Das Trommeln des Buntspechtes *Dendrocopos major* - eine Analyse mit Anleihen aus der Schwingungstheorie

HELMUTH MEIDHOF, Großostheim

Bestimmt hat schon jeder die Trommelrufe der Buntspechte im Frühjahr wahrgenommen. Der Eine oder Andere mag sich die Frage gestellt haben, ob es nicht eine Möglichkeit gibt, die dahinterstehenden Gesetzmäßigkeiten aufzudecken. Wie gelingt es dem Buntspecht die Lautstärke hervorbringen? Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit der Trommelruf gelingt? Wer sich auf etwas technische Physik in Kombination mit der Hilfswissenschaft Mathematik einlässt, wird mit Erkenntnissen belohnt!

In der Arbeit werden als Resonanzkörper des Buntspechtes Äste ausgewählt, die durch die Trommelwirbel zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Es wird gezeigt, dass die Äste nicht in ihrer Eigenfrequenz, sondern in der Spechttrommelfrequenz schwingen. Nur so bleiben akustisch die, übrigens für jede Spechtart, charakteristischen Trommelwirbel erhalten. Es wird auch ermittelt, wie weit die Trommelfrequenz von der Ast-Eigenfrequenz abweichen darf, um noch hörbare Schallschwingungen zu erzeugen. Die Eigenfrequenz der Äste in Abhängigkeit der Durchmesser werden in Diagrammform vorgestellt.

Einleitung

Im Frühjahr kann der aufmerksame Waldbesucher die lauten und markanten Trommelwirbel der Buntspechte hören, die etwa eine dreiviertel Sekunde andauern. Das Weibchen trommelt meist etwas kürzer als das Männchen. Durch die hohe Intensität können sie auf weite Entfernungen wahrgenommen werden. Das Trommeln dient als Ersatz für den Gesang und ist ein Kommunikationsinstrument. Weiterhin grenzt er damit sein Revier ab, oder er sucht einen Partner. Zur Nahrungssuche wird es nicht benötigt. Aus wissenschaftlichem Interesse sollen mit Hilfe der

Mathematik und der technischen Physik die hinter dem Trommeln stehenden Gesetzmäßigkeiten entschlüsselt werden. Vielleicht lassen sich der Natur noch ein paar Geheimnisse entlocken.

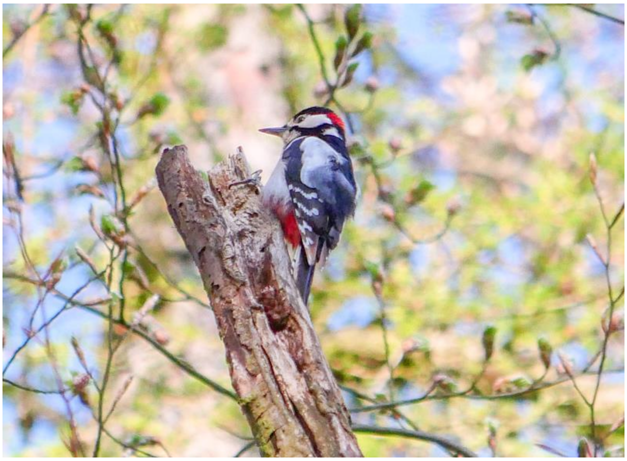

Abb. 1: Buntspechtmännchen trommelt am Ende eines Astes. 8.4.2020 Großostheim

Abb. 2: Buntspecht auf Nahrungssuche. 16.12.2020 Großostheim

Material und Methode, Grundlagen der Balkenschwingung und der erzwungenen gedämpften Schwingung

Wie schafft dieser etwa amselgroße ca. 23 cm lange und ca. 80 Gramm schwere Vogel diese Energieleistung. Das Geheimnis sind die verwendeten Resonanzkörper, die er als Schallquelle nutzt. Resonanzkörper können sehr unterschiedlich ausfallen, wie Dachrinnen, Hohlstellen an Bäumen und sogar ganze Wände. Sehr geeignet und im Wald häufig vorkommend sind ganz einfach Äste. Die Trommelfrequenz regt den Ast zu einer Antwortfrequenz an und der Ast fängt an zu schwingen. Sind die Schwingungen stark genug, übertragen sie sich auf die Umgebungsluft und erreichen als Luftschall unser Ohr. Durch einen einzigen Schlag alleine würde der Ast nicht in dem Maße zum Schwingen angeregt werden können, wie durch viele Trommelschläge. Physikalisch gesehen bewirken sie eine „erzwungene Schwingung“ durch periodische Krafteinwirkung. Eine große Schwingweite und dadurch erhöhte Schallabstrahlung erzielt der Specht, wenn die Schlagfrequenz mit der Eigenfrequenz des Astes übereinstimmt. Je weiter sich die Schlagfrequenz von der Eigenfrequenz des Astes unterscheidet, desto geringer wird die Schwingweite. Jeder Ast besitzt eine eingeprägte innere Dämpfung und eine äußere Dämpfung bedingt durch die umgebende Luft. Ansonsten könnten sich die Schwingweiten immer weiter aufschaukeln.

Um das System des Astes einer Berechnung zugänglich zu machen und möglichst einfach zu halten, wird als Ersatz ein einseitig eingespannter homogener Balken mit konstantem Querschnitt eingeführt und die Biegeschwingungstheorie von Balken aus der technischen Mechanik angewendet. Auf die Herleitungen der Gleichungen wird verzichtet. Mit dieser Methode kann die jedem Ast innewohnende Eigenfrequenz bestimmt werden. Da die Spechttrommelfrequenz nicht mit der Asteigenfrequenz übereinstimmt, muss untersucht werden, ob der Ast noch akustisch hörbare Schwingungen erzeugen kann. Hier hilft die Methode der erzwungenen Schwingung von Balken weiter.

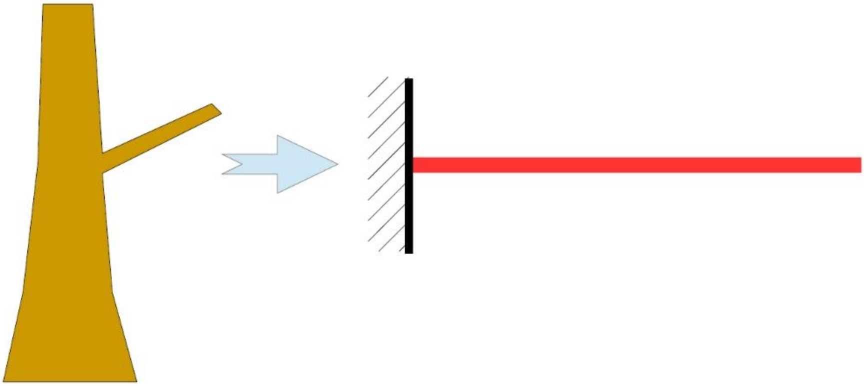

Abb. 3: Balken als Ersatzsystem für einen Ast am Baum

Der einseitig eingespannte Balken kann laut Schwingungstheorie nur definierte Eigenschwingungsformen annehmen mit den dazugehörenden Eigenfrequenzen. In unserem Fall des Spechtes sind es Biegeschwingungen, da er quer zur Astrichtung klopft. Äste mit Seitenast könnten theoretisch auch zu Torsionsschwingungen angeregt werden, wenn der Specht am Seitenast quer zum Hauptast klopfen würde (kommt wahrscheinlich nicht vor). Vom Specht angeregte Longitudinal-Schwingungen eines Astes sind ebenfalls ausgeschlossen. Er müsste dafür in Achsrichtung klopfen.

Die Eigenschwingungsform mit der niedrigsten Frequenz ist die Grundschwingung (Abb. 4). Schwingungsformen höherer Ordnung sind Oberschwingungen. Abb. 5 zeigt die 1. Oberschwingung. Höhere Ordnungen als die 1. Oberschwingung werden hier nicht behandelt. Der Balken schwingt bei Anregung zwischen der durchgezogenen und gestrichelten Linie hin und her. Die Amplituden in den Abbildungen sind überhöht dargestellt. Die Grundschwingung stellt sich eher an kürzeren Ästen ein. Bei weiter steigender Astlänge sinken die Eigenfrequenzen immer weiter und die Oberschwingungen bekommen die Oberhand. Es ist nicht ausgeschlossen, dass Grund- und Oberschwingungen simultan vorkommen.

