Max Planck Research Group
Epistemes of Modern Acoustics

Sound & Science: Digital Histories

Koenig, Rudolph. "Ueber Stösse und Stosstöne zweier in demselben Körper erregten Schwingungsbewegungen." Annalen der Physik und Chemie 39, (1890): 395-402.

https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/node/1486

Scan licensed under: CC BY-SA 3.0 DE | Max Planck Institute for the History of Science

MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE HISTORY OF SCIENCE

VIII. *Ueber Stösse und Stosstöne zweier in demselben Körper erregten Schwingungsbewegungen; von Dr. Rudolph König in Paris.*

Bei meinen früheren Untersuchungen über den Zusammenklang zweier Töne[1]) hatte ich immer nur Töne angewendet, welche durch gesonderte und von einander isolirte Tonquellen erzeugt wurden, und es blieb demnach noch der Fall zu beobachten übrig, in welchem die beiden primären Töne zugleich durch zwei verschiedene Schwingungsbewegungen in demselben Körper erregt werden.

Der Umstand, dass bei transversal schwingenden Stäben die Tonhöhe von der Breite unabhängig ist, macht, dass ein rechteckiger Stab für jeden Theilton gleicher Ordnung zwei verschiedene Töne ergibt, je nachdem er senkrecht zu seiner einen oder zu seiner anderen Querdimension schwingt, und dass es somit möglich ist, Stäbe für jedes beliebige Intervall herzustellen, wie dieses Wheatstone bei seinen Kaleidophonstäben in Anwendung gebracht hat. Die Schwingungen dieser Stäbe, welche die aus der Composition der beiden rechtwinkligen Schwingungsbewegungen entstehenden Figuren für das Auge darstellen sollen, müssen hierzu sehr grosse Amplituden haben, was sich nur bei sehr dünnen und an einem Ende befestigten Stäben erreichen lässt, deren Schwingungszahlen weit unter der tiefsten Grenze der hörbaren Töne liegen, und wünscht man bei ihnen das Intervall der beiden Töne auch durch das Ohr zu constatiren, so ist man genöthigt, in den beiden Schwingungsrichtungen zwei Theiltöne gleicher Ordnung einzeln nach einander mit dem Bogen zu erregen. Für meine Zwecke musste der vibrirende Körper natürlich gerade die entgegengesetzten Bedingungen erfüllen, nämlich durch seine beiden rechtwinkligen Schwingungsbewegungen gleichzeitig zwei möglichst starke Töne erzeugen, und daher wählte ich für meine Experimente dicke, an bei-

1) R. König, Pogg. Ann. **157**. p. 177. 1876; Wied. Ann. **12**. p. 335. 1881.

den Enden freie Stahlstäbe, welche mit den beiden Knotenstellen ihres tiefsten Transversaltones auf zwei Stegen ruhend, in beiden Transversalrichtungen zugleich erregt wurden.

Für die tiefen Töne der grossen Octave, an deren Intervallen sich die Stösse als solche, und ohne dass sie Töne bilden, beobachten lassen, war diese doppelte Erzeugung nicht ganz leicht zu erreichen. Beim Anstreichen der Kante eines langen Stabes mit dem Bogen in schräger Richtung entstand immer nur einer oder der andere der beiden Töne mit besonderer Stärke, und beim Anschlagen der Kante mit einem dicken Filzklöppel bildeten sich fast immer mehrere höhere Theiltöne, die wegen ihrer grossen Intensität sehr störend auftraten, wogegen sich in dem Stabe eine Schwingungsbewegung allein, durch Anschlagen einer seiner Flächen mit diesem Klöppel sehr wohl erzeugen liess, ohne dass derselbe Uebelstand dabei besonders fühlbar geworden wäre.

Ich fand es daher schliesslich am zweckmässigsten, eine gemischte Methode anzuwenden, nämlich erst den Stab vermittelst des Bogens in starke Horizontalschwingungen zu versetzen und dann durch einen Schlag auf seine Oberfläche auch noch die Verticalschwingungen zu erzeugen.

Ein Stab von ungefähr 1,210 m Länge, 0,03 m Breite, 0,018 m Dicke, auf diese Weise erregt, liess trotz der nicht unbedeutenden Amplituden der beiden Schwingungsbewegungen, doch nur zwei Töne von geringer Stärke hören, sodass man, um die aus ihrem Zusammenklange entstehenden Stösse leicht und deutlich zu vernehmen, das Ohr dem Stabe ziemlich nahe bringen musste, und es war daher bequemer, die Beobachtungen vermittelst eines ins Ohr eingesetzten Kautschukschlauches zu machen, mit dessen offenem Ende man immer leicht und schnell die hierfür passendste Stelle in der Nähe des Stabes finden konnte. Ueber der Mittellinie jeder Seitenfläche und in der ganzen Länge des Stabes liegt senkrecht eine Interferenzschicht der zu der betreffenden Fläche parallelen Schwingungsrichtung, sodass, wenn das offene Ende des Schlauches in diese hineinreicht', man nur den Ton allein hört, dessen Schwingungen zu dieser Fläche senkrecht sind, die passenden Beobachtungsstellen befinden sich also immer in der Mitte des Stabes zwischen diesen Inter-

ferenzstellen und je nach dem Intensitätsverhältnisse der beiden Töne mehr oder weniger in ihrer Mitte.

