe Aufnahme der Schrillkante auf dem linken Vorderflügel, welcher mit seiner Aussenseite gegen oben lag, wurde eine siebzigfache Vergrößerung und ein Arbeitsabstand von 15,7 mm verwendet.

4.3 Zählung und Vermessung der Schrillzähnnchen

Untersucht wurde die REM-Aufnahme der Innenseite des rechten Flügels einer Steppengrille (Abb.14). Darauf befindet sich die Schrillleiste mit den Schrillzähnnchen. Die Breite der einzelnen Schrillzähnnchen wurde gemessen. Dies dient der Überprüfung der Hypothese, welche besagt, dass ein breiteres Schrillzähnnchen die Schliessbewegung der Flügel beim stridulieren verlangsamt, was eine tiefere dominante Frequenz zur Folge haben könnte.

Die REM-Aufnahmen wurden auf einem Server der Universität Basel gespeichert. Die Website der Nanoimaging Abteilung verfügt über ein Tool, welches die Möglichkeit bietet, Distanzen zu messen. Dieses Tool konnte Distanzen mit einer Genauigkeit von $1,4 \mu\text{m}$ messen. Weil aber die durchschnittliche Breite der Schrillzähnnchen auf verschiedenen Teilbereichen der Schrillleiste relevant ist und nur ein kleiner Messfehler auftritt, war dies nicht weiter problematisch. Es wurde die Länge der einzelnen Schrillzähnnchen gemessen, indem eine Linie vom obersten erkennbaren Punkt des jeweiligen Schrillzähnnchens zum untersten erkennbaren Punkt desselben Schrillzähnnchens gezogen wurde. Die Längenangabe erfolgte automatisch. Da dies für jedes Schrillzähnnchen gemacht wurde, konnte daraus auch die Anzahl der Schrillzähnnchen ermittelt werden.

Die Schrillzähnnchen wurden von der in der Mitte der Steppengrille liegenden Seite gegen Ausen nummeriert. Dies entspricht gerade der Reihenfolge, in der die Schrillzähnnchen beim Zirpen beansprucht werden. Für das Bild bedeutet dies von links nach rechts (Siehe Abb.14). Ausserdem wurde die Distanz zwischen dem ersten und dem letzten Schrillzähnnchen gemessen. Sie gilt als Gesamtlänge der Schrillleiste.

4.4 Aufnahme des Zirpens

4.4.1 Vorbereitung- Haltung der Steppengrille

Adulte Steppengrillen konnte ich bei einer Tierhandlung in 20-er Packungen erwerben. Diese wären eigentlich nur als Futterinsekt angedacht und werden deshalb auch in sehr kleinen Plastikschachteln gehalten. Da die Steppengrille sich teilweise kannibalistisch verhält, bietet ihnen eine grössere Lauffläche die Möglichkeit, vor den Artgenossen zu entkommen. Deshalb habe ich sie in einer 26 x 16 x 17 cm grossen Faunabox bei mir zuhause gehalten. Sand diente als Unterlage. Eierschachteln, Äste und Kartonrollen halfen, die Lauffläche zusätzlich zu vergrössern. Da die Grillen in der Natur häufig am Eingang ihrer Höhlen zirpen, wurden diese mit den Kartonrollen simuliert. Gefüttert wurden die Steppengrillen mit einem Cricket-Mix (Universalfutter für Insekten) und kleinen Apfelstücken. Äpfel versorgen die Steppengrillen mit ausreichend Flüssigkeit, so dass ihnen nicht noch zusätzlich Wasser zur Verfügung gestellt werden musste. Die Temperatur sollte tagsüber zwischen 25 und 30 Grad Celsius betragen. Bis Ende August entsprach dies in etwa der Raumtemperatur. Im September musste manchmal mit einer Infrarotlampe nachgeholfen werden. An sonnigen Tagen reichte jedoch auch dann der Ort unter einem schrägen Dachfenster, um auf die genannten Temperaturen zu kommen. Um den Lockgesang der Männchen zu provozieren, war es wichtig, dass männliche und weibliche Steppengrillen im gleichen Gehege gehalten wurden. Denn nur wenn Weibchen in der Nähe sind, erzeugen die Männchen ihren Lockgesang.



Abb. 6 Steppengrillen in einer Faunabox unter dem Fenster

4.4.2 Aufnahme des Zirpens mit dem Mikrophon

Das Zirpen der Steppengrille wurde mit einem Mikrophon von Vernier aufgenommen. Dieses habe ich mit einem LabQuest Pro verbunden, das an einen Computer angeschlossen war. Dieses kann die mit dem Mikrophon gemessenen Werte aufzeichnen. Das Mikrophon als auch das LabQuest Pro wurde von der Physikabteilung des Gymnasium Münchensteins ausgeliehen. Die gemessenen Daten wurden mit dem Programm «Logger Pro» aufgenommen und genauer untersucht.

Wenn eine Steppengrille am Zirpen war, konnte das Mikrophon durch eine Luke beim Dach der Faunabox nahe an die zirpende Steppengrille und in deren Richtung ausgerichtet werden.

Um die Tonhöhe beziehungsweise die dominante Frequenz des Zirpens zu bestimmen, wurden folgende Einstellungen verwendet. Es wurde der Schalldruck zum jeweiligen Zeitpunkt aufgenommen. Die Zeitdauer einer Messung betrug 0.1 Sekunde. Damit war eine Abtastrate von 50'000 Punkten pro Sekunden möglich. In den 0.1 Sekunden konnten also 5'000 Punkte festgehalten werden, die den jeweiligen Schalldruck beschreiben.

Die männlichen Steppengrillen sind nicht durchgehend am Zirpen. Deshalb wurde die Messung durch einen Trigger, welcher zuerst bei der Datenerfassung auf Logger Pro aktiviert wurde, ausgelöst. Für den Basiswert des Schalldrucks des Raumes verwendet dieses Mikrophon einen willkürlichen Wert. Dieser Wert betrug in dem Raum, in dem der Versuch stattgefunden hatte, ungefähr 2,6. Der Trigger wurde ab einem Wert von 2,65 ausgelöst, womit die Messung jeweils begann. Zusätzlich wurde zu Beginn und am Ende der Aufnahmen die Raumtemperatur gemessen. Es wurden jeweils fünf Messungen bei gleicher Umgebungstemperatur gemacht.

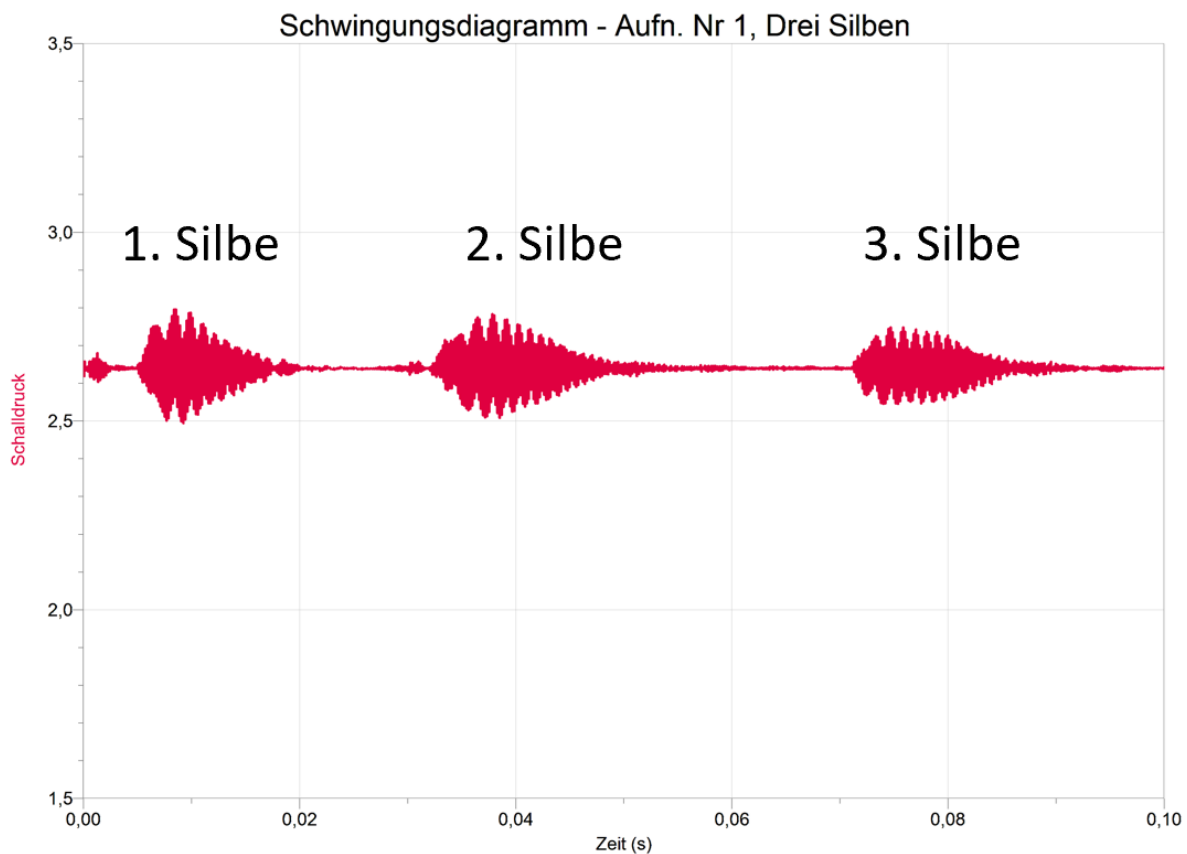
Die gemessenen Daten wurden in einem Fast Fourier Transform Diagramm angezeigt. Logger Pro verfügt über eine Funktion, mit der ausgewählte Daten in einem solchen FFT-Diagramm angezeigt werden können. Dieses Diagramm zeigt die Amplitude bei bestimmten Frequenzen. Durch dieses Diagramm wurde ersichtlich, bei welcher Frequenz die Amplitude des Schalldrucks am grössten war. Dadurch konnte die dominante Frequenz der Harfe der stridulierenden Steppengrille festgestellt werden. Die Frequenz mit der höchsten Amplitude galt also als dominante Frequenz. Ausserdem wurde der Mittelwert der jeweils ersten Ausschläge, also der jeweils dominanten Frequenzen auf den FFT-Diagrammen der fünf Messungen bei 22.8 Grad Celsius bestimmt.

