



# Ein kleines Klangkabinett

„Klangwelten“ im Technorama



## Experimente

zur Physik

- der Schallerzeugung
- der Schallübertragung
- der Schalldetektion
- der Schallabsorption

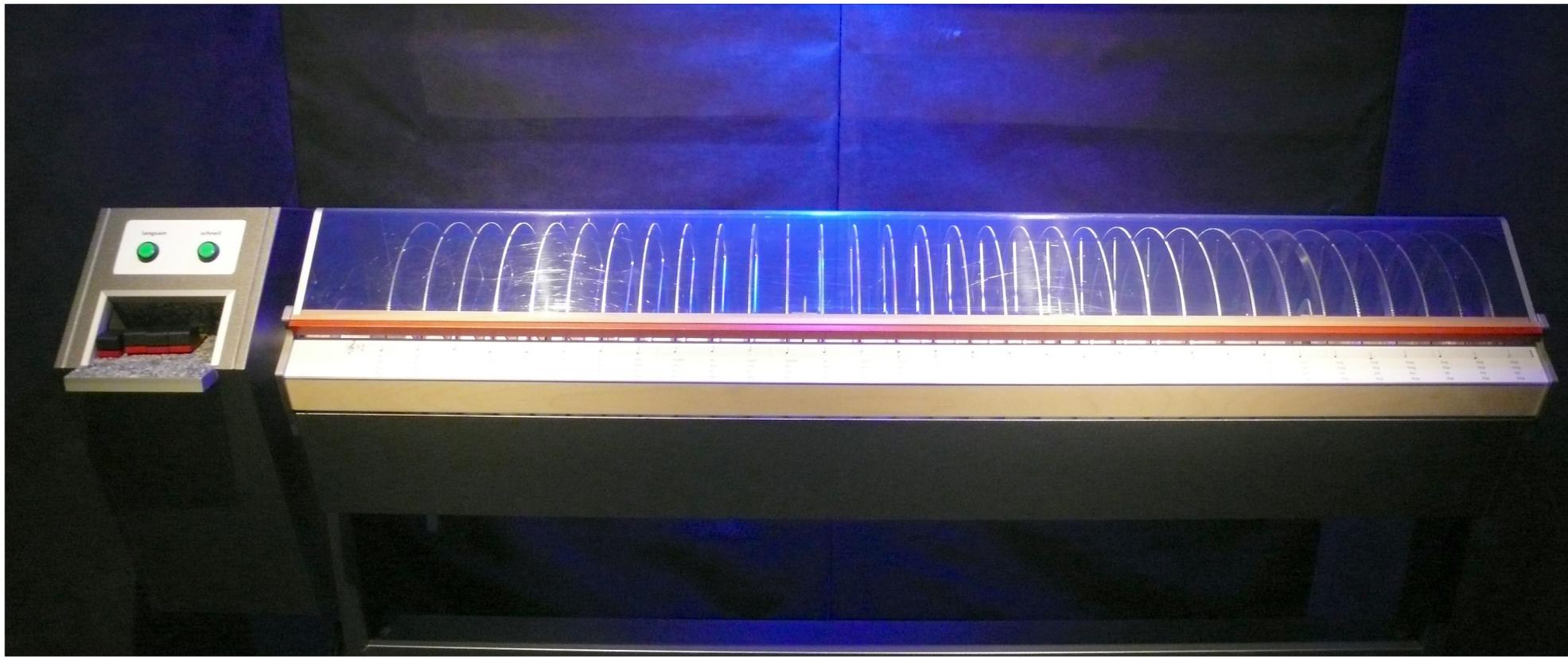
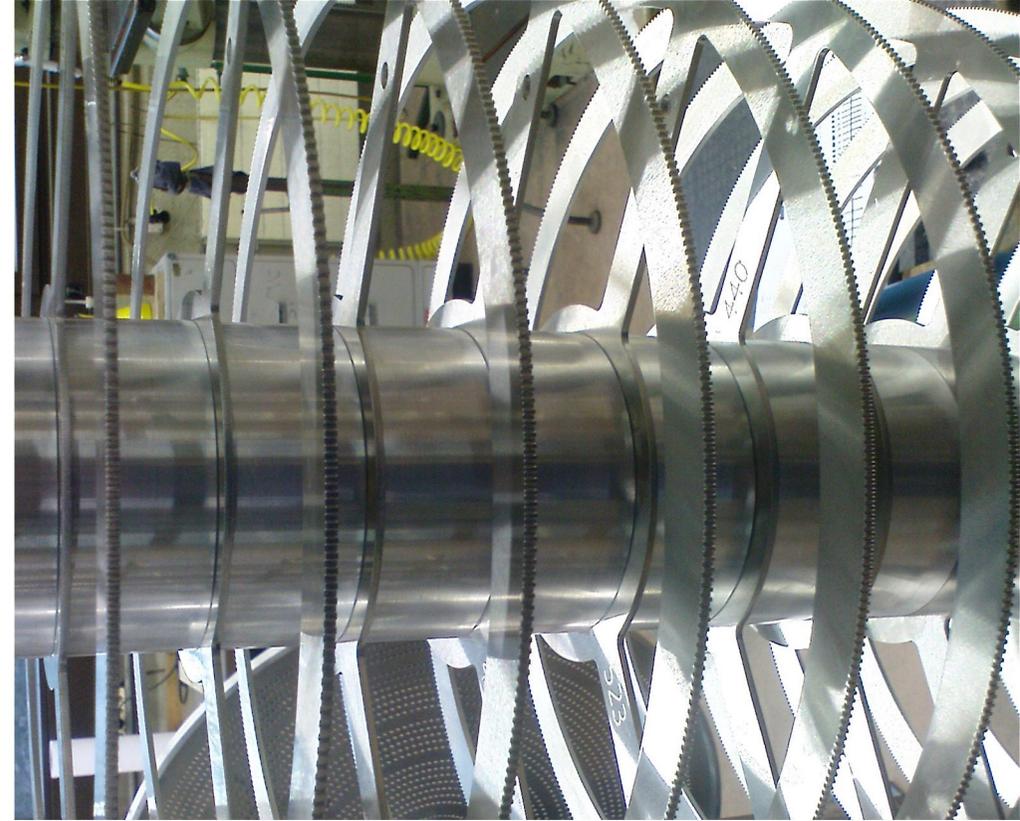
zur Musik