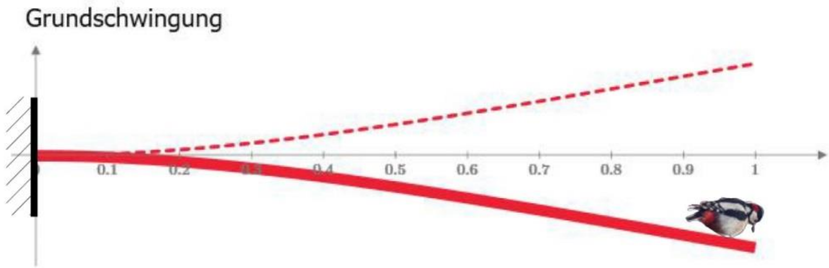

Abb. 4: Grundschwingungsform mit der günstigen Trommelstelle des Buntspechtes

Die 1. Oberschwingung nach Abb. 4 besitzt einen sogenannten Knoten bei 0,78-facher Stablänge. An Knoten existieren keine Amplituden.

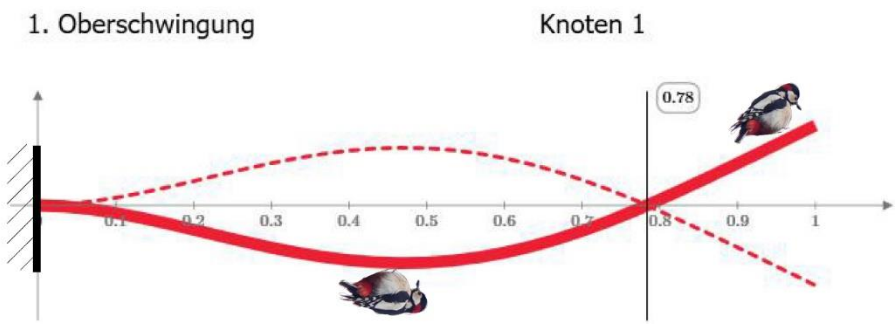

Abb. 5: Oberschwingungsform mit den zwei günstigen Trommelstellen des Buntspechtes

Die größte Wirkung hinsichtlich Lautstärke beim Trommeln erzielt der Specht an Stellen großer Schwingungsamplituden. Pech hätte er an Knoten und in der Nähe der Einspannstelle, da an diesen Stellen keine Schwingungsanregung möglich ist. Günstige und effiziente Stellen sind in der Grundschwingung und der 1. Oberschwingung dargestellt. An diesen Stellen sollte der Specht während des Trommelns zu beobachten sein.

Erklärungen zur Physik des Trommelns

Die Frequenzen der Grund- und Oberschwingungen sind nicht harmonisch gestaffelt, also nicht äquidistant. Auch wenn die Gleichungen nicht für jeden verständlich sind, ist dies sofort aus der Darstellung des Graphen der sogenannten „charakter-istischen Gleichung“ (Diagramm 1 Rechteck um Gleichung) ersichtlich (für den einseitig eingespannten Balken). Die Schnittpunkte der beiden abgebildeten Teilfunktionen sind die Lösungspunkte zur Berechnung der Frequenzen und der Eigenschwingungsformen. Die cos( )-Funktion (blauer Graph) schneidet die Abszisse (x-Achse) in gleichen Abständen. Aber nicht die Schnittpunkte der **cos( )**-Funktion und der **-1/cosh( )**-Funktion. Sie liegen versetzt daneben.

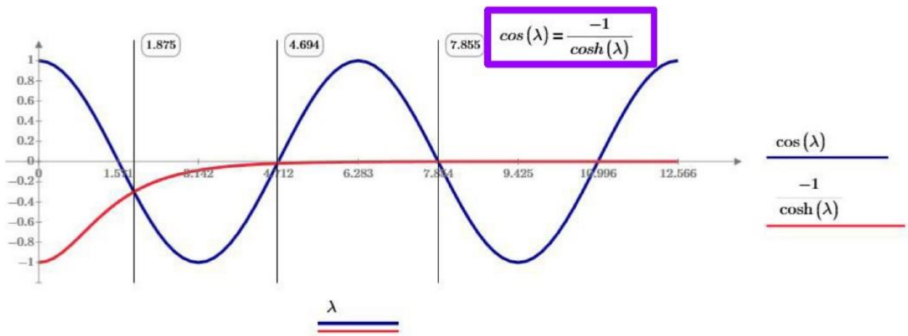

Diagramm 1: Charakteristische Gleichung

Die Gleichung zur Berechnung der Eigenfrequenzen (Gleichung 1) von einseitig eingespannten Balken mit konstantem kreisförmigen Querschnitt lautet:

$$f = \frac{\lambda_i^2 \cdot d}{L^2 \cdot 8 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} \lambda_1 &= 1.875 \\ \lambda_2 &= 4.694 \\ \lambda_3 &= 7.855 \end{aligned}$$

Gleichung 1: Eigenfrequenzen eines einseitig eingespannten Balkens

Die λ-Werte entsprechen den Schnittpunkten der Graphen von Diagramm 1 und gehen quadratisch in die Gleichung ein. λ1 steht für die Grundschwingung (Abb. 4) und λ2, λ3 für die Oberschwingungen (Abb.5).

f - Balkeneigenfrequenz [Hz]
d - Balkendurchmesser [mm]
L - Balkenlänge [mm]
E - Biege-Elastizitätsmodul kurz E-Modul
(Materialkennwert) [N/mm^2]
ρ - Holzdichte [kg/m^3]
λ - Kennwert für die Grund- und Oberschwingungen
i = 1,2,3... Natürliche Zahlen

Der Einfluss der Paramter in der Frequenzgleichung wird nun näher beschrieben.

Die Frequenz nimmt linear mit dem Balkendurchmesser d zu. Doppelter Durchmesser bedeutet doppelte Frequenz.

Die Länge L geht quadratisch in die Gleichung ein und steht im Nenner. Doppelte Länge verringert die Frequenz auf ein Viertel.

Der E-Modul steht unter der Quadratwurzel und die Frequenz nimmt bei 4-fachem Wert auf das Doppelte zu.

Die Holzdichte steht im Nenner unter der Quadratwurzel. Die Frequenz halbiert sich bei 4-fach höherer Dichte.

Das Elastizitätsmodul (E-Modul) ist ein Materialkennwert, der die elastische Dehnung eines Körpers unter Belastung beschreibt. Je größer die Belastung umso größer ist die Dehnung und bezüglich des E-Moduls streng linear. Für den Balken bedeutet das, dass er sich z. B. bei Zugbeanspruchung verlängert und bei Querbeanspruchung biegt. Den Betrag des Elastizitätsmoduls kann man sich als die virtuelle Kraft [N] vorstellen, die man aufbringen muss, um einen Balken mit einem Quadratmillimeter Querschnitt auf das Doppelte der Ursprungslänge zu dehnen. Die üblichen Dehnungswerte sind meist klein. Bei Entlastung nimmt der Körper wieder die Ursprungslänge ein (Elastizität). Gäbe es keine Dehnung, würde jeder Körper bei Belastung spröde brechen. Für die Biegeschwingung ist der Biege-E-Modul maßgebend. Bei Holz existieren sogar in jeder Raumrichtung unterschiedliche E-Module bedingt durch die Wachstumsstruktur des Holzes.

Zur Berechnung der Eigenfrequenzen werden die Kennwerte für verschiedene Holzarten, Feuchtegrade und Temperaturen ermittelt. Die Holzdichte ρ (Internet-Recherche) streut in einem weiten Bereich. Theoretisch sind sogar Feuchtegrade von über 100% möglich z. B. wenn der Baum frisch im Saft steht. Eine Auswahl ist aufgeführt in Tabelle 1.

Holzart	Rohdichte	
	Nass 60%	Raumklima 12%
	[kg/m^3]	[kg/m^3]
Fichte	600	450
Tanne	600	450
Kiefer	660	530
Buche	900	760
Eiche	900	705

Tabelle 1: Auswahl Rohdichte von Holz

Werte für das Biege-E-Modul von Holz sind schwieriger zu ermitteln. Sie sind hauptsächlich abhängig von der Holzart, Holzfeuchte und Temperatur. Im Internet findet man eine große Spannweite an Werten, sogar selbst innerhalb einer Holzart. Das E-Modul ist niedrig bei feuchtem/nassen Holz und wird höher bei trockenem Holz. Bei hohen Temperaturen ist er niedrig und steigt bei kalten bis eiskalten Temperaturen an. Um rechnen zu können, wurden Werte festgesetzt (Tabelle 2).