Für die nächsten fünf Aufnahmen (Nr. 6-10) wurde die Temperatur mithilfe einer Infrarotlampe erhöht. Diese wurde mit einem Abstand von 20cm direkt auf die Faunabox mit den Steppengrillen ausgerichtet. Es wurde gewartet, bis die Temperatur einigermaßen konstant war. Nach ungefähr 30 Minuten erreichte die Temperatur einen Wert von 30,6 °C und veränderte sich nur noch sehr langsam. Dann konnte mit dem Aufnehmen begonnen werden. Es wurden wieder fünf Aufnahmen mit einem Trigger ab einem Schalldruckwert von 2,65 gestartet. Auch die Dauer einer Aufnahme betrug weiterhin 0.1 Sekunden. Es wurde ebenfalls die Abtastrate von 50'000 Punkten pro Sekunde verwendet.

4.4.3 Untersuchung der dominanten Frequenzen innerhalb einzelner Silben auf einen Zusammenhang zum Grössenverlauf der Schrillzähnnchen

Aus den Resultaten der Vermessung der einzelnen Schrillzähnnchen (Kapitel 5.1.2) folgte, dass die inneren 50 % der Schrillzähnnchen auf der Schrillleiste deutlich breiter sind als die jeweils äusseren 25%. Um herauszufinden, ob die Breite der Schrillzähnnchen einen Einfluss auf die Frequenz des Lockgesangs hat, wurden drei Silben eines Lockgesangs derselben Steppengrille untersucht. Nach der Hypothese, dass ein breiteres Schrillzähnnchen die Flügelbewegung verlangsamt, was eine tiefere Frequenz zur Folge hätte, sollte überprüft werden, ob die Frequenz im ersten und dritten Abschnitt höher ist als im zweiten Abschnitt. Die drei Silben stammten aus der Aufnahme Nr.1 bei 22,8 °C. und wurden in jeweils 3 Abschnitte unterteilt.

Abb. 7 Dies ist das Schwingungsdiagramm der ersten Aufnahme bei 22,8 °C. Die Dauer betrug 0,1s Es zeigt die drei Silben, welche in dieser Zeit entstanden sind



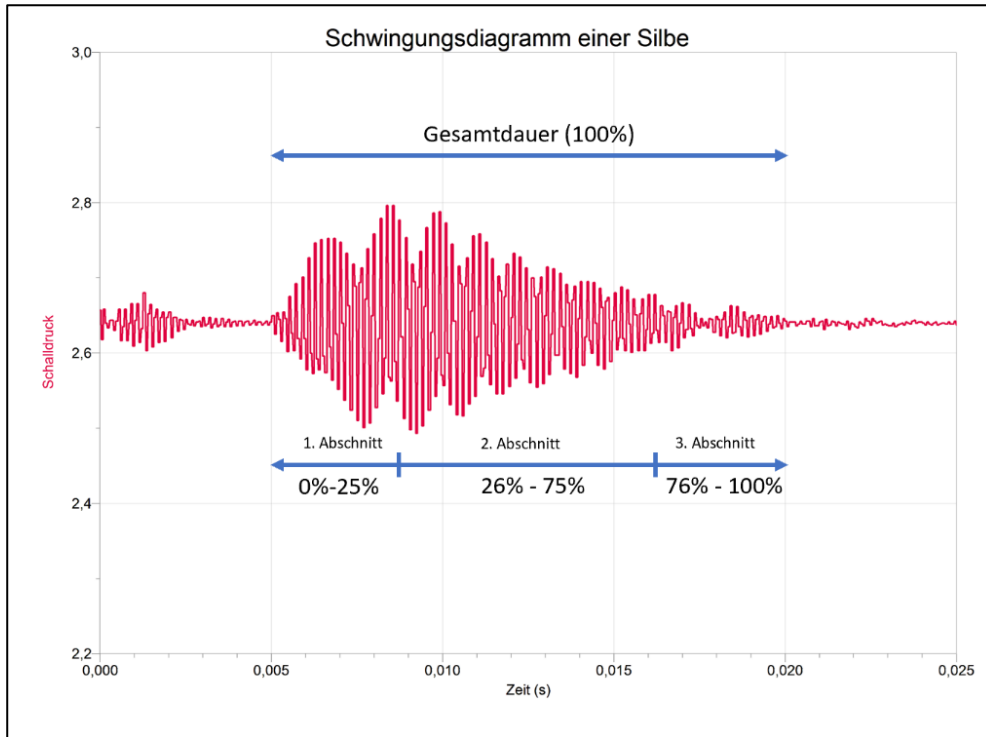
Die Zeit des Starts und des Endes einer Silbe konnte auf dem Schwingungsdiagramm abgelesen werden. Die Gesamtdauer einer Silbe konnte folgendermassen berechnet werden:

$$t_{Ende} - t_{Start} = \Delta t = \text{Gesamtdauer einer Silbe}$$

Die Gesamtdauer einer einzelnen Silbe wurde in drei zeitliche Abschnitte zerlegt. Der erste Abschnitt bestand aus den ersten 25% der Gesamtdauer einer Silbe. Der zweite Teil bestand

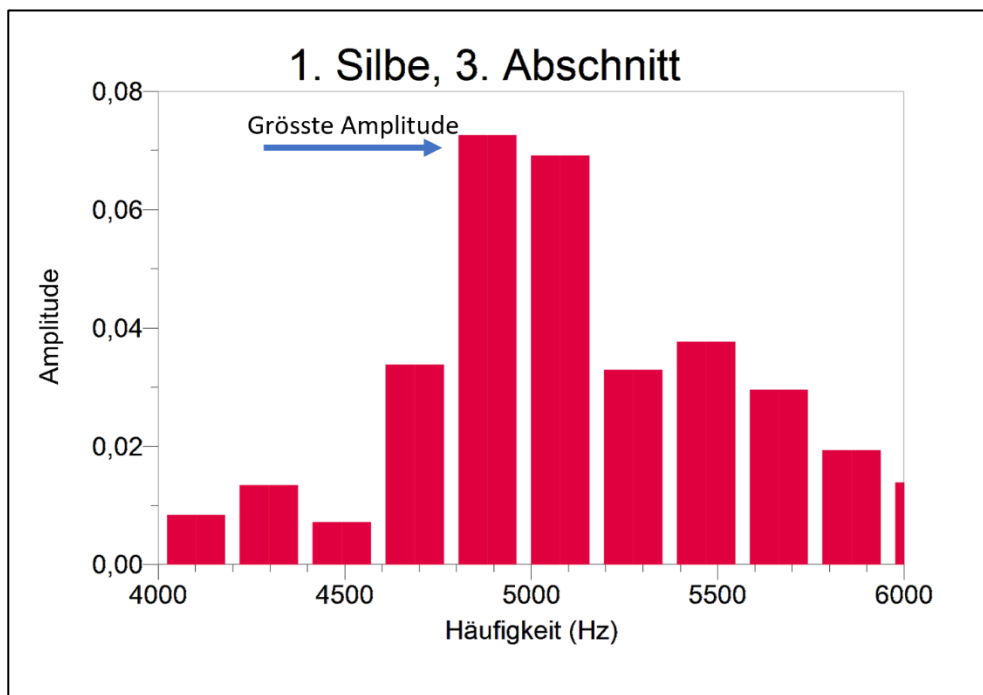
aus dem Abschnitt von 26% bis 75% der Gesamtdauer der Silbe. Der dritte Teil bestand aus dem Abschnitt von 76% bis 100% der Gesamtdauer (Siehe Abb. 8).