Machten die beiden Töne des Stabes von 1,210 m Länge 128 und 216 *v. s.* und bildeten somit ein etwas grösseres Intervall als die Sexta 3 : 5, so hörte man ein schnelles, aber einfaches Gerassel von Stössen, deren Anzahl, durch Hülfs- und Zwischengabeln bestimmt, sich als zwanzig ergab. Es waren also hier die oberen Stösse, welche allein vernommen wurden. Verringerte man die grössere Querdimension des Stabes bis seine beiden Töne das Intervall 8 : 13, mit 128 und 208 *v. s.* gaben, so wurde dass Stössegerassel verworren, was das Hinzutreten der unteren Stösse anzeigte, und blieb auch bei weiterer Verringerung des Intervalles verworren, bis ganz in der Nähe der Quinte ein bis zwei aus den unteren und oberen Stossreihen gebildete secundäre Stösse hervortraten.

Bei kurzen, dicken Stäben für die Hervorbringung der hohen Töne von c'''' bis c'''''', deren Intervalle für die Beobachtung der Stosstöne am günstigsten sind, findet nicht die geringste Schwierigkeit der doppelten Erregung statt, und es ist sogar auffällig, mit welcher Leichtigkeit und in wie weiten Grenzen die in einer Richtung erregte Schwingungsbewegung sich der anderen mittheilt, denn während die Töne zweier Körper nicht um mehr als eine Schwingung auf etwa 128 von einander verschieden sein dürfen, um sich noch einigermaassen gut gegenseitig influenziren zu können, hört man bei diesen Stäben, wenn sie stark und senkrecht auf eine ihrer Flächen mit einem Stahlhammer angeschlagen werden, immer mehr oder weniger laut auch den zweiten Ton auftreten. Will man jedoch beide Töne zugleich mit nahezu gleicher Stärke erregen, so muss man mit dem Hammer unter gleichem Winkel zu den beiden Seitenflächen auf eine ihrer Kanten schlagen, welche ich deshalb zweckmässig fand, zu einer schmalen Anschlagefläche abzustumpfen. Höhere Theiltöne treten bei diesen hohen Klangstäben neben den beiden Grundtönen gar nicht mehr auf, und dabei sind diese letzteren von sehr grosser Intensität, sodass denn auch Stäbe dieser Art von ungefähr 0,20 m Länge, welche für die Intervalle 8 : 9 bis 8 : 16 mit dem Grundtone $c'''' = 4096$ *v. s.* ge-

nau abgestimmt waren, die Stosstöne ausserordentlich laut und deutlich hören liessen.

Bei den Intervallen 8:9 und 4:5 trat der untere Stosston allein auf, 8:11 und 8:13 liessen die unteren und oberen Stosstönen 3 und 5, 5 und 3 zugleich hören, ebenso 4:7 den unteren Stosston 3 und den oberen 1. Bei der Quinte 2:3, wo der untere und obere Stosston zusammenfallen, erklang der somit doppelt erzeugte Ton 1 ausserordentlich stark und verstimmte man das Intervall der primären Töne dadurch, dass man auf eine Fläche des Stabes gegen die beiden Enden hin etwas Wachs klebte, so konnte man die aus den beiden nun nicht mehr genau zusammenfallenden Stosstönen gebildeten secundären Stösse hören, welche am deutlichsten waren, wenn ihre Anzahl ungefähr zwei in der Secunde betrug. Die Septime 8:15 liess allein den oberen Stosston 1 vernehmen und bei der um einige Schwingungen verstimmten Octave konnte man die oberen primären Stösse einzeln zählen.

Von den Intervallen der zweiten Periode, 1:2 bis 1:3, untersuchte ich nur die zwischen 1:2 und 4:9 liegenden, welche allein die unteren Stösse und Stosstöne dieser Periode beobachten liessen.

Das Resultat aller dieser Experimente war also, dass auch bei dem Zusammenklang zweier in demselben Körper erregten Töne das Gesetz sich bestätigt fand, welches die Erscheinungen beim Zusammenklang zweier durch gesonderte Tonquellen erzeugter Töne hatte erkennen lassen, und nach dem die Stösse und Stosstöne der Intervalle $n : hn + m$, wo h eine ganze Zahl und m kleiner als n ist, wenn m viel kleiner als $n/2$, gleich m, wenn m viel grösser als $n/2$, gleich $n-m$, und wenn m sich $n/2$ nähert, gleich n und $n-m$ sind.

