

# Versuche mit dem Monochord

Helmut Maier

Irgendwann behandelt man im Verlauf seines Physikunterrichts im Rahmen der Schwingungen und Wellen auch den Schall. Im Zuge dessen lassen sich einige Sachverhalte recht anschaulich mittels eines Monochords beleuchten. Beispiele hierzu wären in Kapiteln wie Schallquellen, Resonanz, Tonerzeugung und Tonhöhe oder Konsonanz und Dissonanz zu finden. Querverbindungen zur Geschichte wie auch zur Musik sollen nicht nur die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten dieses Mediums zeigen, sondern auch Hintergründiges beleuchten.

## Geschichtliche Einordnung des Monochords

Um 300 vor Christus dürfte in Griechenland eine Schrift entstanden sein, die in knapper Form eine mathematische Musiktheorie darlegt. Sie wird dem Mathematiker Eukleides zugeschrieben und trägt den Titel *Sectio canonis* (Κατατομή καὶ νομός). Das Wort Kanon (eig. Stange, aus dem Semitischen) bezeichnet hier das Monochord. Darunter versteht sich eine zu Versuchszwecken über ein Brett gespannte Saite. Mit Hilfe von Stegen kann man verschiedene Intervallteilungen experimentell durchführen. Interessanterweise finden sich später Monochords auch mit mehreren Saiten. Die angesprochene Schrift enthält eine Begründung, dass Tonhöhen in Zahlenverhältnissen zueinander stehen müssten und bietet mathematische Grundlagen der musikalischen Intervalle. Weiters finden sich Anleitungen zur Aufteilung der Saite, um die Töne des Leitersystems zu erhalten.

Wann das Monochord (κάνον) selbst erfunden wurde ist unsicher. Einerseits wird die Erfindung Pythagoras zugeschrieben. Andererseits gilt wieder als sicher, dass die pythagoräische Harmonielehre, die eineinhalb Jahrhunderte später weiterentwickelt bezeugt ist, von Pythagoras selbst nur den Anstoß erfuhr, indem er als Schulgründer mit der Lehre, alle Dinge seien Zahl, die Richtung vorgab.

Inhaltlich finden sich in der "Sectio canonis" die Zahlenverhältnisse der Intervalle. Wie weit ins Detail gegangen wurde, zeigt die Unterscheidung zwischen kleinerem und größerem "Halb"-ton.

Die Proportionen der wichtigsten Intervalle sind:

- 9 : 8 = Ganzton
- 4 : 3 = Quarte
- 3 : 2 = Quinte
- 2 : 1 = Oktave

Im Jahre 1636 erschien die "Harmonie universelle" des französischen Geistlichen, Philosophen und Mathematikers Marian Mersenne. In dieser Schrift, in der schon Tonhöhe mit der Schwingungszahl in Beziehung gesetzt wird, findet sich auch die Arbeit mit einem Monochord (übrigens mit mehreren Saiten ausgestattet) dokumentiert.

In der Geschichte der Physik hat sich Mersenne mit der ersten Ermittlung der Schallgeschwindigkeit eingetragen. Er be-

diente sich dazu einer in bekannter Entfernung stehenden Kanone und maß die Zeit zwischen Lichtblitz beim Feuern der Kanone und dem Vernehmen des Knalls. Er kam auf mehr als 300 m/s.

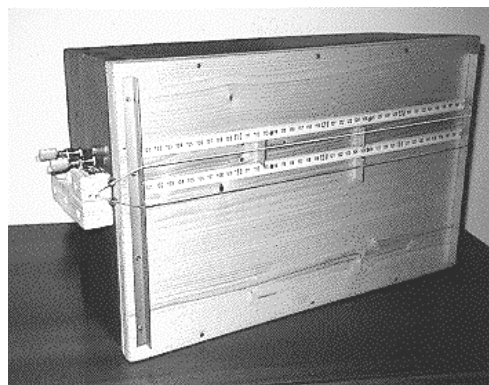


Abb. 1: Ein selbst gefertigtes Monochord.

## Zum Bau des Monochords

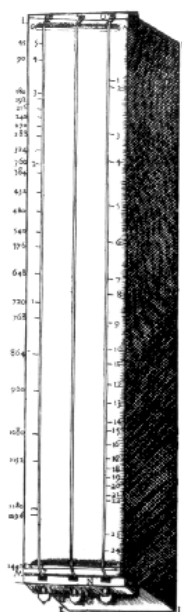


Abb. 2: Illustration eines Monochords aus Mersennes Harmonie universelle.