Abb. 8 Hierbei handelt es sich um das Schwingungsdiagramm der ersten Silbe der ersten Aufnahme bei 22,8°C. Es wird visualisiert, wie die Einteilung in die drei verschiedenen Abschnitte gemacht wurde.



Für jeden Abschnitt wurde ein FFT-Diagramm erstellt. Auf diesem wurde nach der jeweils dominanten Frequenz, also der Frequenz mit der grössten Amplitude gesucht. Logger Pro konnte die genauen Daten dieser FFT-Diagramme nicht wiedergeben. Deshalb sind keine genauen Frequenzen, sondern nur Frequenzbereiche entstanden, welche abgelesen werden mussten. In diesem Beispiel wäre das ein Frequenzbereich von 4'810 bis 4'950 Hz. Von diesem Frequenzbereich wurde der Mittelwert genommen. Dieser wäre hier also 4'880 Hz. Dies wurde für alle Abschnitte aller Silben gemacht. Danach wurde die durchschnittliche Frequenz der jeweiligen Abschnitte berechnet. Diese wurde danach auf einen Zusammenhang zum Grössenverlauf der Schräglinien untersucht.

Abb. 9 Dies ist ein Ausschnitt eines FFT-Diagramms. Dieses wurde aus den Daten des 3. Abschnitts aus Aufnahme Nr. 1 erstellt. Wie bei allen FFT-Diagrammen wurde nach der Frequenz bei der grössten Amplitude gesucht. Diese ist hier in einem Bereich zwischen 4'810 und 4'950 Hz.



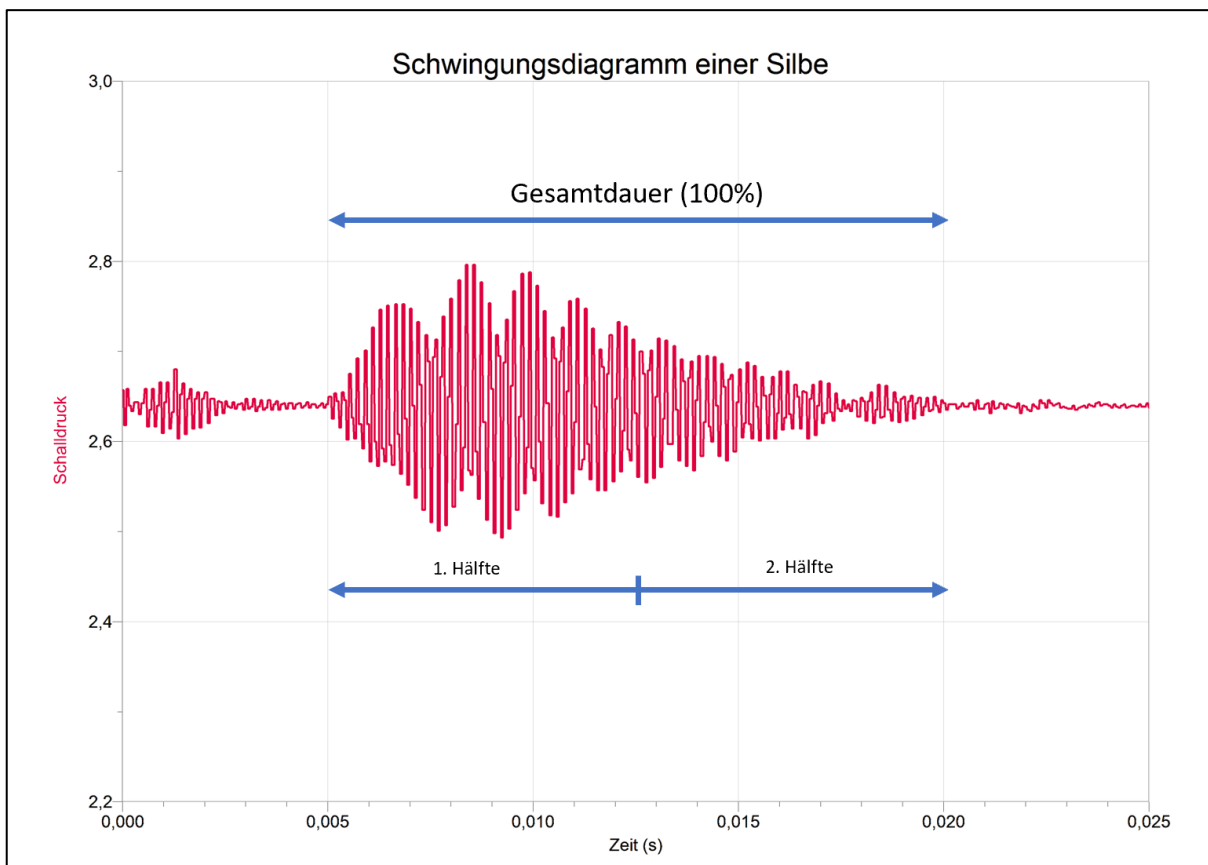
4.4.4 Auswertungsverfahren für den Zusammenhang zwischen Flügelgröße und dominanter Frequenz

Die drei Silben aus Aufnahme Nr. 1 wurden jeweils in ihrer Dauer halbiert.

Mit den Daten der jeweiligen Hälfte der Silben wurde durch Logger Pro ein FFT-Diagramm erstellt. Auf den entstandenen FFT-Diagrammen wurden nach den jeweiligen Maxima der Amplituden gesucht. Logger Pro gab dabei keine genauen Frequenzen an, sondern nur gewisse Bereiche. Diese wurden dann festgehalten.

Es wurde danach die durchschnittlich dominante Frequenz der drei ersten Hälften der Silben und der drei zweiten Hälften der Silben berechnet. Für diese Berechnung wurde die Mitte des jeweiligen Bereichs genommen, den Logger Pro auf dem FFT-Diagramm angezeigt hatte.

Abb. 10 Diese Abbildung zeigt das Schwingungsdiagramm der ersten von drei Silben aus Aufnahme Nr. 1. Darin ist eingezeichnet, wie eine solche Silbe in ihre Hälften geteilt wurde.