Holzart	Biege-E-Modul	
	Raumtemperatur	sehr kalt
	[N/mm^2]	[N/mm^2]
Fichte	11000	13000
Tanne	12500	14700
Kiefer	11000	13000
Buche	14000	16000
Eiche	13000	15000

Tabelle 2: Auswahl Biege-E-Modul aus der Literatur

Werte für feuchtes Holz sind nicht zu finden. Sie müssen in einem Versuch bestimmt werden. Für kreisförmige Probestäbe mit homogener Dichte wird das E-Modul berechnet nach Gleichung 2. Mit Hilfe der Anleitung zum Versuchsaufbau in Abb. 6 kann die Durchbiegung der Probenstäbe ermittelt werden bei angehängtem Gewicht. Der Abstand des Gewichtes von der Einspannstelle, sowie der Probendurchmesser wird bestimmt und das E-Modul nach der Gleichung 2 berechnet.

$$E = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{3 \cdot w \cdot d^4} \cdot \frac{\pi}{64}$$

Gleichung 2: Ermittlung des E-Moduls

E Elastizitätsmodul (kurz: E-Modul)
m Masse des angehängten Körpers
g Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
L Länge Probestab/Ast
d Stabdurchmesser
w Gemessene Durchbiegung durch das Gewicht

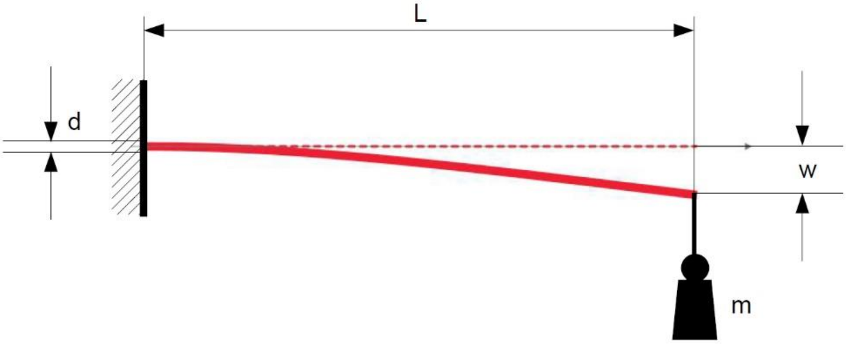

Abb. 6: Versuchsaufbau zur Ermittlung des E-Moduls

Mit Ästen aus dem Wald und einem Probestab aus dem Baumarkt mit einem genauen Durchmesser, wurden Näherungswerte ermittelt. Die Schwierigkeit von Ästen ist, dass sie keinen exakt runden Querschnitt haben, Verdickungen und Augen besitzen, gekrümmt sind und Risse enthalten können. Alle diese „Fehlstellen“ erniedrigen den E-Modul. Die ermittelten Werte sind daher nur Näherungswerte. Nasses Holz hat in etwa nur die Hälfte des E-Modul-Wertes von trockenem Holz. Der Wert des trockenen Probestabes stimmt gut mit den Literatur Werten von Tabelle 2 überein.

Es folgen grundsätzliche Überlegungen zu Ästen, die erfüllt sein müssen, um die Schwingfähigkeit zu ermöglichen. Wenn der Specht an einem Ast trommelt, ist das physikalisch gesehen eine periodisch erregte erzwungene Schwingung. Der Ast antwortet mit einer bestimmten Frequenz und Schwingweite.

Probestab	Holzart	Abhänglänge der Masse L [mm]	Durchmesser d [mm]	Angehängte Masse m [kg]	Durchbiegung w [mm]	E-Modul errechnet E [N/mm^2]
Trockener Ast gespalten	Buche	544	29	2,35	8	4453
Trockener Ast	Buche	475	20	1,25	6	9293
Frischer Ast	Buche	585	13	0,24	24,5	4573
Frischer Ast	Buche	595	20	1,25	27	4059
Rundmaterial trocken Baumarkt	?	515	14,4	1,25	22	12020

Tabelle 3: E-Modul an Probestäben durch Versuch bestimmt

Theoretisch könnte der Specht auch nur einen einzelnen Schlag setzen, anstatt zu trommeln. Durch das Trommeln wird aber mehr Schwingungsenergie eingebracht, was zu einer größeren Lautstärke führt. Und der Specht möchte ja gehört werden.

Äste mit vielen und langen Seitenästen, die insbesondere mit Knospen oder schon mit Blattwerk versehen sind, muss der Specht meiden, da dieses Beiwerk eine erhebliche Luftdämpfung hervorrufen würde und die Astbewegung verpuffen würde. Frische Äste haben einen hohen Feuchtegrad und damit eine hohe Masse, welche mit einem höheren Energieaufwand beim Trommeln verbunden wäre, da mehr Masse bewegt werden muss. Die Dämpfungseigenschaften von frischem und trockenem Holz unterscheiden sich. Dürre Äste haben eine geringere Dämpfung als frische Äste. Eine geringere Dämpfung führt zu größeren Schwingungsamplituden und damit Lautstärke. Es bleibt dem Specht nichts anderes übrig, als gezielt Äste zu wählen, die am Ende abgebrochen sind und nicht zu viele Seitenäste besitzen. Diese Aststummel sind ausgetrocknet oder werden es zwangsläufig.

Die Trommelwirbel des Buntspechtes werden im Folgenden näher auf die auftretenden Trommelfrequenzen hin untersucht und es wird der Frage nachgegangen, ob die Äste auch dann noch schwingfähig sind, obwohl die Spechtfrequenz von der Eigenfrequenz der Äste abweicht.

In der Literatur wird die Trommelfrequenz des Buntspechtes meist mit 19 Hz angegeben bei etwa 0,7 Sekunden Dauer. In der Praxis taucht natürlich die Frage auf, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Buntspecht Äste findet, die genau bei dieser Anregungsfrequenz schwingen. Das ist quasi unmöglich. Und trotzdem funktioniert das Trommeln. Es ist davon auszugehen, dass der Specht auch dann Äste zum Schwingen bringen kann, wenn die Eigenfrequenz der Äste von der Anregungsfrequenz des Spechtes abweicht. Wird ein 20%-Zuschlag zu Grunde gelegt, würden auch noch Äste mit Eigenfrequenzen im Bereich von 19 Hz ± 20% (ca. 16 Hz bis 23 Hz) zum Schwingen gebracht werden können. Dieser Wert aus der Maschinenindustrie wird angewendet bei Maschinen mit kritischen Drehzahlen. Ein Bereich von bis zu ±20% im Umkreis der kritischen Drehzahl wird gemieden, um die Maschine nicht zu gefährden. Der Specht möchte im Gegensatz dazu exakt diesen Bereich nutzen.

Zur genaueren Analyse der Buntspechttrommelfrequenz wurde ein Sonogramm aus der App „Die Stimmen der Vögel Europas“ entnommen (Abb. 7). Die Schlagfrequenz nimmt vom Anfang bis zum Ende des Trommelns hin immer mehr zu. Um die Anfangs- und Endfrequenz ermitteln zu können, wird mit Hilfsmaßen gearbeitet. Der eingetragene Wert 95,5 mm/s bezieht sich auf die 1-Sekunde-Markierung im Sonogramm. Die Darstellung ist leider etwas windschief, so müssen noch die Werte 121,5 mm und 120,0 mm zur Umrechnung genutzt werden. Die 16 Trommelschläge dauern umgerechnet 0,79s. Die 16 Schläge oder 15 Intervalle ergeben eine durchschnittliche Frequenz von 19,0 Hz. Die Anfangsfrequenz (6 mm) ergeben 15,7 Hz und die Endfrequenz (4 mm) 23,6 Hz. Das ist der Frequenzumfang, den der Buntspecht laut Sonogramm erreicht. Der Buntspecht hämmert also nicht mit konstanter Frequenz. Somit hat er eine gewisse Bandbreite an Anregungsfrequenzen „eingebaut“ und erhöht die Wahrscheinlichkeit Äste zu finden, die er zum Schwingen anregen kann. Der obige Schätzungsschlagswert von ± 20 % auf den erweiterten Frequenz-Bereich angewendet, erhöht den möglichen Eigenfrequenzumfang der Äste auf mindestens 13 bis 28 Hz.