Die Idee, ein Monochord zu bauen, kam mit dem Studium einschlägiger Literatur. So fand sich eine Tabelle, die die Intervalle und Tonhöhen mittels exakter Längenverhältnisse einer 24 cm langen Saite auflistete. Dem Gedanken, eine zweite Saite einzubauen, um die Intervalle besser vergleichen zu können, gab ich trotz der Diskrepanz zur Bezeichnung "Monochord" nach. Erst später fand ich das oben angeführte Monochord Mersennes, das ebenso mehrere Saiten aufweist.

Die Überlegungen hinsichtlich Bauart, Ausstattung und Aussehen gestalteten sich unkompliziert. Ein Brett allein erschien mir zu wenig. Irgendein Kästchen sollte es schon sein, um ein wenig Resonanz auch miteinzubeziehen. Ideal wäre das Gehäuse eines Lautsprechers einer Stereo-Anlage gewesen, was aber nicht aufzutreiben war. So behalf ich mir mit einer "antiken" Schublade vom Dachboden, die ich mit einem Deckel versah. Als Saiten wählte ich Gitarrensaiten. Um diese auf dem Monochord auch stimmen zu können, baute ich Wirbel ein, die es in einer Musikalienhandlung als Ausschuss kostenlos gab. So ist es auch möglich, die Intervalle auf anderen Instrumenten nachzuprüfen, wie dies mit einem Klavier vorzüglich klappt. Ein Maßband, das parallel zu den Saiten verläuft, ermöglicht die Zuordnung eines Saitenabschnittes zu konkreter Länge, die mittels frei verschiebbaren Metallstegen verändert werden kann.

Helmut Maier, Pädagogische Akademie der Diözese Graz-Seckau, Georgigasse 85-89, 8020 Graz

## Die Physik trifft die Musik

### Die temperierte Skala

Bevor es zu den konkreten Versuchen geht, sei noch ein kleiner erläuternder Ausflug in die Musik unternommen. Immer wenn von Stimmungen und genauen Tonverhältnissen die Rede ist, kommt man auf kleine Ungereimtheiten hinsichtlich der reinen Intervalle (der ganzzahligen Verhältnisse der beiden Töne) und der Intervalle in unserem heutigen Tonsystem. Dieses basiert auf der gleichschwebend temperierten Stimmung. Das einzige reine Intervall (dessen Töne ein ganzzahliges Frequenzverhältnis aufweisen) ist die Oktave (Tonverhältnis 2 : 1). Diese Oktave wird in 12 exakt gleich klingende, dasselbe Frequenzverhältnis aufbringende Halbtöne geteilt. Dieses Frequenzverhältnis entspricht keinem ganzzahligen Bruch. Damit sind alle Intervalle mit Ausnahme der schon erwähnten Oktave leicht gegen die reinen Intervalle verstimmt.

### Die pythagoräische Skala

Das pythagoräische System baut auf die sogenannte Quintenschichtung auf. Die reine, pythagoräische Quinte steht im Verhältnis 3 : 2 und ist somit etwas größer als die temperierte Quinte. Baut man nun Quinte auf Quinte auf und legt die so erhaltenen Töne in den Tonumfang einer Oktave, erhält man die pythagoräische Skala. Bei Schichtung von fünf Quinten übereinander ergibt das eine halbtöne Pentatonik (c-g-d-a-e), sieben aufeinander folgende Quinten ergeben eine diatonische Heptatonik (d-e-f-g-a-h-c). Bei zwölf Quinten erhält man eine halbtönige Chromatik. Das System schließt sich nicht ganz, weil zwölf reine Quinten größer als sieben Oktaven sind. Die Differenz wird als pythagoräisches Komma bezeichnet.

Interessant erscheint noch, dass durch verschiedene Epochen unserer Musikgeschichte hindurch verschiedene Stimmungen (unter anderem die mitteltönige Skala oder die temperierten Stimmungen des Barock) zur Anwendung kamen. Die authentische Interpretation alter Musik trägt diesem Umstand Rechnung, wenn auch beispielsweise die reinen Naturterzen der Renaissance auf Grund unserer Gewöhnung an die temperierten Intervalle anfangs falsch klingen zu scheinen.