5 Resultate

5.1 Untersuchung der REM-Bilder

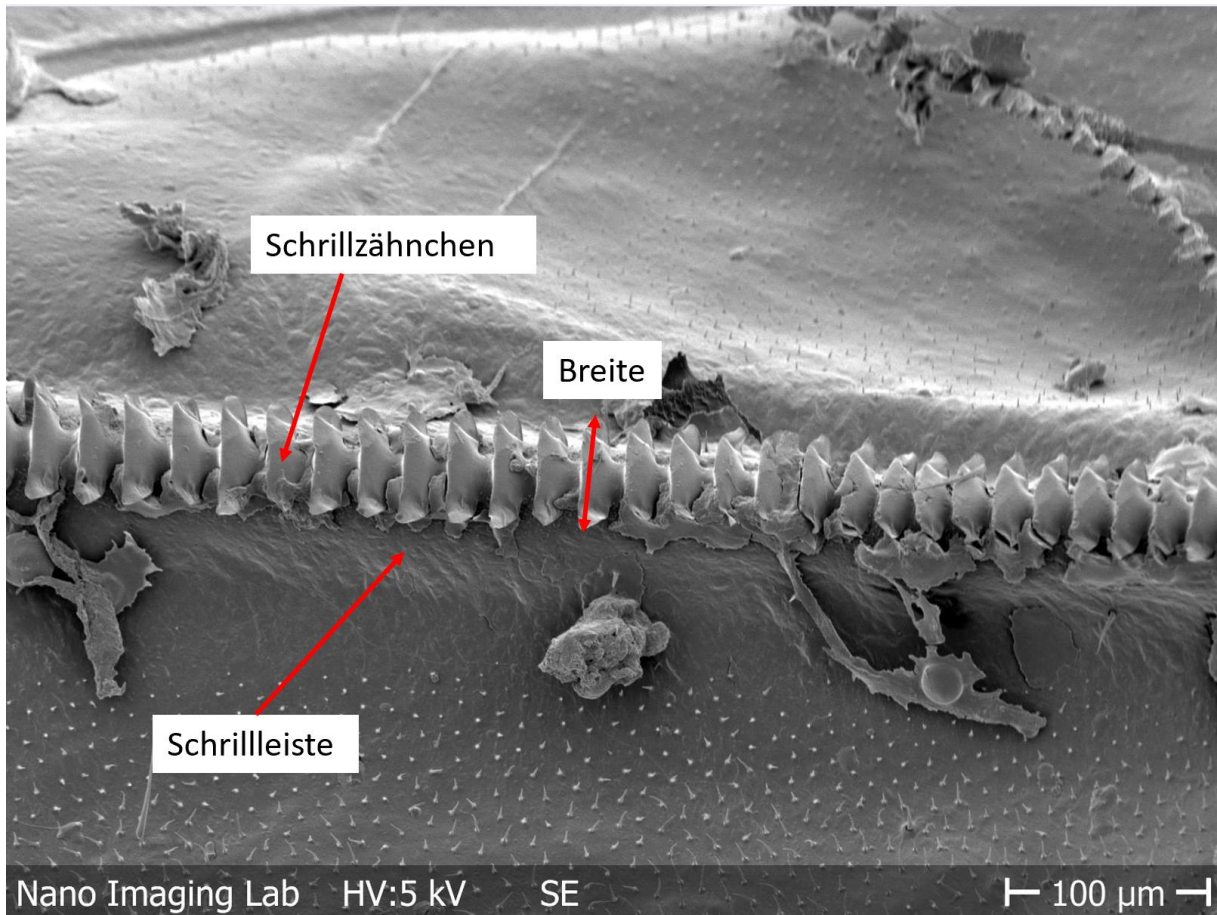


Abb. 11 REM-Aufnahme welche einen Ausschnitt der Schrilhleiste zeigt. Darauf befinden sich die Schrilzzähnen. Ausserdem dargestellt ist, was unter der Breite eines Schrilzzähnhens verstanden wird.

Auf dieser REM-Aufnahme (Abb. 10) werden die Schrilhleiste und die einzelnen Schrilzzähnen klar erkennbar. Die Schrilhleiste ist erhöht. Im Gegensatz zum Rest des Flügels befinden sich darauf keine Haare. Deshalb konnte die Schrilhleiste einfach gefunden werden. Darauf befinden sich die Schrilzzähnen. Sie sind alle in einer Reihe angeordnet. Durch die erhöhte Lage der Schrilhleiste sind die Schrilzzähnen stark exponiert. Die Schrilzzähnen sind auf dem Bild nach links ausgerichtet. Dies bedeutet, dass sie in Richtung der Mitte der Grille und somit auch in Richtung des linken Vorderflügels zeigen. Die Schrilkkante würde von links nach rechts über diese Schrilzzähnen streichen.

Auf den Aufnahmen des linken Flügels, der mit seiner Aussenseite gegen oben auflag, konnte die Schrilkkante erkannt werden. (Siehe Abb. 11 & 12)



Abb. 12 Diese REM-Aufnahme zeigt die Aussenseite des linken Flügels der untersuchten Steppengrille. Mit dieser übersichtlichen Einstellung konnte die Schrillkante lokalisiert werden.

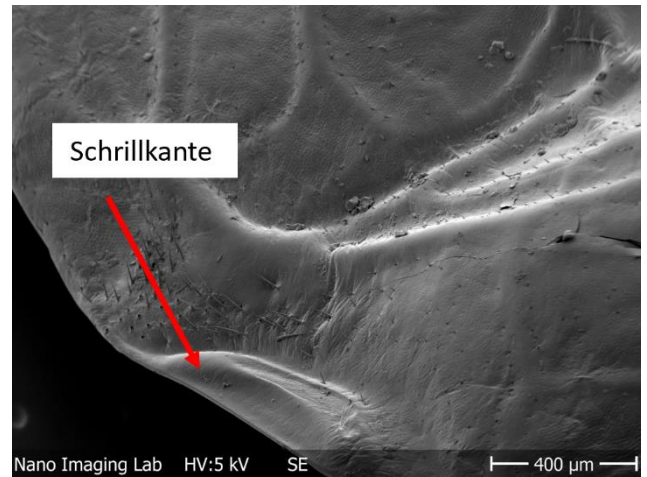


Abb. 13 Diese REM-Aufnahme zeigt die Schrillkante von einem seitlichen Winkel aus betrachtet.

5.1.1 Zählung und Vermessung der Schrillzähnnchen

Auf der Innenseite des rechten Flügels der untersuchten Steppengrille kommen unter dem REM die meisten Schrillzähnnchen klar zum Vorschein. Die Länge der gesamten Schrillleiste beträgt 2,77 Millimeter. Der linke und der rechte Rand der Schrillleiste waren gut erkennbar, obwohl die jeweiligen Bereiche ein wenig unscharf gewesen sind. Ansonsten war der Bereich der Schrillleiste scharf. Auf der Schrillleiste befinden sich 127 Schrillzähnnchen, die klar erkennbar und eindeutig identifizierbar waren. Im unscharfen Bereich des linken Randes wurden aufgrund des Bildes und der regelmässigen Abstände zwischen den Schrillzähnnchen zwei weitere Schrillzähnnchen vermutet. Der unscharfe Bereich des rechten Randes ist grösser. Dort wurden 12 weitere Schrillzähnnchen vermutet. Eine Messungenauigkeit von ± 3 Schrillzähnnchen einzuführen war deshalb sinnvoll. Insgesamt befinden sich auf der Schrillleiste der Steppengrille also 141 ± 3 Schrillzähnnchen. Die prozentuale Messungenauigkeit liegt bei 2.13%.

$$\frac{3}{141} = 2.13 \%$$

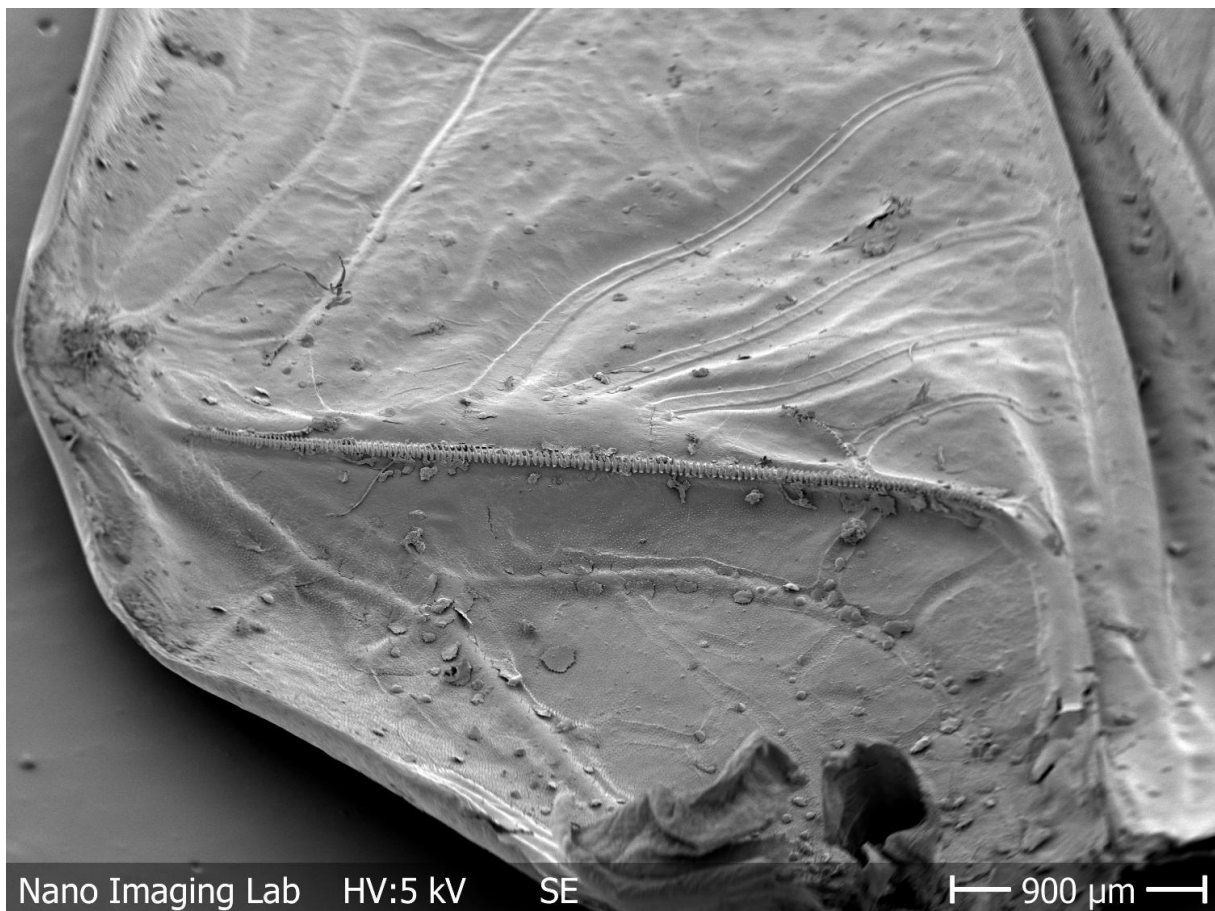


Abb. 14 Auf dieser REM-Aufnahme sieht man einen grossen Teil der Innenseite des rechten Vorderflügels der untersuchten Steppengrille. In der Mitte kann man die Schrillleiste und die Einzelnen Schrillzähnnchen erkennen. Darüber liegt die Harfe. Auf dieser Abbildung wurden die einzelnen Schrillzähnnchen gemessen und gezählt.