Bei der Construction der Klangstäbe machte ich einige Bemerkungen, welche mit dem Hauptgegenstande meiner Untersuchungen zwar nichts zu thun hatten, vielleicht aber an und für sich nicht ohne Interesse sein dürften.

Der genauen Abstimmung aller im Vorhergehenden besprochenen Intervalle stehen keine Hindernisse entgegen, anders ist es jedoch beim Unisono, wo bei allen von mir

untersuchten Fällen sehr verwickelte Verhältnisse eintraten. Als ich bei vier Stäben, welche die Töne c'''' und nahezu d'''' gaben, den höheren Ton auch auf c'''' zu stimmen versuchte, und zu diesem Zwecke die grössere Dimension mehr und mehr verringerte, sank der Stosston, welcher ursprünglich ungefähr c'' gewesen war, zuerst ganz regelmässig. Er ging durch die eingestrichene, und dann durch die kleine Octave, ohne dass dabei etwas Besonderes zu bemerken gewesen wäre. In der grossen Octave wurde er aber dann mehr und mehr von einem sehr starken und verworrenen Stössegerassel begleitet, und war er ungefähr bis F oder E, also bis auf einige vierzig Doppelschwingungen gesunken, so fing er wieder an zu steigen, statt noch tiefer zu werden, sich dann in Stösse aufzulösen und schliesslich ganz zu verschwinden, wie man dieses hätte erwarten sollen. Es mussten also entweder die beiden den Stosston bildenden Töne sich nicht regelmässig mehr und mehr einander genähert haben, oder der Stosston, dessen Tonhöhe stieg, war von anderen Tönen gebildet worden, als der, welchen man anfänglich tiefer und tiefer werden hörte.

Das sehr starke und verworrene Stössegerassel, welches den Stosston begleitete, schien anzuzeigen, dass der Stab mehrere, dem Unisono nahe Töne zugleich hervorbrachte, und bei einer genauen Analyse der ganzen Tonmasse vermittelst Hülfsstimmgabeln fand ich bei einem Stabe mit dem Stosstone von nahezu G, neben den beiden sehr starken Tönen von 3998 und 4096 *v. d.*, noch einen starken Ton von 3950 und einen etwas schwächeren von 4045 *v. d.*, also zwei Tonpaare, in denen beiden ein sehr starker Ton von einem schwächeren und ungefähr um 48 bis 50 *v. d.* tieferen begleitet war. Ein anderer Stab mit dem Stosstone von 94 *v. d.* liess in seiner Tonmasse neben den beiden sehr starken Tönen von 4002 und 4096 *v. d.* noch einen ziemlich starken Ton von 3956 und einen sehr schwachen von 4048 *v. d.* wahrnehmen, sodass der Abstand der beiden Töne in jedem Tonpaare von 46 bis 48 *v. d.* also auch hier wieder ziemlich derselbe war, wie in den Tonpaaren des ersten Stabes.

Würden bei einer fortgesetzten Verringerung der ursprünglich grösseren Querdimension dieser Stäbe ihre Stoss-

töne bis auf 48 oder 50 *v. d.* gesunken und dann wieder gestiegen sein, so hätte die Existenz ihrer beiden Tonpaare diesen Vorgang vollständig erklären können, denn in der That, wäre das höhere Tonpaar, *b*, bis zum Unisono des tieferen, *a*, gesunken, so würde ein Stosston von 46 bis 48 *v. d.* mehrfach durch die höheren und tieferen Töne beider Tonpaare, *a* und *b*, entstanden sein, und wäre das Tonpaar *b* hierauf noch tiefer geworden, so hätte der Stosston des höheren Tones von *a* mit dem tieferen von *b* dann höher werden müssen. Das Experiment ergab jedoch, dass diese Tonpaare bei den beobachteten Erscheinungen nur das verworrene Stössegerassel bewirkt, dass das aufeinander folgende Sinken und Steigen des Stosstones aber durch die eigenthümlichen Veränderungen beider stärksten Töne während der fortgesetzten Verringerung ein und derselben Querdimension des Stabes entsteht, wie folgende Tabelle zeigt, in welcher die beiden stärksten Töne und der Stosston angegeben sind, die man an einem Stabe, dessen eine Querdimension fünfmal, und an einem anderen, dessen eine Dimension dreimal verringert wurde, nach jeder dieser Verringerungen beobachten konnte.

I.

4002 — 4096	*v. d.*	Stosston	94	*v. d.*
3990 — 4068	„	„	78	„
3974 — 4056	„	„	82	„
3955 — 4065	„	„	110	„
3948 —		„	154	„

II.