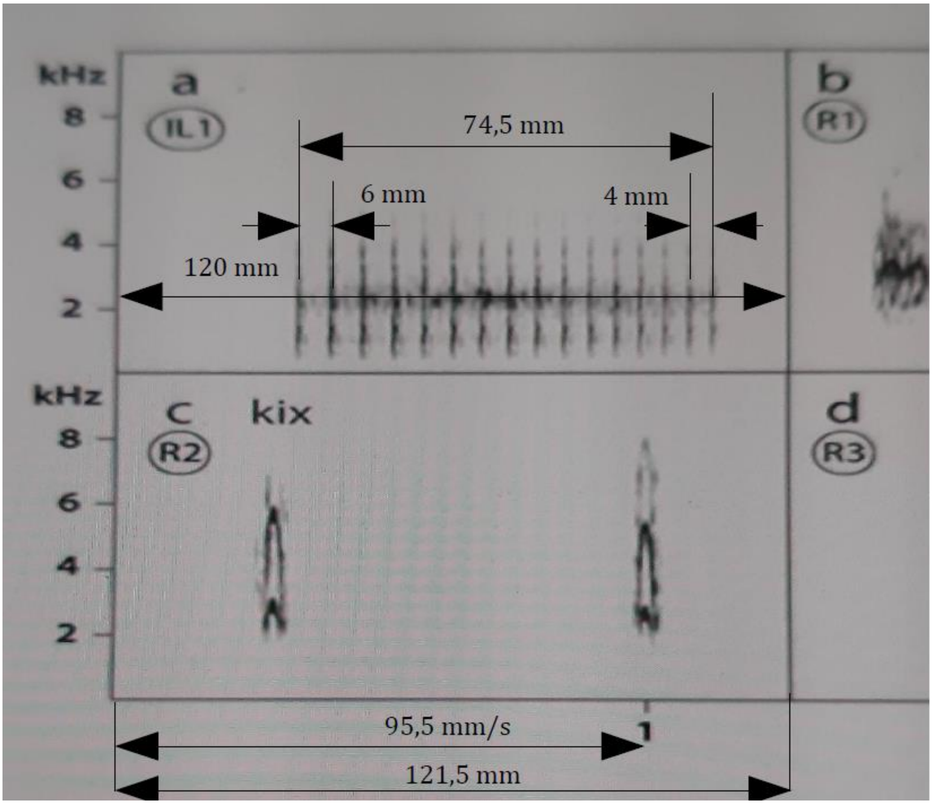

Abb. 7: Sonogramm mit Trommelfrequenzbereich des Buntspechtes

Eine bessere Beurteilung, was die Anregungsfrequenzen des Spechtes auf die Antwortfrequenzen und ~amplituden des Astes bewirken, erlaubt die sogenannte Vergrößerungsfunktion aus der Theorie der erzwungenen gedämpften Schwingungen (Diagramm 2). Die Theorie geht von einer harmonischen (sinusförmigen) Erregung aus. Die Trommelschläge des Spechtes sind nicht harmonisch, aber in grober Näherung wird die Theorie hier trotzdem angewendet.

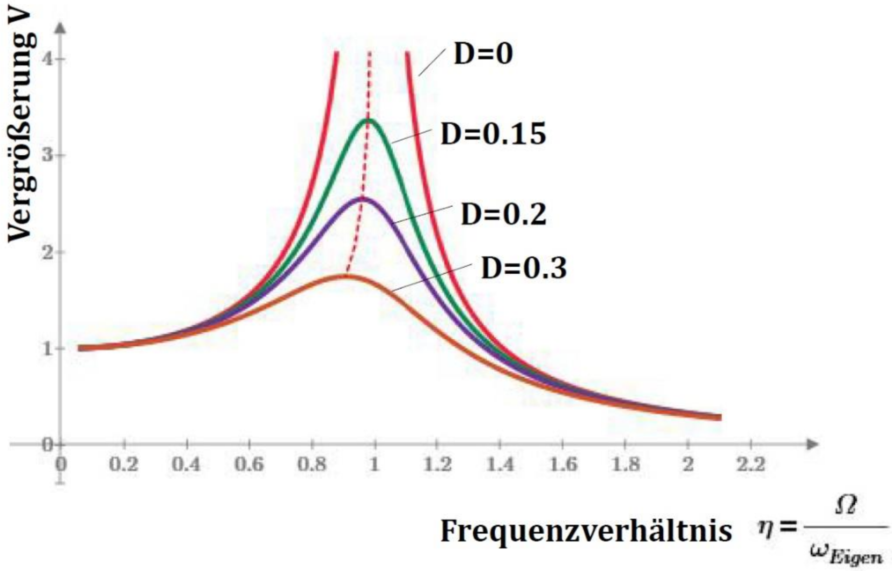

Diagramm 2: Darstellung der sogenannten „Vergrößerungsfunktion"

Auf der Abszisse (X-Achse) sind die Frequenzverhältnisse η aufgetragen (Anregungsfrequenz Ω des Spechtes zur Asteigenfrequenz ω-Eigen). Der Wert η=1 bedeutet, die Spechtfrequenz ist gleich der Asteigenfrequenz und wird gleichzeitig als kritische Frequenz bezeichnet. Kritisch deswegen, da bei kleiner Dämpfung große und damit zerstörerische Schwingweiten auftreten können. Der Wert 0,5 z. B. bedeutet, die Spechtfrequenz ist halb so groß wie die Asteigenfrequenz usw. Die Ordinate (Y-Achse) ist die sogenannte Vergrößerungsfunktion in Abhängigkeit der Dämpfung D. Die Dämpfung bestimmt die Schwingweite. Ist keine Dämpfung vorhanden (D=0) und die Anregungsfrequenz des Spechtes stimmt mit der Eigenfrequenz des Astes überein (η=1), schwingt der Ast theoretisch bis ins Unendliche. Die Vergrößerung erreicht große Werte. Je höher die Dämpfungswerte ausfallen, desto kleiner sind die Schwingungs-amplituden. Ist η kleiner 1 liegen unterkritische Verhältnisse vor und V strebt für sehr kleine η-Werte gegen 1. Werte über 1 ergeben überkritische Verhältnisse und V strebt für große η-Werte gegen 0. Sehr kleine η-Werte bedeuten sehr langsame Schlagfolge und Frequenz gegenüber der Asteigenfrequenz. Der Ast bewegt sich im Takt der Schlagfolge und besitzt genau die Amplitude V der Schnabelspitze des Spechtes. Der Vergrößerungswert ist daher 1. Bei Erhöhung der Schlagfrequenz z.B. η=0,8 kann der V-Wert auf z.B. 2 steigen, das hieße die doppelte Amplitude der Schnabelspitze. Sind die η-Werte sehr viel größer als 1, trommelt der Specht sehr viel schneller als die Eigenfrequenz des Astes und die Ast-Amplituden tendieren gegen Null. (In Analogie einer Wäschetrommel, die auch bei immer höheren Drehzahlen selbstzentrierend wirkt und kaum noch taumelt). Bei z.B. η=1,8 kann V etwa 0,5 sein, was die Hälfte der Schnabelspitzenamplitude bedeuten würde. Im unterkritischen Bereich werden die Frequenzen kleiner, aber die Schwingweiten bleiben hoch. Im überkritischen Bereich sind die Frequenzen hoch, aber die Schwingweiten werden immer kleiner.

Nach der Theorie ist es bedeutsam, dass der Ast beim Trommeln grundsätzlich immer in der Schlagfrequenz des Spechtes schwingt und nicht in seiner Eigenfrequenz! Egal, ob die Anregungsfrequenzen des Spechtes im über- oder unterkritischen Bereich gegenüber der Asteigenfrequenz liegen, der Frequenzumfang des Spechtes bildet sich stets ab. Dieser Zusammenhang ist wichtig, da jede trommelnde Spechtart ihre charakteristischen Trommelmerkmale klingen lassen kann. Im unterkritischen Fall sind die Schwingweiten aber größer und mit mehr Lautstärke verbunden. Ein einziger Schlag dagegen führt dazu, dass der Ast in seiner Eigenfrequenz schwingt, so als würde eine Stimmgabel angeschlagen werden. Auch wenn die Dämpfungswerte des Astes nicht genau bekannt sind, können doch wesentliche Zusammenhänge erklärt werden.

Die nächsten Bilder sollen einen Überblick geben, welche Auswirkungen der Frequenzumfang des Spechtes (15,7 bis 23,6 Hz) auf Äste mit dem oben definierten Eigenfrequenzumfang der Äste von 13 bis 28 Hz hat. Das Diagramm 3 zeigt die Situation eines Astes bei 19 Hz Eigenfrequenz. Die Abszisse (X-Achse) stellt nicht das Frequenzverhältnis η dar, sondern ist mit den Anregungsfrequenzen skaliert, um die Abbildung lesbarer zu machen. Der Frequenzumfang des Spechtes ist schraffiert dargestellt. Es sind zwei unterschiedliche Dämpfungskurven eingezeichnet. Es ergeben sich ordentliche Vergrößerungswerte, wie zu erwarten ist. Dies wäre die optimale Situation für den Specht, um möglichst laut zu tönen.