5.1.2 Grössenverlauf der Schrillzähnen

Die Breite der einzelnen Schrillzähnen wurde gemäss Kapitel 4.3 auf der Abb. 13 gemessen.

Die durchschnittliche Breite eines Schrillzähns beträgt 52,4 μm . Die Schrillzähnen sind aber im Verlauf der Schrillleiste unterschiedlich breit.

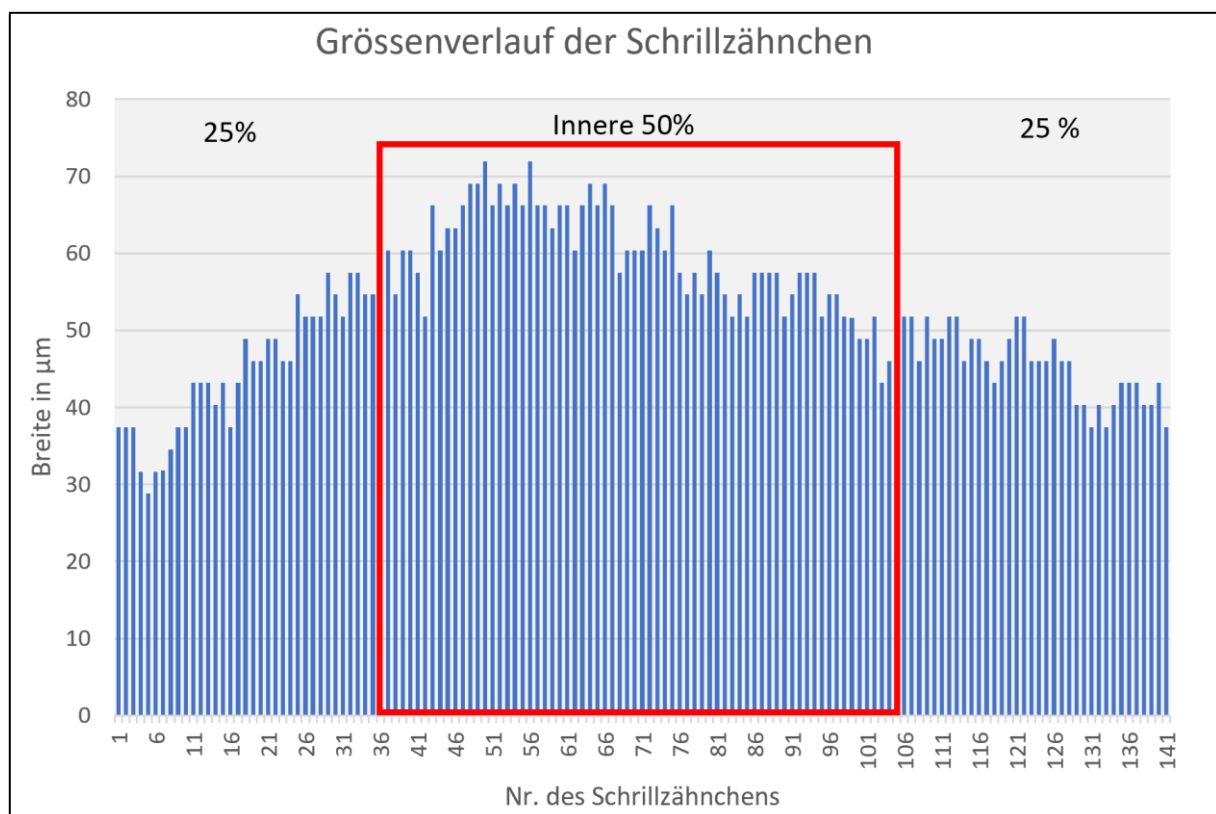
Die schmalsten Schrillzähnen befinden sich unter den ersten zehn. Die durchschnittliche Breite dieser Zähnen beträgt 34,5 μm . Das fünfte ist das Schmalste der ganzen Schrillleiste und misst 28,8 μm .

Die Breite nimmt vom elften bis zum vierzigsten Schrillzähnen stark zu. Das elfte ist noch 37,4 μm breit. Das Vierzigste ist bereits 60,4 μm breit.

Die breitesten Schrillzähnen befinden sich zwischen Schrillzähnen Nr. 41 und Schrillzähnen Nr. 70. Die durchschnittliche Breite in diesem Bereich beträgt 65 μm .

Danach nimmt die Breite der Schrillzähnen wieder ab. Sie nimmt aber weniger stark ab als sie zu Beginn der Schrillleiste angestiegen ist. Auch die zehn letzten Schrillzähnen sind noch breiter als die ersten 10. Die durchschnittliche Breite der letzten zehn Schrillzähnen beträgt 40,9 μm .

Abb. 15 Auf diesem Diagramm ist zu sehen, wie breit die jeweiligen Schrillzähnen in μm waren. Die Schrillzähnen im rot markierten Bereich, den inneren 50% sind deutlich breiter als die aussen liegenden Schrillzähnen.



Für den folgenden Abgleich mit einer möglichen Änderung der Frequenz während einer Schliessbewegung, bzw. einer Silbe (Kapitel 5.2.3), ist jedoch folgende Erkenntnis wichtig: Die inneren 50% der Schrägstrichzähnen (Siehe Abb.14), welche in der Mitte der Schrägstrichleiste liegen, also Schrägstrichzähnen Nr. 36 bis Schrägstrichzähnen Nr. 105 waren deutlich breiter als die Schrägstrichzähnen der beiden äusseren 25% der Schrägstrichleiste. Diese bestehen aus Schrägstrichzähnen Nr. 1 bis Nr. 35 und Schrägstrichzähnen Nr. 106 bis Nr. 141.

Die durchschnittliche Breite der inneren 50% der Schrägstrichzähnen betrug 65,7 μm . Die durchschnittliche Breite der äusseren 50% der Schrägstrichzähnen betrug 43,9 μm . Die inneren 50% der Schrägstrichzähnen waren dementsprechend um 49,7 % grösser.

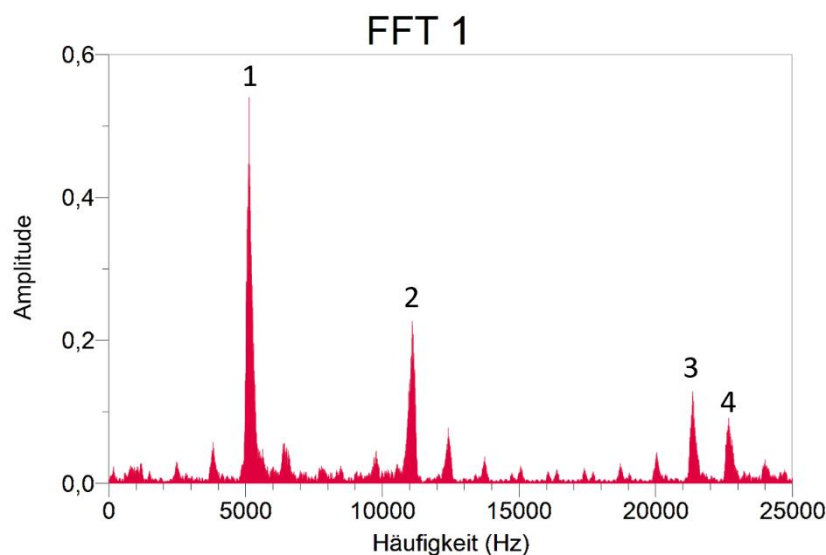
5.2 Resultate der mikrophonischen Aufnahmen des Zirpens

5.2.1 Bestimmung der dominanten Frequenz

Die Mikrophonaufnahmen wurden gemäss Kapitel 4.4.2 aufgenommen und ausgewertet.

Die Temperatur der ersten Datenerhebungen entsprach der Raumtemperatur und betrug durchgehend 22,8 °C. Unten abgebildet sieht man ein Beispiel eines FFT-Diagramms einer Aufnahme, welche in Kapitel 4.4.2 wird. Es handelt sich hierbei um die erste der fünf Aufnahmen, welche bei der zuvor erwähnten Temperatur durchgeführt wurde. Aus dem Schwingungsdiagramm dieser Aufnahme wurde mit Logger Pro das folgende FFT-Diagramm (Siehe Abb. 16) erstellt. Aus einer ersten qualitativen Betrachtung der fünf Aufnahmen sind bei allen FFT-Diagrammen jeweils vier Ausschläge festgestellt und in allen FFT-Diagrammen wiedererkannt worden. Die grösste Amplitude befand sich jeweils beim ersten Ausschlag. Deshalb wurde die Frequenz des ersten Ausschlags als dominante Frequenz bestimmt und zur Überprüfung der Fragestellung weiterverwendet.