### Versuche mit dem Monochord

In der nebenstehenden Tabelle finden sich die Intervalle und die dazugehörigen Längenangaben. Als Grundlage wurde die temperierte Skala verwendet. Dies erklärt auch die Längenangaben mit zwei Dezimalstellen. Die Längen für die reinen Intervalle ergeben sich aus der direkten Berechnung mittels der angegebenen Verhältnisse. In der Realität lassen sich auf meinem Monochord aber nur die gerundeten Millimeterangaben einstellen. So kommt man wieder auf die reinen Verhältnisse, die sich in Spalte zwei finden. Außerdem lässt sich der Unterschied bei dieser Saitenlänge kaum erhören. Die Angaben in der Klammer drücken jeweils die Ergänzung auf die ganze Saitenlänge aus. Zur leichteren Vorstellung wurden in Spalte vier reale Tonhöhen angegeben. Angenommen, die 24 cm lange Saite würde auf ein c hin gestimmt werden, ergäben sich bei entsprechenden Intervallen die angeführten Töne.

### Nachvollziehen von Intervallen

Die erste praktische Übung mit dem Monochord liegt nun in der Anwendung der in der Tabelle aufgelisteten Intervalle. Man kann sie durch Anzupfen der Saite spielen. Es empfiehlt sich, die zweite Saite bei der Einstellung von 24 cm zu belassen. So hat man den Grundton stets parat und kann ihn dazu spielen.

### Errechnen von Intervallen auf Grund von Verhältnissen

Die nächste Übung gestaltet sich etwas komplizierter, außerdem benötigen wir zum Vergleich ein Klavier (oder ein anderes Instrument). Beide Saiten werden entweder durch Betätigen der Stimmwirbel oder durch Verkürzung der Saiten auf einen Ton des Klaviers exakt gestimmt. Eine Saite wird auf die berechnete Länge eines bestimmten Intervallverhältnisses gekürzt und angezupft. Gegeben ist ein Ton und ein Intervallverhältnis. Bestimmen lässt sich nun die Länge der Saite, die gezupft werden muss, um dieses Intervall zu treffen. Die Kontrolle erfolgt durch den Vergleich am Klavier. Dazu ein Beispiel. Eine Saite mit einer Länge von 32 cm entspricht auf dem Klavier dem Ton C1. Welcher Ton ist eine große Terz davon entfernt? Die große Terz dazu steht im Verhältnis 5:4, das ergibt eine Länge von 25,6 cm. Auf dem Klavier entspricht dies dem Ton E1. Der Vergleich sagt, ob das Ergebnis richtig war.

### Ermitteln des Intervalls auf Grund von Saitenlängen

Gegeben sind zwei Saitenlängen, zu errechnen ist das Verhältnis zueinander und das dazugehörige Intervall. Beispiel: Eine Saite misst 32 cm. Die zweite (zu Beginn gleich gestimmt) misst 24 cm. Welches Intervall ist zu hören? Das Verhältnis lässt sich auf 4 : 3 zurückführen, was einer Quart entspricht.

Länge der Saite (in cm)	Intervallverhältnis	Intervallbezeichnung	Reale Tonentsprechung
24 (0)	1/1	Prim	c
22,65 (1,35)	17/16	kleine Sekunde	des
21,38 (2,62)	9/8	große Sekunde	d
20,18 (3,82)	6/5	kleine Terz	es
19,05 (4,95)	5/4	große Terz	e
17,98 (6,02)	4/3	Quarte	f
16,97 (7,03)	11/8	Tritonus	fis
16,02 (7,98)	3/2	Quinte	g
15,12 (8,88)	8/5	kleine Sexte	as
14,27 (9,73)	5/3	große Sexte	a
13,47 (10,53)	9/5	kleine Septime	b
12,71 (11,29)	15/8	große Septime	h
12 (12)	2/1	Oktave	c

Tab. 1: Intervalle, ihre Frequenzverhältnisse und die Entsprechung auf einer 24 cm langen Saite. Die realen Töne entsprechen einer auf c gestimmten Saite.

### Grenzen der Anwendung

Bei der Zuordnung und Kontrolle der gespielten Intervalle bedarf es musikalischer Vorkenntnisse und eines etwas geschulten Gehörs. (Aus der Musikerziehung bekannte Eselsbrücken zu den Intervallen, wie beispielsweise das Signalthorn für die

Quarte, oder der Kuckucksruf für die kleine Terz helfen nur bedingt weiter.) Für eine Unterscheidung der Intervallverhältnisse in den unterschiedlichen Tonsystemen ist die Bauweise des Monochords noch zu ungenau. Interessanter wären entsprechend längere Saiten. Bei Verwendung scharfkantiger Stege lassen sich auch schon die Intervallunterschiede verschiedener Stimmungen demonstrieren.