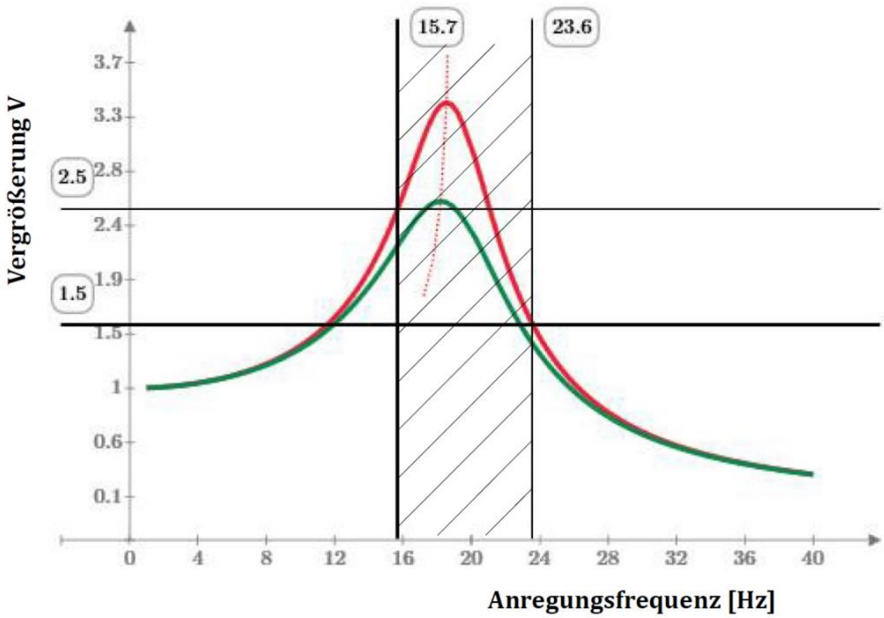

Diagramm 3: Vergrößerungsfunktion bei 19 Hz Asteigenfrequenz und Schwingungsanregung im Frequenzbereich des Spechtes von 15,7 bis 23,6 Hz bei 2 Dämpfungswerten

Bei der Asteigenfrequenz von ca. 13 Hz (Diagramm 4) liegt der Frequenzumfang des Spechtes im überkritischen Bereich. Es ergeben sich ebenfalls noch hohe Vergrößerungswerte. Man erkennt auch den Vorteil, den der Buntspecht durch seinen Frequenzbereich besitzt, denn die 15,7 Hz liegen näher an der Eigenfrequenz des Astes von 13,1 Hz, als konstant 19 Hz. Die Schwingungsamplituden werden dadurch größer.

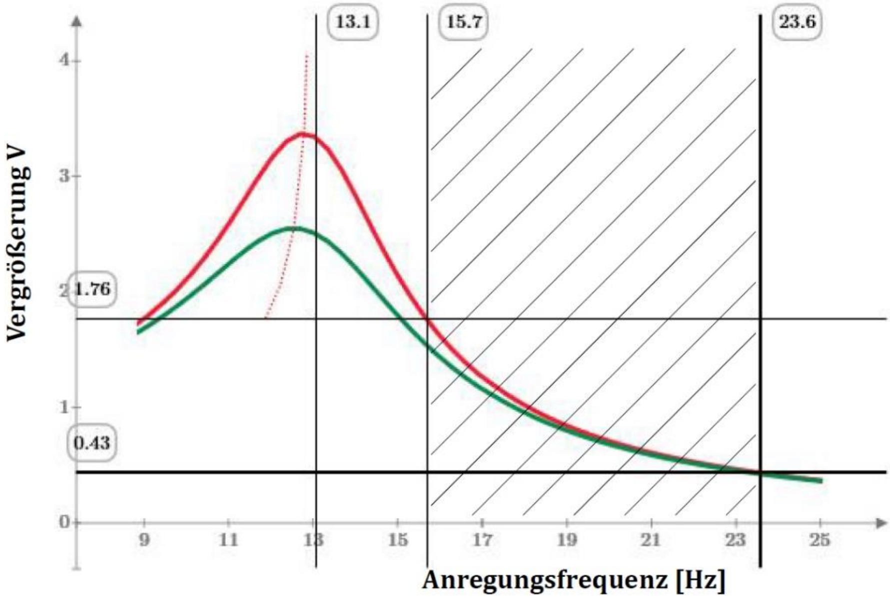

Diagramm 4: Vergrößerungsfunktion bei 13,1 Hz Asteigenfrequenz und Schwingungsanregung im Frequenzbereich des Spechtes von 15,7 bis 23,6 Hz

Bei der oberen Asteigenfrequenz von 28,3 Hz befindet sich der Specht-Frequenzbereich im unterkritischen Teil (Diagramm 5). Die Vergrößerungswerte sind ebenfalls noch optimal. In diesem Fall sind die 23.6 Hz näher an der Eigenfrequenz des Astes von 28,3 Hz als konstant 19 Hz.

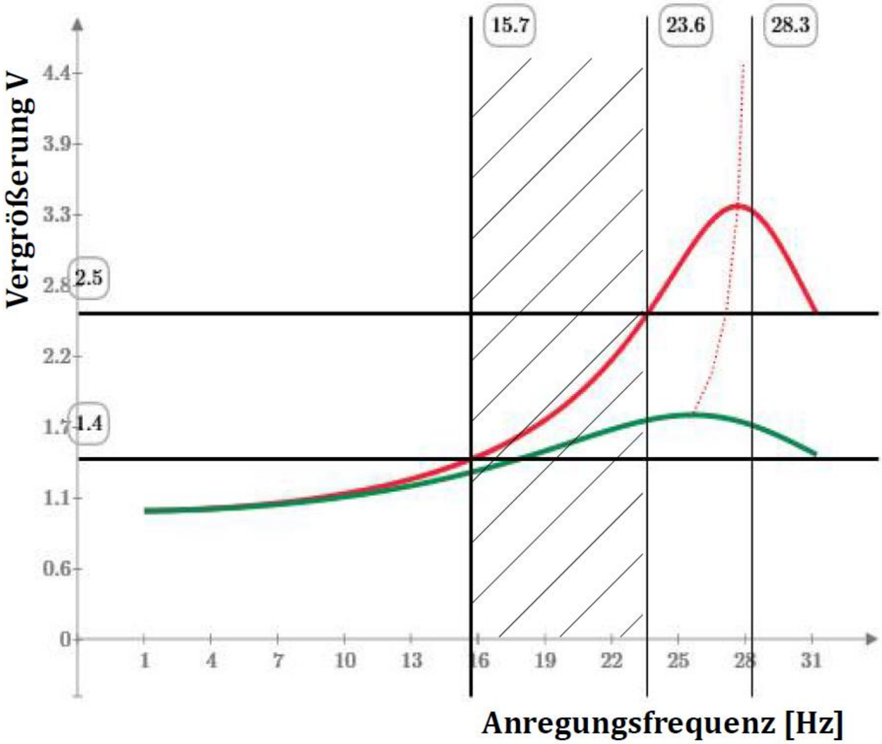

Diagramm 5: Vergrößerungsfunktion bei 28,3 Hz Asteigenfrequenz und Schwingungsanregung im Frequenzbereich des Spechtes von 15,7 bis 23,6 Hz

Es folgen Beispielrechnungen die mit Hilfe der Gleichung 1 erstellt wurden, um die Abhängigkeiten der Eigenfrequenz zu den Astdurchmessern und Längen darzustellen.

Beispiel 1: Asteigenfrequenz in Abhängigkeit der Astlänge für Ast-Ø 40 mm bei trockenem und nassem Fichten- und Eichenholz in der Grundschwingung (Diagramm 6)

Es wird der Einfluss von Holz mit geringer Dichte (Fichte) und hoher Dichte (Eiche) im nassen und trockenen Zustand im definierten Frequenzbereich von 13 bis 28 Hz dargestellt. Der willkürlich gewählte Astdurchmesser beträgt 40 mm. Nasses Holz hat eine höhere Dichte und gleichzeitig einen geringeren E-Modul. Dadurch kommen die großen Unterschiede zu Stande. Holz höherer Dichte hat bei gleicher Astlänge eine niedrigere Eigenfrequenz oder bei gleicher Frequenz eine kleinere Astlänge.