Abb. 16 FFT-Diagramm der ersten Aufnahme des Zirpens bei 22.8 Grad Celsius. Es zeigt die jeweilige Amplitude zu einer bestimmten Frequenz. Die Nummern (1-4) zeigen die vier Ausschläge, welche in allen FFT-Diagrammen wiedererkannt wurden.



Zunächst wurde die dominante Frequenz des Lockgesangs der Steppengrille bestimmt. Folgende Frequenzen hatten jeweils die grössten Amplituden:

Aufnahme (bei 22.8°C)	Dominante Frequenz
Nr. 1	5'127 Hz
Nr. 2	5'450 Hz
Nr. 3	5'078 Hz
Nr. 4	5'285 Hz
Nr. 5	4'956 Hz

Die durchschnittliche Frequenz der jeweils grössten Amplitude hat einen Wert von 5'179,2 Hz. Folglich ist dies ungefähr die Grundfrequenz der Harfe einer Steppengrille bei einer Umgebungstemperatur von 22.8 °C. Die gemessenen Werte bewegen sich in einem Bereich zwischen der kleinsten Frequenz von 4'956 Hz und der grössten gemessenen Frequenz eines ersten Ausschlags von 5'450 Hz. Die Differenz der kleinsten Frequenz und der grössten Frequenz beträgt 494 Hz. Dies entspricht gerundet 9.54 Prozent der durchschnittlichen Frequenz.

5.2.2 Einfluss einer Temperaturänderung auf die dominante Frequenz

Die Umgebungstemperatur für die zweite Datenerhebung betrug 30,6 °C zu Beginn der Messungen und erhöhte sich während der fünf Aufnahmen auf 30,8 °C. Dies lag daran, dass die Wärmelampe durchgehend auf die Faunabox der Steppengrillen ausgerichtet war und zusätzlich Wärme ausstrahlte. Dies war nötig, da bei einem Unterbruch der Wärmezufuhr die Temperatur in kurzer Zeit zu stark abgefallen wäre. Es wurde von einer durchschnittlichen Temperatur von 30,7 °C ausgegangen. Die Temperaturdifferenz zu den fünf ersten Messungen beträgt folglich 7.9 °C. Wieder wurde die dominante Frequenz der Harfe der Steppengrille bestimmt. Die folgenden Frequenzen hatten jeweils die grössten Amplituden.

Aufnahme (bei 30.7°C)	Dominante Frequenz
Nr. 6	5'304 Hz
Nr. 7	5'334 Hz
Nr. 8	5'383 Hz
Nr. 9	5'402 Hz
Nr. 10	5'499 Hz

Bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 30,7 °C betrug die durchschnittliche Frequenz der jeweils grössten Amplituden 5'384,4 Hz. Dies ist dementsprechend ungefähr die dominante Frequenz der Harfe der Steppengrille bei 30,7 °C. Die tiefste Frequenz betrug 5'304 Hz und die höchste Frequenz der jeweils grössten Amplitude betrug 5'499 Hz. Die Differenz dieser beiden Frequenzen betrug 195 Hz. Dies entspricht gerundet 3,63 Prozent der bei dieser Umgebungstemperatur durchschnittlich dominanten Frequenz.

Bei einer Umgebungstemperatur von 30,7 °C war die durchschnittlich dominante Frequenz 205,2 Hz grösser als die durchschnittliche dominante Frequenz bei einer

Umgebungstemperatur von 22,8 °C. Die dominante Frequenz ist durch die Temperaturerhöhung somit um 3,96% gestiegen.

$$\frac{205,2 \text{ Hz}}{5179,2 \text{ Hz}} = 0,0396 = 3,96 \%$$

Eine der Aufnahmen (Nr. 2) bei der tieferen Umgebungstemperatur hat eine grössere dominante Frequenz als vier der Aufnahmen bei einer höheren Umgebungstemperatur. Ansonsten sind alle gemessenen dominanten Frequenzen bei der höheren Umgebungstemperatur grösser als die Grundfrequenzen bei der niedrigeren Umgebungstemperatur (mit Ausnahme der Aufnahme Nr. 2)

5.2.3 Veränderung der dominanten Frequenz aufgrund unterschiedlicher Breiten der Schräg- zähnen

Die folgenden Resultate sind gemäss Kapitel 4.4.3 entstanden.

Silbe	Gesamtdauer	Dominante Fre- quenz 1. Abschnitt	Dominante Fre- quenz 2. Abschnitt	Dominante Fre- quenz 3. Abschnitt
1	0,015 s	5195 – 5350 Hz	5040 - 5120 Hz	4810 - 4950 Hz
2	0,0205 s	5235 – 5315 Hz	5055 – 5095 Hz	4940 - 5020 Hz
3	0,0185 s	5140 – 5215 Hz	5040 - 5120 Hz	5000 – 5120 Hz
Durschnitt	0,018 s	5228 Hz	5078 Hz	4973 Hz

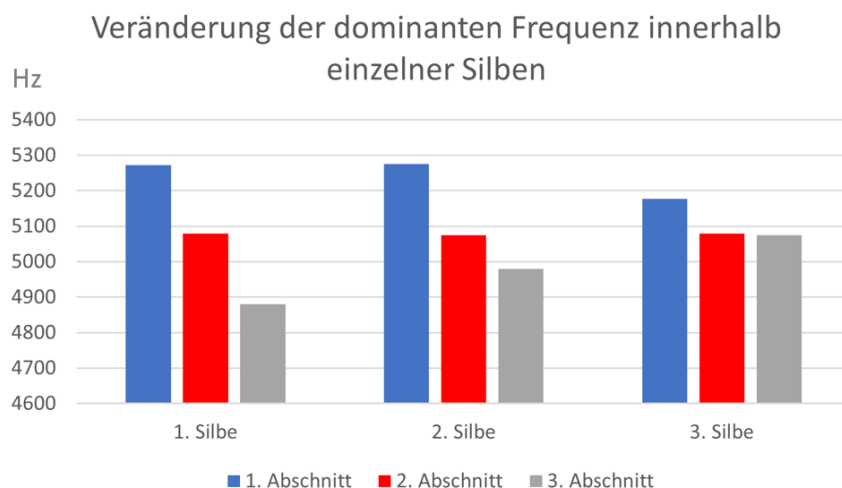
Es konnte festgestellt werden, dass die Frequenz im 1. Abschnitt, also in den ersten 25% der Gesamtdauer einer Silbe, am grössten war. Die durchschnittliche dominante Frequenz betrug 5'228 Hz.

Die durchschnittliche dominante Frequenz des 2. Abschnitts war um 150 Hz kleiner und betrug 5'078 Hz.

Im 3. Abschnitt betrug die durchschnittliche dominante Frequenz 4'973 Hz. Sie wurde also noch kleiner.

Somit konnte festgestellt werden, dass die dominante Frequenz während einer Schliessbewegung, kleiner wird. Schrägzähnen werden in einer Schliessbewegung der Reihe nach angeschlagen. Die schmalere Schrägzähnen werden während des ersten und des dritten Abschnitts angeschlagen. Da aber gerade dort die dominante Frequenz stark voneinander abweicht, kann nicht auf einen Zusammenhang zwischen der Breite der angeschlagenen Schrägzähnen und der dabei dominanten Frequenz geschlossen werden.

Abb. 17 Auf dieser Graphik sieht man, wie die dominante Frequenz, innerhalb einer Silbe abnimmt. Zu beachten ist, dass die y-Achse bei 4'600 Hz beginnt. Diese Graphik zeigt also unproportional, wie die Frequenz abnimmt.

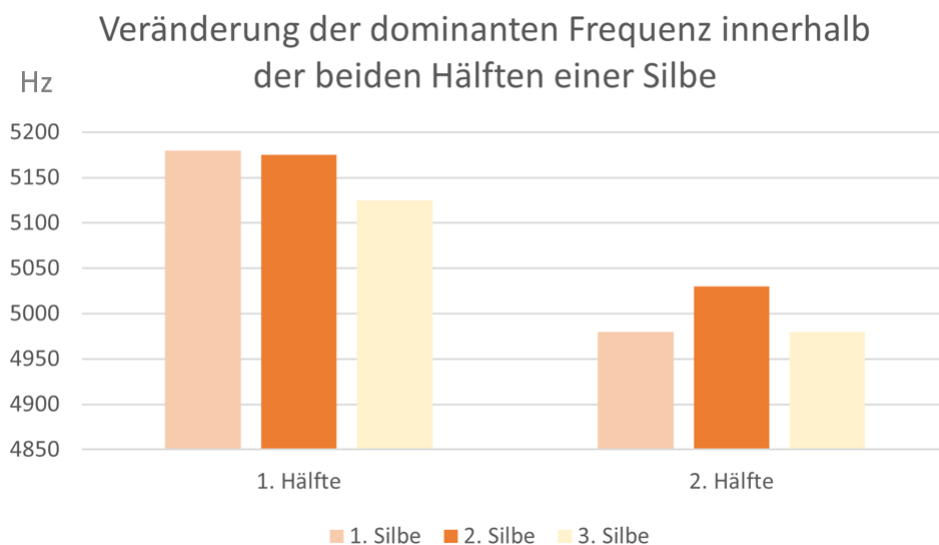


5.2.4 Möglicher Unterschied der dominanten Frequenz aufgrund verschieden grosser Flügel
Die folgenden Daten sind gemäss Kapitel 4.4.4 zustande gekommen und ausgewertet worden.