3930 — 4022	„	„	92	„
3926 — 4008	„	„	82	„
3907 — 3998	„	„	91	„

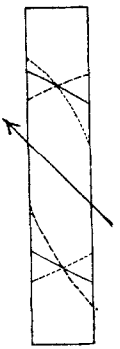
Eine kleine Unregelmässigkeit in der Bildung der beiden Töne hätte bei diesen Stäben vielleicht schon dadurch bewirkt werden können, dass die eine der beiden Kanten, welche bei der Verringerung der einen Dimension unberührt blieben, zu einer schmalen Anschlagefläche abgestumpft war; die gefundenen Schwingungszahlen stimmen aber so wenig weder mit dem Gesetze überein, nach welchem bei den Transversalschwingungen der Stäbe die Breite ohne Einfluss auf die Tonhöhe sein soll, noch mit dem, nach welchem bei diesen

Schwingungen die Tonhöhe in umgekehrten Verhältniss zu der Dicke der Stäbe steht, dass hier eigenthümliche Rückwirkungen der beiden oder vielmehr der vier Schwingungsbewegungen aufeinander stattfinden müssen, welche ganz aufzuklären aber noch weitere Untersuchungen nöthig sein würden.

Das Auftreten zweier Tonpaare in einem fast quadratischen Stabe dürfte sich dagegen wohl durch die weder zu den Seiten, noch zu den Diagonalen des Durchschnittes parallele Richtung der beiden Elasticitätsaxen erklären lassen, denn es scheint in der That, dass die schräge Neigung der Elasticitätsaxen zu den Seiten eines schwingenden Körpers diesem die Fähigkeit ertheilt, zwei verschiedene Theiltöne gleicher Ordnung in derselben Schwingungsrichtung hervorbringen zu können, wie sich dieses an schmalen Brettchen von Tannenholz beobachten lässt. Erzeugt man in einem solchen, in welchem die Fibern in der Längenrichtung laufen, den tiefsten Transversalton, so entsprechen diesem bekanntlich zwei scharf gezeichnete transversale Knotenlinien, und man erhält auch ebenfalls wieder zwei gleiche, wenn auch gewöhnlich etwas weniger scharf gezeichnete Linien, wenn die Holzfasern zur Längenrichtung rechtwinklig liegen. Bei Brettchen aber, in denen die Fasern um 45° zur Längenrichtung geneigt waren, entstand zuerst, und am leichtesten, ein Transversalton mit zwei zu einander fast parallelen Knotenlinien, deren Neigung zwischen die der Fasern und die Breitenrichtung fiel, dann liess sich aber auch noch in denselben ein anderer, etwas tieferer Ton ebenfalls mit nur zwei Transversallinien erregen, von denen die eine eino ent gegengesetzte Richtung und geringere Neigung, die anaere eine gleiche Richtung und grössere Neigung als die Fasern zur Längenrichtung hatte. Diese beiden Linien waren gekrümmt und konnten ihre Plätze vertauschen, ohne dass der Ton sich dabei veränderte. In beiden Lagen schnitten sie die beiden Parallellinien des höheren Tones nahezu in demselben Punkte. Diese beiden Schnittpunkte von je drei Linien stehen jedoch nicht ausnahmslos gleich weit von den Enden der Brettchen ab, da die Elasticität in der ganzen Länge derselben nicht immer gleich ist, und bei einem Brettchen

von 0,18 m Länge betrug der Unterschied zwischen beiden Abständen sogar 8 mm, obgleich die Holzfasern desselben dem Aussehen nach äusserst gleichförmig und regelmässig waren.

Bei einem Brettchen von 0,25 m Länge, 0,05 m Breite, 0,01 m Dicke, und bei Brettchen von 0,18 m Länge, 0,04 und 0,03 m Breite, 0,05 m Dicke, betrug der Unterschied in der Tonhöhe der beiden verschiedenen Töne fast einen Ton. Die Figur zeigt eines dieser beiden Brettchen mit den drei Paar Knotenlinien in viertel Grösse, und die Richtung der Holzfasern ist in derselben durch den Pfeil angegeben.



Schliesslich möchte ich noch erwähnen, dass auch bei den Kaleidophonstäben die beiden Schwingungsbewegungen fast nie so in Einklang gebracht werden können, dass die aus ihnen entstehende Ellipse fest und ohne Schwankungen bleibt, sondern verringert man mehr und mehr die ursprünglich etwas grössere Querdimension, so verlangsamt sich die Drehung der Ellipse nur bis zu einem gewissen Grade, und wird darauf wieder schneller, ebenso wie bei den Klangstäben der Stosston nur bis zu einer gewissen Tiefe sank, um dann wieder zu steigen.

Paris, im Januar 1890.