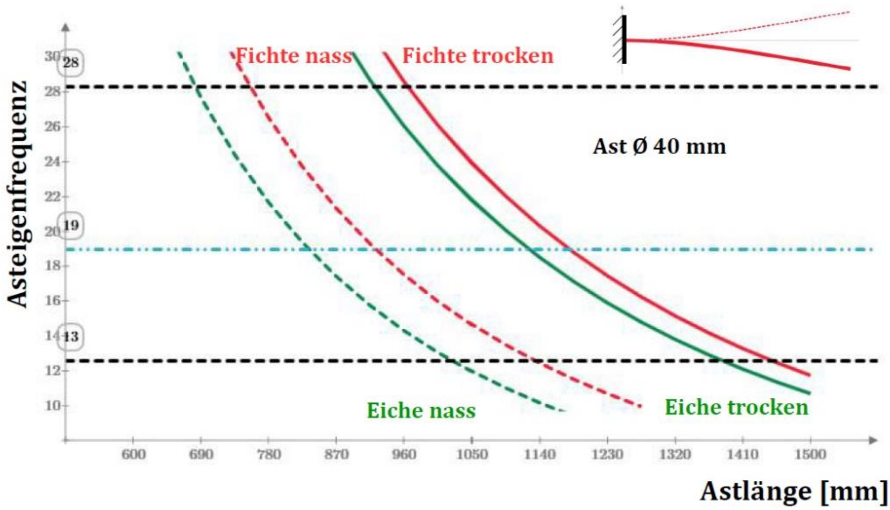

Diagramm 6: Asteigenfrequenz bei Fichte und Eiche im nassen und trockenen Zustand bei d=40 mm in Grundschwingungsform in Abhängigkeit der Astlänge.

Beispiel 2: Asteigenfrequenz in Abhängigkeit der Astlänge für Ø 40 mm bei trockenen und nassen Fichten- und Eichenholz in der 1. Oberschwingung (Diagramm 7)

In der 1. Oberschwingung ähneln sich die Bilder, aber die Astlängen sind größer.

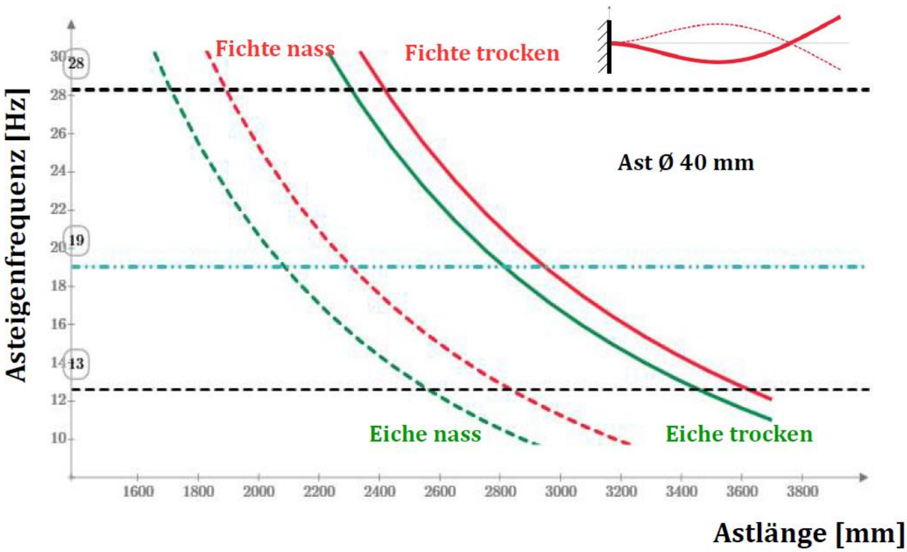

Diagramm 7: Asteigenfrequenz bei Fichte und Eiche im nassen und trockenen Zustand bei d=40 mm in der 1.Oberschwingungsform in Abhängigkeit der Astlänge.

Beispiel 3: Asteigenfrequenz in Abhängigkeit der Astlänge für Ast Ø 40 mm bei trockenem Fichten- und Eichenholz in der Grund- und 1. Oberschwingung (Diagramm 8)

Da der Specht wahrscheinlich nasses Holz meidet, wird trockenes Fichten- und Eichenholz benutzt, aber bei gleichzeitiger Darstellung der Grund- und ersten Oberschwingung. Wird der angenommene Frequenzumfang 13 bis 28 Hz betrachtet, klafft zwischen beiden Schwingungsformen eine Lücke in der Astlänge, die nicht abgedeckt ist, also zwischen den Astlängen 1420 mm bis 2430 mm für die Fichte. Würde der Frequenzumfang auf ca. 7 bis 40 Hz vergrößert, könnte der Specht einen riesigen Bereich an Astlängen betrommeln mit einem kontinuierlichen Übergang zu beiden Schwingungsformen und alles wäre schwingfähig. Das funktionierte für Weich- wie Hartholz.

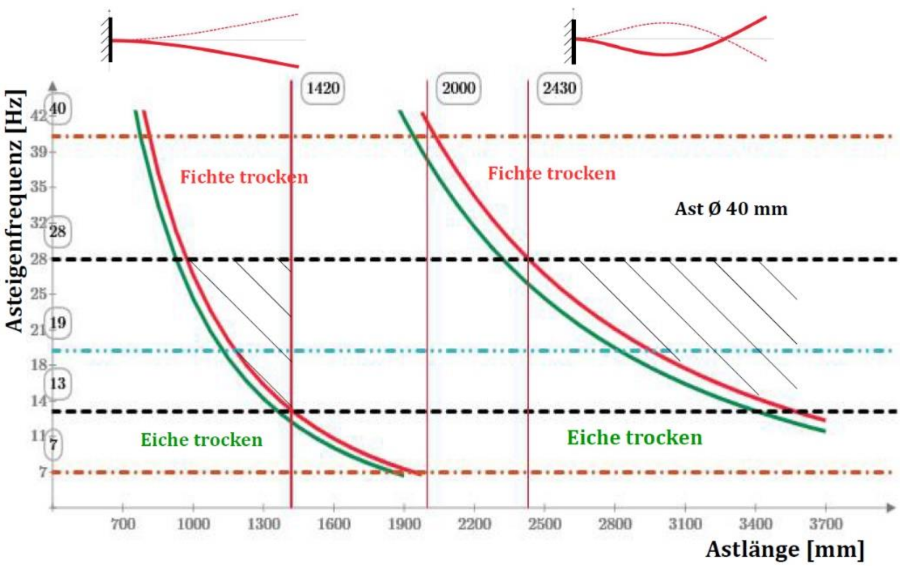

Diagramm 8: Asteigenfrequenz bei Fichte und Eiche im trockenen Zustand bei d=40 mm in der Grund- und 1.Oberschwingungsform

Zur Überprüfung des neuen Bereiches 7 bis 40 Hz werden zusätzlich die entsprechenden Vergrößerungsfunktionen dargestellt. Diagramm 9 zeigt die 7 Hz Asteigenfrequenz Situation. Die Vergrößerungswerte sind zwar relativ klein, aber sie schwingen noch im spürbaren Bereich besonders durch die Nähe der 15,7 Hz Anregungsfrequenz des Spechtes zur 7 Hz Eigenfrequenz des Astes.

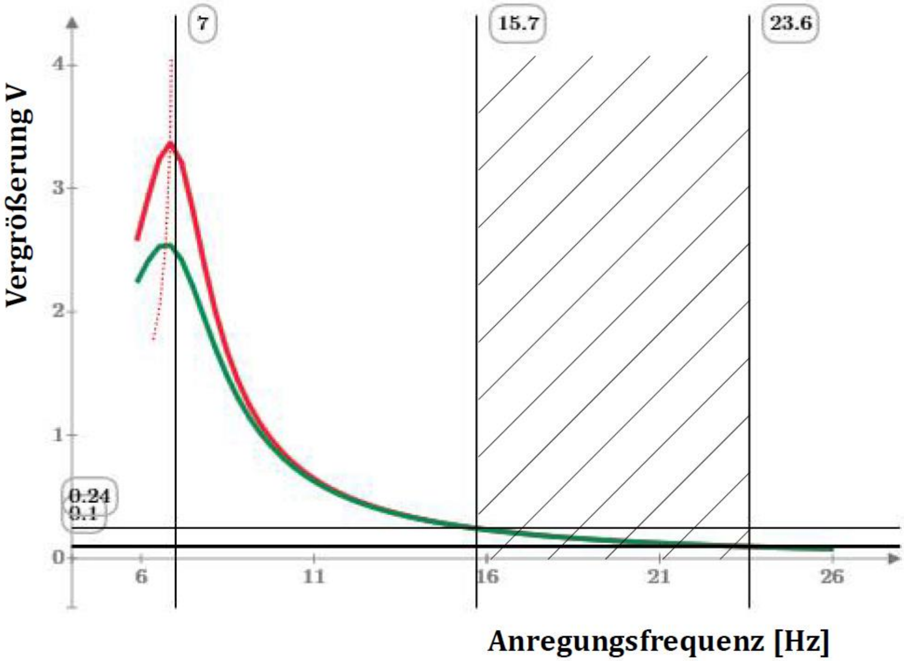

Diagramm 9: Vergrößerungsfunktion bei 7 Hz Asteigenfrequenz und Schwingungsanregung im Specht Frequenzbereich 15,7 Hz/ 23,6 Hz

Diagramm 10 zeigt die 40 Hz Ast Eigenfrequenz. Auch dies scheint möglich zu sein. Somit hat der Specht mit seinem Trommelfrequenzumfang eine ganze Palette an Astlängen zur Verfügung. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass die Äste nicht in ihrer Eigenfrequenz schwingen, sondern mit der Trommelfrequenz des Spechtes.