Silbe	1. Hälfte	2. Hälfte
1	5140 – 5220 Hz	4960 – 5000 Hz
2	5155 – 5195 Hz	5010 – 5050 Hz
3	5105 – 5145 Hz	4960 – 5000 Hz
Durchschnitt	5160 Hz	4997 Hz

In diesem Versuch wurde herausgefunden, dass die dominante Frequenz in der ersten Hälfte einer Silbe, also auch in der ersten Hälfte der Schliessbewegung, grösser ist als in der zweiten Hälfte einer Silbe. Die durchschnittliche dominante Frequenz betrug in der ersten Hälfte der Silbe im Durchschnitt 5'160 Hz und in der zweiten Hälfte der Silbe 4'997 Hz. Dies entspricht einem Rückgang von 3.1 Prozent.

Abb. 18 In dieser Graphik werden die dominanten Frequenzen der jeweiligen Hälften der Silben beieinander dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind alle dominanten Frequenzen der ersten Hälften höher als die der zweiten Hälften.



6 Diskussion

In dieser Arbeit sollten die Einflüsse dreier Faktoren auf die dominante Frequenz des Lockgesangs männlicher Steppengrillen geprüft werden.

Einer dieser Faktoren war die Temperatur. Es konnte gemessen werden, dass die Steppengrille durch eine Erhöhung der Temperatur im Durchschnitt mit einer etwas höheren Frequenz ihren Lockgesang ausübt. Der Anstieg betrug 3.96 %. Daraus kann geschlossen werden, dass die Temperatur zwar einen Einfluss auf die dominante Frequenz männlicher Steppengrillen hat, dieser Einfluss jedoch ziemlich klein ist. Dies ist nicht unerwartet, da ein geringer Anstieg der dominanten Frequenz durch eine Temperaturerhöhung auch bei verwandten Grillen festgestellt wurde. (Siehe Kapitel 3.3) Es wurden jeweils fünf Aufnahmen bei einer Temperatur von 22,8 °C und einer Temperatur von 30,7°C gemacht. Mehr Aufnahmen hätten besser bestimmen können, ob es sich hierbei tatsächlich um einen Anstieg der Frequenz handelt, der im Allgemeinen gültig ist. Ausserdem könnte noch erforscht werden, ob der Anstieg der dominanten Frequenz linear zur Temperaturerhöhung verläuft oder ob es zum Beispiel eine Schwelle der Temperatur gibt, ab der die Frequenz erhöht ist. Dafür müssten die dominanten Frequenzen bei vielen unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gemessen werden.

Des Weiteren wurde untersucht, ob die Breite der jeweils angeschlagenen Schrillzähnen eine Rolle für die jeweilige dominante Frequenz spielt. Die Breite der Schrillzähnen ändert sich entlang der Schrillleiste. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schrillzähnen gegen innen breiter werden und gegen den Rand der Schrillleiste schmaler. Es wurde die Hypothese, dass ein breiteres Schrillzähnen einen grösseren Widerstand für die Schrillkante darstellt, und somit die Geschwindigkeit der Schliessbewegung der Flügel verlangsamt, was eine niedrigere Frequenz zur Folge hätte, überprüft. Die dominante Frequenz war am höchsten im ersten Abschnitt einer Silbe. Sie wurde aber in den nächsten beiden Abschnitten kleiner. Dementsprechend konnte diese Hypothese nicht bewiesen werden. Es könnte zwar sein, dass die Breite der Schrillzähnen einen Einfluss auf die dominante Frequenz hat, dieser aber so klein ist, dass er aufgrund anderer Einflüsse nicht zur Geltung kommt.

Anders sieht es mit dem Einfluss der Grösse der Flügel aus. Wie bereits beschrieben, ist bekannt, dass der linke Vorderflügel bei verwandten Grillen der Steppengrille kleiner ist als der rechte Vorderflügel. Der linke Vorderflügel ist auch derjenige der in der ersten Hälfte einer Schliessbewegung, welche eine einzelne Silbe des Gesangs ausmacht, die dominante Frequenz angibt. In einem physikalischen Modell, das mit der untenstehenden Formel beschrieben wird, hat die Masse (m) und somit auch die Grösse des Flügels einen negativen Einfluss auf die dominante Frequenz.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Es zeigte sich, dass die dominante Frequenz der Steppengrille tatsächlich in der ersten Hälfte der jeweiligen Silbe grösser ist als in der zweiten Hälfte der Silbe. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch bei den Steppengrillen der rechte Vorderflügel ein wenig grösser ist als der linke Vorderflügel. Insofern konnte gezeigt werden, dass die Grösse des Flügels durchaus einen Einfluss auf die dominante Frequenz hat, mit der die männlichen Steppengrillen ihren Lockgesang ausüben.

Der Einfluss der Flügelgrösse ist auf jeden Fall grösser als derjenige der Breite der jeweils angeschlagenen Schrillzähnen. Wäre dies nicht so, wäre die dominante Frequenz der beiden Hälften einer Silbe näher beieinander.

Um dies noch besser zu bestimmen, könnten die Flügel zum Beispiel unter einem Rasterelektronenmikroskop noch genauer untersucht und vermessen werden. Man könnte etwa untersuchen, ob die Harfen der beiden Vorderflügel von Steppengrillen denn tatsächlich unterschiedlich gross sind, oder ob sich diese Vermutung nur aus dem Wissen über andere Grillen und das oben genannte physikalische Modell ergeben hat.

7 Schlusswort

Je mehr man sich mit der Klangerzeugung verschiedener Grillen beschäftigt, umso komplizierter, aber auch interessanter wird diese. Es benötigt viel Zeit sich in solch vertiefte Themen einzulesen. Deshalb hat sich der genaue Inhalt der Arbeit erst bei der Erstellung entwickelt. Das bestehende Wissen über andere Grillen konnte mit dieser Arbeit auf die Steppengrille übertragen und zu einem Teil bestätigt werden. Für eine umfangreichere Untersuchung der Flügel, z.B. auf die Grösse der Harfe wäre dieses Wissen bereits im Voraus nötig gewesen. Die Arbeiten mit den Mikroskopen waren hochinteressant. Sie stellen mein persönliches Highlight dieser Arbeit dar.

8 Literaturverzeichnis

1. Elliott, C.J.H. und Koch. 1985. The clockwork cricket. *Naturwissenschaften* 72 (S.150-153). Springer Verlag
2. Lexikon der Biologie – Stridulation <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/stridulation/64292> (08.10.2023)
3. Ingrisch, Sigfrid und Köhler, Günter. 1998. Die Heuschrecken Mitteleuropas. Westarp Wissenschaften Fachverlag. Magdeburg. (S.221)
4. Bennet-Clark, Henry. 1999. Resonators in insect sound production: How insects produce loud pure-tonesongs. *J Exp Biology*. Vol. 202. Issue 23. Cambridge.
5. Simmons, L.W. und Ritchie, Michael G. 1996. Symmetry in the songs of crickets. The Royal Society. London.
6. O.V. *Gryllus assimilis*. <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/550218> (20.09.2023)
7. Bennet-Clark, Henry. 1970. The mechanism and efficiency of sound production in mole crickets. *J. Exp. Biology*. Vol 52. (S.619-652). Cambridge.
8. Koch, Uwe T et. al. 1988 The mechanics of stridulation of the cricket *Gryllus campestris*. *J. Comp. Physiology A*. 162
9. Jeitner, Tim. 2020. Physikalische Mechanismen der Schallproduktion durch die Vorderflügel männlicher Feldgrillenn (*Gryllus bimaculatus*). Universität München.
10. O.V. Idiophone. Universität Würzburg.
11. Mhatre, Natasha et. al. 2012. Changing resonator geometry to boost sound power decouples size and song frequency in a small insect. *Proc Natl Acad Sci USA*.
12. Tembrock, Günter. 1977. Tierstimmenforschung – Eine Einführung in die Bioakustik. A. Ziemsen Verlag. Wittenberg Lutherstadt (S. 28-31)
13. Missfeldt, Martin. 2023. Rasterelektronenmikroskop. <https://www.lichtmikroskop.net/elektronenmikroskop/rasterelektronenmikroskop.php> (07.07.2023)

O.V. bedeutet ohne Verfasser*innenangabe

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: O.V. Steppengrille <https://www.proinsects.com/terrarium/ernaehrung-vitamine/fut-tertiere-futterinsekten/heimchen-grillen/steppengrillen> (20.09.2023)

Abb.2: Dambach, Martin. 1994. Lauterzeugung bei Heuschrecken und Grillen Verh. Westd. Entom. Tag. Düsseldorf. (S.25-40)

Abb. 3: Siehe Literaturverzeichnis, 9.