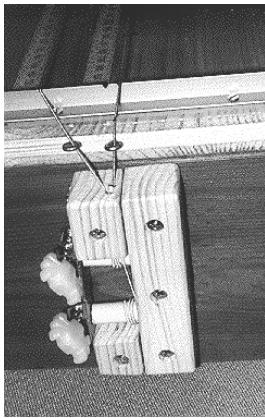


Abb. 3: Eingebaute Wirbel ermöglichen ein Stimmen der einzelnen Saiten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Verhältnisse einfacherer Intervalle wunderbar nachvollziehen lassen. Das Gerät ist für die Schülerhand zur selbstständigen Erprobung sehr gut geeignet. Der Vollständigkeit halber seien noch kurz weitere Versuche erwähnt, die sich mit dem Monochord durchführen lassen. Bei fast annähernd gleicher Stimmung der Saiten lässt sich das Phänomen der Schwebung sehr anschaulich demonstrieren. Durch leichtes Halten einer Saite an einem Punkt bei gleichzeitiger Anregung (Erzwingung eines Schwingungsknotens) kann man die Stehende Welle und Resonanzschwingungen erläutern.

Eine optimale Umsetzung der Thematik ließe sich in projekthafter Arbeit erzielen. Neben der Physik wäre die Mitarbeit aus den Gegenständen der Musikerziehung, der Geschichte und Sozialkunde wie auch der Werkerziehung vorstellbar.

## Literatur

- Brüderlin, René: *Akustik für Musiker. Eine Einführung*. Regensburg: Gustav Bosse Verlag, 1978.
- Harnoncourt, Nikolaus: *Musik als Klangrede. Wege zu einem neuen Musikverständnis*. Essays und Vorträge. Kassel: Bärenreiter Verlag, 1982.
- Michels, Ulrich: *dtv-Atlas zur Musik. Tafeln und Texte*. Bd 1. 12. Auflage. München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 1989.
- Stevens, S. u. Warshofsky, Fred: *Schall und Gehör*. Aus dem Englischen übertragen von Jan Hans und Günter Kleinen. 3. Auflage. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag, 1980.
- Neubecker, Annemarie Jeanette: *Altgriechische Musik. Eine Einführung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1977.
- Pierce, John: *Klang. Musik mit den Ohren der Physik*. Aus dem Amerikanischen übersetzt von Klaus Winkler. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft-Verlags-gesellschaft, 1989.

# 50 Jahre Österreichische Physikalische Gesellschaft

## PhysikEvent 2000 in Graz

Die ÖPG lädt zu diesem Fest ganz besonders auch die Lehrerschaft ein. An der Physik-Show auf Straßen und Plätzen von Graz nehmen zahlreiche Schulen und Institute teil.

Dienstag, 26.9.2000:

Vormittag: Festsitzung zum 50jährigen Bestehen der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft

Nachmittag

Gerard 't Hooft (Universität Utrecht, Nobelpreis 1999):

*The smallest structures*

Manfred Eigen (MPI Göttingen, Chemie-Nobelpreis 1967):

*What is life? Answers from physics, 50 years after Schrödinger's.*

Podiumsdiskussion: Der Status der Physik an der Schwelle zum 3. Jahrtausend

Mittwoch, 27.9.2000

Vormittag

Paul Crutzen (MPI Mainz, Chemie-Nobelpreis 1995):

*The stratospheric ozone hole.*

Michele Parrinello (MPI Stuttgart):

*Ab-initio molecular dynamics.*

Gabor Somorjai (Univ. California Berkeley):

*The Flexible Surface: Development and Frontiers of Molecular Surface Science*

Nachmittag: H. G. Dosch, Hans J. Specht (Uni Heidelberg):  
*Musical harmony - physics, physiology, psychology*  
(mit Akustikexperimenten)

Physik-Show

Donnerstag, 28.9.2000

Vormittag

Rudolf Mößbauer (Tech. Univ. Munich, Nobelpreis 1961):  
*Neutrino physics.*

Uwe Kreibitz (RWTH Aachen):

*Optical properties of nanostructures.*

Heinz Muckenfuß (Pädagogische Hochschule Weingarten):  
*Können uns die Phänomene retten? Anmerkungen zum gebrochenen Verhältnis zwischen Phänomen und Begriff.*

Nachmittag (Fachausschuß Lehrkräfte an höheren Schulen)

R. West (ESO):

*Das Very Large Telescope - Idee und Ergebnisse*

R. Stuller (TU Hannover):

*Moderne Anwendungen des Kreisels (mit Experimenten)*

Freitag, 29.9.2000

Alex Müller (Univ. Zürich, Nobelpreis 1987):

*Superconductivity in oxides.*

Peter Zoller (Univ. Innsbruck):

*Quantum computers.*