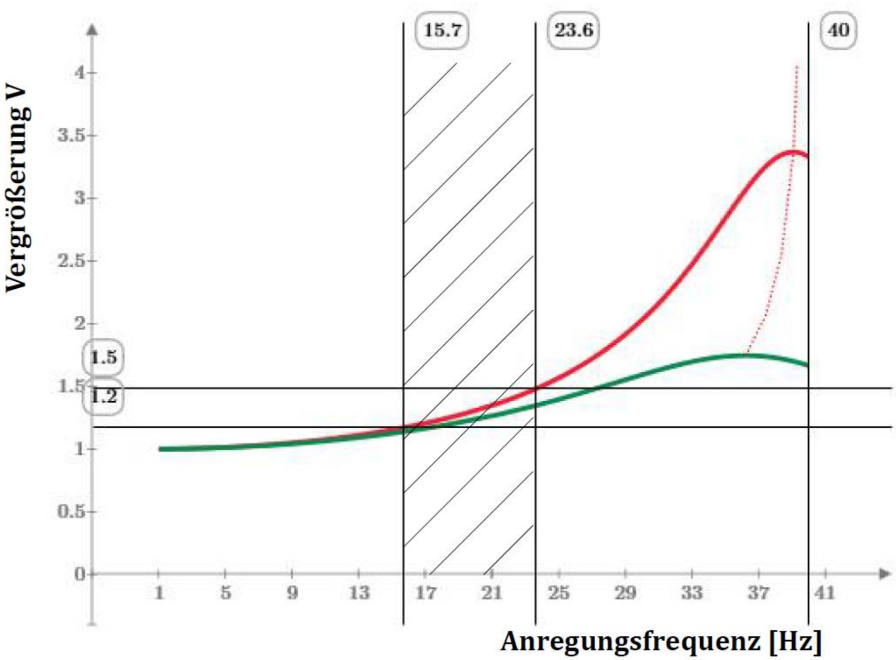

Diagramm 10: Vergrößerungsfunktion bei 40 Hz Asteigenfrequenz
und Schwingungsanregung im
Specht Frequenzbereich 15,7 Hz/ 23,6 Hz

Beispiel 4: Asteigenfrequenz in Abhängigkeit von der Astlänge für verschiedene Ast Ø mm bei trockenem Fichtenholz in der Grund- und 1. Oberschwingung. (Diagramm 11)

Die Übergänge zwischen Grund- und 1. Oberschwingung schließen sich selbst in dem dargestellten Astdurchmesserbereich von 20 bis 80 mm bei dem erweiterten Frequenzbereich 7 bis 40 Hz.

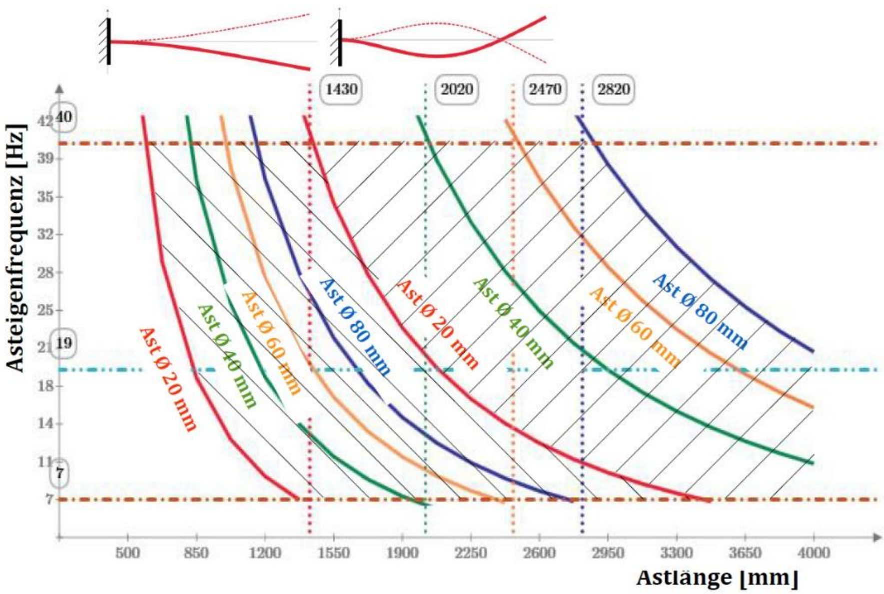

Diagramm 11: Optimale Astlänge bei Fichte im trockenen Zustand bei Astdurchmessern 20,40,60 und 80 mm bei Grund- und 1. Oberschwingungsform

Beispiel 5: Die Astlänge trockener Fichte in Abhängigkeit des Astdurchmessers bei Grund- und 1. Oberschwingung (Diagramm 12) mit Eigenfrequenz der Äste als Parameter. Astdurchmesser 10 bis 100 mm.

Diese alternative Darstellung zeigt ebenfalls den nahtlosen Übergang der Grund- zur 1. Oberschwingung.

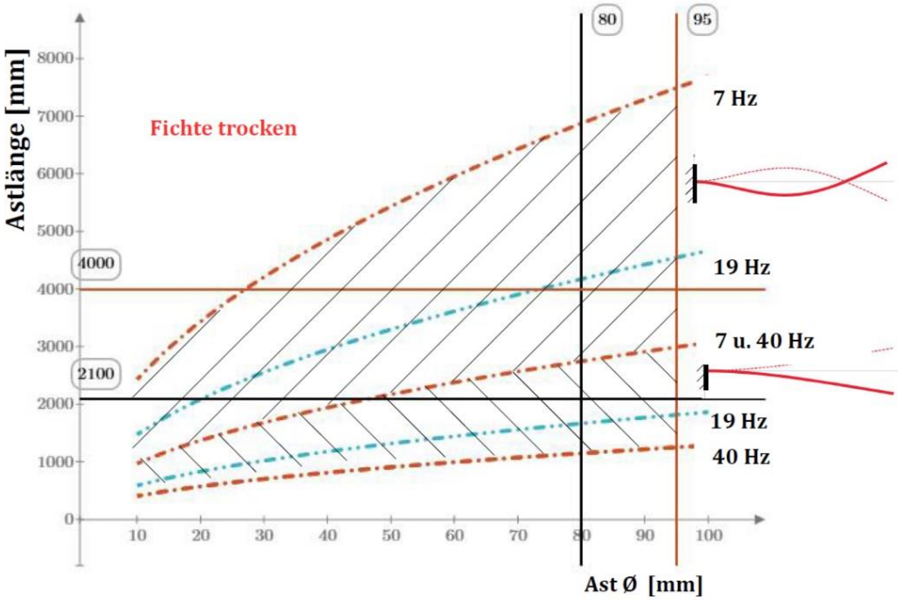

Diagramm 12: Astlänge bei Fichte im trockenen Zustand in Abhängigkeit des Astdurchmessern bei verschiedenen Frequenzen und bei Grund- und 1.Oberschwingungsform. D = 10 bis 100 mm

Beispiel 6: Die Astlänge trockener Fichte in Abhängigkeit des Astdurchmessers bei Grund- und 1. Oberschwingung (Diagramm 13) mit Eigenfrequenz der Äste als Parameter. Astdurchmesser 100 bis 250 mm.