Abb. 4: Siehe Literaturverzeichnis, 12.

Die Abbildungen 5 bis und mit 18 stammen allesamt vom Autor.

10 Anhang

10.1 Protokolle

10.1.1 Zählung und Vermessung der Schrillzähnen

Untersuchender: Zimmerli, Tim

Datum, Zeit & Ort: 18.09.2023, 17:35 Uhr, Münchenstein

Ziele:

- Messung der Gesamtlänge der Schrillleiste
- Zählung der Schrillzähnen
- Messung der Breite der einzelnen Schrillzähnen, um einen möglichen Grössenverlauf festzustellen

Material und Methoden:

Untersucht wurde das Bild der Innenseite des rechten Vorderflügels einer Steppengrille. Dieses Bild wurde zuvor mit einem Rasterelektronenmikroskop der Universität Basel aufgenommen. Deshalb war es auch auf deren Server gespeichert. Die Website der Nanoimaging Abteilung verfügt über ein Tool, womit Distanzen gemessen werden können. Dieses Tool wurde angewandt.

Dieses hat eine Messgenauigkeit von ungefähr $2.8 \mu\text{m}$. Es misst die Distanzen also alle $2.8 \mu\text{m}$. Weil aber die durchschnittliche Grösse der Schrillzähnen auf verschiedenen Teilbereichen der Schrillleiste relevant ist und es sich dabei um einen Messfehler von 3.5% bis 10 % handelt, ist dies nicht weiter problematisch.

Danach wurde die Länge der einzelnen Schrillzähnen gemessen, indem eine Linie vom obersten erkennbaren Punkt des jeweiligen Schrillzähns zum untersten erkennbaren Punkt desselben Schrillzähns gezogen wurde. Die Längenangabe erfolgt automatisch.

Da dies für jedes Schrillzähnen gemacht wurde, konnte daraus auch die Anzahl an Schrillzähnen ermittelt werden.

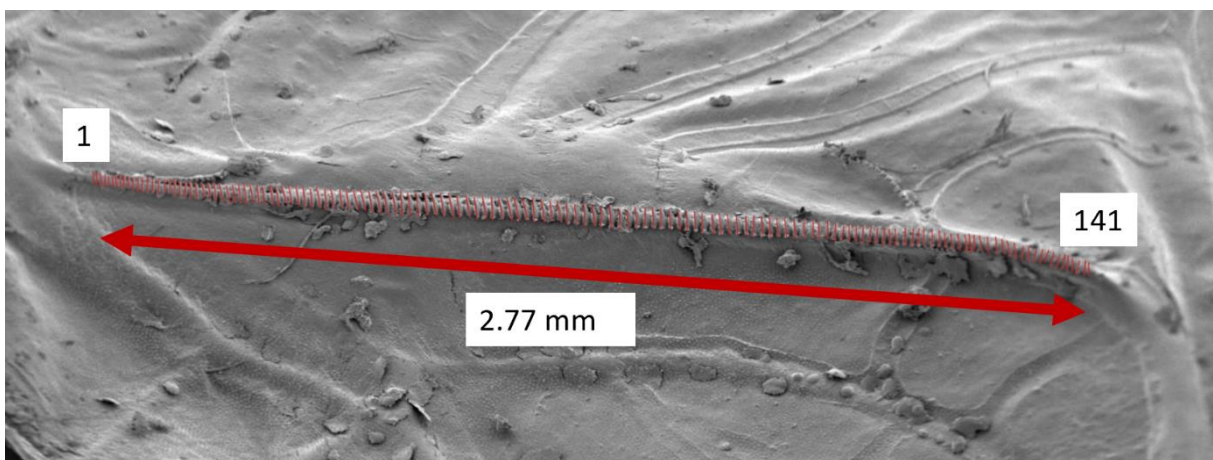
Die Schrillzähnen wurden von der in der Mitte der Steppengrille liegenden Seite gegen aus von 1 bis 141 nummeriert. Dies entspricht der Reihenfolge, in der die Schrillzähnen beim Zirpen beansprucht werden. Für das Bild bedeutet dies von links nach rechts.

Die Gesamtlänge wurde von Schrillzähnen Nummer 1 bis zu Schrillzähnen Nummer 141 gemessen.

Resultate:

Die Gesamtlänge der Schrillleiste betrug 2.77 mm .

Es konnten 127 Schrillzähnen eindeutig identifiziert werden. Das Bild ist an den Rändern der Schrillleiste ein wenig unscharf. Am linken Rand wurden zwei weitere Schrillzähnen vermutet. Am rechten Rand wurden 12 weitere Schrillzähnen angenommen. Sie sind nur teilweise erkennbar und nicht eindeutig identifizierbar. Deshalb war die Berücksichtigung einer Messgenauigkeit von ± 3 Schrillzähnen sinnvoll. Insgesamt befinden sich also 141 ± 3 Schrillzähnen auf der Schrillleiste.



Nr.	Breite in μm	Nr.	Breite in μm	Nr.	Breite in μm
1	37.4	48	69	95	51.8
2	37.4	49	69	96	54.7
3	37.4	50	71.9	97	54.7
4	31.6	51	66.2	98	51.8
5	28,8	52	69	99	51.6
6	31.6	53	66.2	100	48.9
7	31,8	54	69	101	48.9
8	34.5	55	66.2	102	51.8
9	37.4	56	71.9	103	43.2
10	37.4	57	66.2	104	46
11	43.2	58	66.2	105	46
12	43.2	59	63.3	106	51.8
13	43.2	60	66.2	107	51.8
14	40.3	61	66.2	108	46
15	43.2	62	60.4	109	51.8
16	37.4	63	66.2	110	48.9
17	43.2	64	69	111	48.9
18	48.9	65	66.2	112	51.8
19	46	66	69	113	51.8
20	46	67	66.2	114	46
21	48.9	68	57.5	115	48.9
22	48.9	69	60.4	116	48.9
23	46	70	60.4	117	46
24	46	71	60.4	118	43.2
25	54.7	72	66.2	119	46
26	51.8	73	63.3	120	48.9
27	51.8	74	60.4	121	51.8
28	51.8	75	66.2	122	51.8
29	57.5	76	57.5	123	46
30	54.7	77	54.7	124	46
31	51.8	78	57.5	125	46
32	57.5	79	54.7	126	48.9
33	57.5	80	60.4	127	46
34	54.7	81	57.5	128	46
35	54.7	82	54.7	129	40.3
36	60.4	83	51.8	130	40.3
37	60.4	84	54.7	131	37.4
38	54.7	85	51.8	132	40.3
39	60.4	86	57.5	133	37.4
40	60.4	87	57.5	134	40.3
41	57.5	88	57.5	135	43.2
42	51.8	89	57.5	136	43.2
43	66.2	90	51.8	137	43.2
44	60.4	91	54.7	138	40.3
45	63.3	92	57.5	139	40.3
46	63.3	93	57.5	140	43.2
47	66.2	94	57.5	141	37.4

Die Durchschnittliche Länge eines Schrilzähnnchens berechnet sich wie folgt:

$$\frac{\text{Summe aller Längen der Schrilzähnnchens}}{141} = \frac{7385,2\mu\text{m}}{141} = 52,4 \mu\text{m}$$

Die durchschnittliche Länge eines Schrilzähnnchens beträgt 52,4 Mikrometer.

Obere Abweichung:

$$\frac{\text{Gesamtsumme} + (141 \cdot 2,8 \mu\text{m})}{141} = 55,2 \mu\text{m}$$

Untere Abweichung:

$$\frac{\text{Gesamtsumme} - (141 \cdot 2,8 \mu\text{m})}{141} = 49,6 \mu\text{m}$$

Messfehler = $\pm 2.8 \mu\text{m}$

10.1.2 Aufnahmen des Zirpens mit dem Mikrofon

Die Dateien der Aufnahmen des Zirpens mit dem Mikrofon und die dazugehörigen FFT-Diagramme befinden sich auf dem USB-Stick, der mit dieser Arbeit abgegeben wurde.