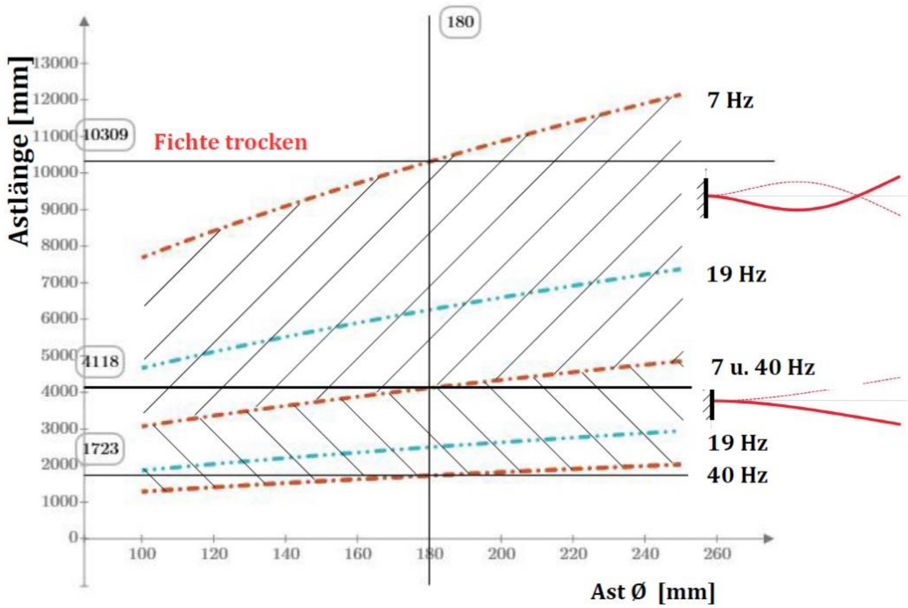

Diagramm 13: Astlänge bei Fichte im trockenen Zustand in Abhängigkeit des Astdurchmessers bei verschiedenen Frequenzen und bei Grund- und 1.Oberschwingungsform. D = 100 bis 250 mm

Beispiel 7: Asteigenfrequenz trockener Fichte in Abhängigkeit der Astlänge bei Grund- und 1. Oberschwingung (Diagramm 14) bei gegebenem L/D-Verhältnis des Astes.

Eine interessante Frage ist, ob die Asteigenfrequenz gleich bleibt bei konstantem Länge/Durchmesser-Verhältnis von Ästen. In erster Näherung sollte der Frequenzwert gleich bleiben. Aber Diagramm 14 zeigt, dass dem nicht so ist. Es besteht eine starke Abhängigkeit.

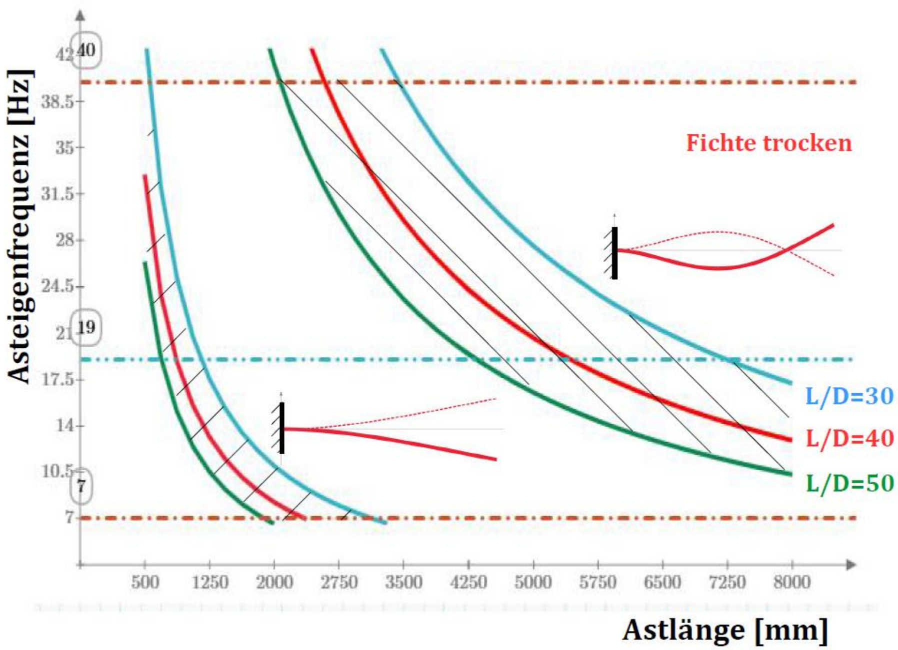

Diagramm 14: Asteigenfrequenz in Abhängigkeit der Astlänge bei gegebenem L/D Verhältnis bei Grund- und 1.Oberschwingungsform

Spechtbeobachtungen aus der Praxis siehe Abb. 8 und 9. Der trommelnde Buntspecht (Abb. 8) konnte im Großostheimer Wald beobachtet werden, wie er an der Spitze eines Aststummels saß. Bei einer angenommenen Körperlänge von 23 cm beträgt die Astlänge ca. 1,2 m und der Durchmesser ca. 80 mm. Aus Diagramm 12 kann mit diesen Werten auf die Grundschwingungsform geschlossen werden (schwarze horizontale und senkrechte Linien). Die Asteigenfrequenz liegt bei etwa 12 Hz. Der Specht sitzt an der idealen Stelle.

Abb. 8: Buntspecht trommelt am Ende eines Astes
(vermutlich Grundschwingung). 21.2.2021 Großostheim

Auf Abbildung 9 sitzt der Specht mittig auf einem dürren Ast im Großostheimer Wald. Die Astlänge wird auf ca. 4 m geschätzt und der mittlere Durchmesser auf 95 mm. Mit diesen Werten kann aus Diagramm 12 die 1. Oberschwingungsform abgelesen werden bei etwa 24 Hz Eigenfrequenz (bräunliche horizontale und senkrechte Linien). Auch hier sitzt der Specht ideal.

Abb. 9: Buntspecht trommelt mittig an einem längeren Ast (vermutlich 1.Oberschwingung). 28.2.2021 Großostheim.

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen, die hinter den Trommelrufen des Buntspechtes verborgen sind. Hierfür wurden die physikalischen Eigenschaften von einseitig eingespannten Balken, die als Ersatzkörper für die Äste dienen, mit Hilfe von Formeln bestimmt. Die Lautstärke, die sein Trommeln hervorruft, hängt an den besonderen Eigenschaften der Äste als Resonanzkörper. Wenn sie trocken sind und wenig oder keine Zweige und kein Blattwerk besitzen, sind sie geeignet. Weiter muss der Specht ganz bestimmte Positionen auf dem Ast einnehmen, um Schwingungen und damit Körperschall erzeugen zu können, der sich über die Luft an unser Ohr überträgt. Die Äste können in der Grundschwingungsform und in Oberschwingungsformen schwingen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Trommelwirbel die Äste zu erzwungenen Schwingungen anregen. Die Äste schwingen dabei nicht in ihrer Eigenfrequenz, sondern in der Spechttrommelfrequenz. Nur so bleiben akustisch die für jede Spechtart charakteristischen Trommelwirbel erhalten. Es wurde auch ermittelt, wie weit die Trommelfrequenz von der Ast-Eigenfrequenz abweichen darf, um noch hörbaren Körperschall zu erzeugen. Als Hilfsmittel diente die sogenannte Vergrößerungsfunktion aus der Theorie der erzwungenen gedämpften Schwingung.

Der Trommelruf des Buntspechtes wurde analysiert und es wurde festgestellt, dass die Trommelfrequenz vom Anfang bis zum Ende hin zunimmt. Die variable Frequenz ermöglicht dem Buntspecht die Äste zu größeren Schwingweiten anzuregen und damit Lautstärke hervorzurufen und er kann eine größere Anzahl an Ästen mit einem größeren Eigenfrequenzumfang zum Trommeln benutzen.

In den Diagrammen sind die Abhängigkeiten der Astlängen, Durchmesser und Frequenzen voneinander dargestellt.

An zwei Bildern aus der praktischen Feldbeobachtung kann die Grundschwingungsform (Abb. 4) und 1. Oberschwingungsform

(Abb 5) mittels des Diagramms 12 abgelesen werden und angenähert auch die Eigenfrequenz der Äste. Der Specht sitzt dabei an der optimalen Position auf dem Ast, gemäß der Theorie.

Exkurs

Spechte können auch andere Schallquellen zum Trommeln benutzen als nur Äste wie z.B. Dachrinnen, Hohlstellen u.A. Ein etwas ausgefallenes Beispiel zeigt als Schallquelle einen Isolator einer elektrischen Leitung in Kanada, an dem ein Haarspecht trommelt.

Photonachweis

Helmuth Meidhof Abb. 1-9

Hubert Schaller Abb. 10

Rechentool

Berechnung und Erzeugung der Grafiken mit PTC Mathcad express Prime 6.0.0.0. (Kostenloses Rechentool für Jedermann mit mathematischen Vorkenntnissen)

Literatur

Technische Mechanik Gross, Hauger, Schnell, Wriggers.

Band 3 Kinetik ISBN 3-540-56323-7

Band 4 Hydromechanik, Elemente der Höheren Mathematik, Numerische Methoden ISBN 3-540-59418-3

Sonogramm

Sonogramm aus der App „Die Stimmen der Vögel Europas".