- der Tonleitern
- der Obertöne
- der Schwebungen
- der Wahrnehmung
- der speziellen Instrumente

# 1. Zahnradmusik „Kanon“

Die 35 Zahnräder entsprechen den 35 Tönen im Kanon „Frère Jacques“. Die Anzahl Zähne der Räder ist proportional zu den Frequenzen der jeweiligen Töne. Die Räder können mit zwei verschiedenen Umlaufgeschwindigkeiten in Rotation versetzt werden.

Wird ein Plättchen gegen die Zähne gedrückt, so hören wir einen Ton der Frequenz, mit der das Plättchen in Schwingung versetzt wird. Die Tonerzeugung ähnelt derjenigen beim Flügelschlag eines Insekts.



## Schallerzeugung

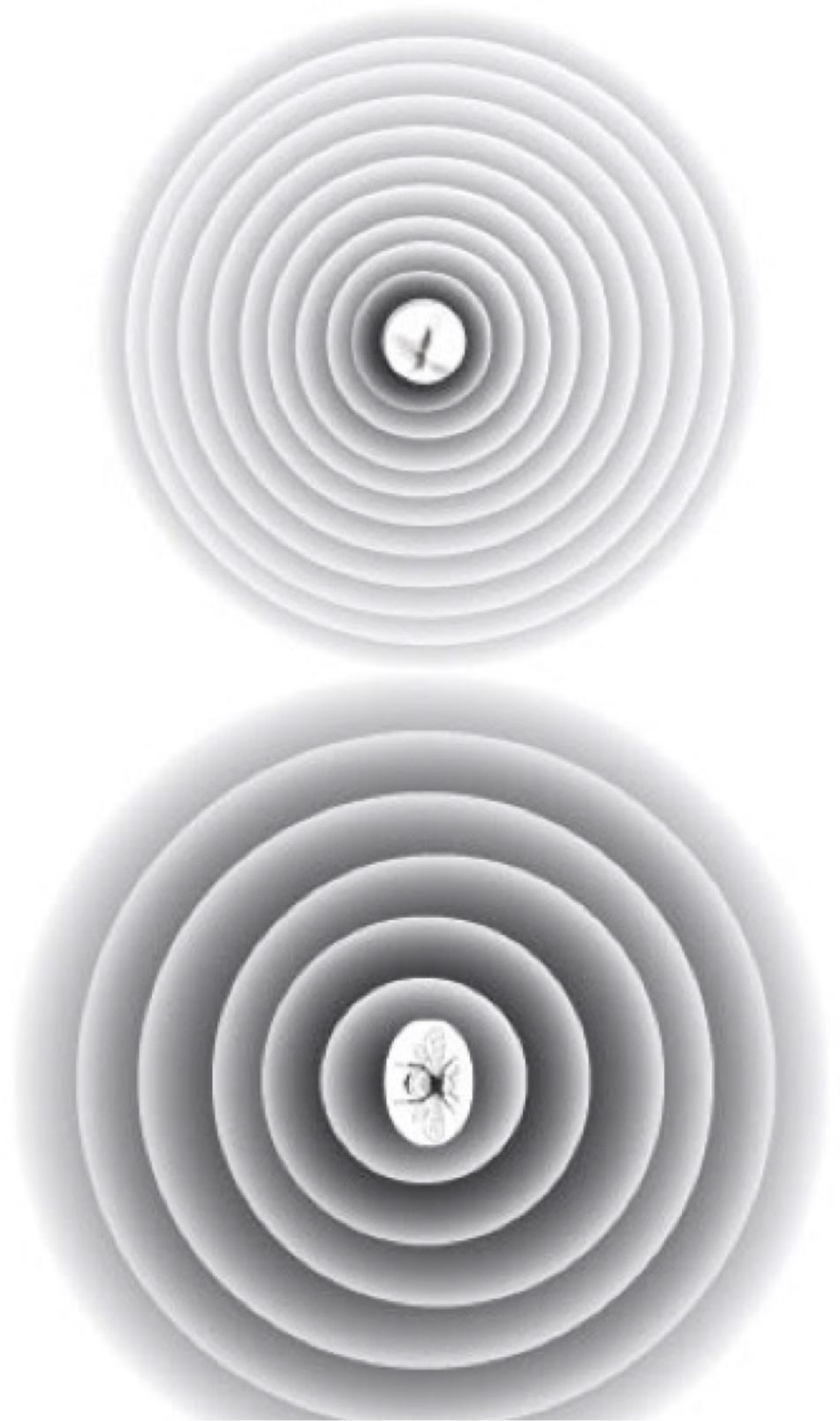
Die Mücke schlägt in der Sekunde 278 bis 307 mal ihre Flügel nach unten und nach oben und die Hummel tut das 130 bis 250 mal. Dadurch wird die Luft periodisch verdichtet und verdünnt.

Diese Luftdruckschwankungen breiten sich als Schallwellen aus. Unsere Ohren nehmen diese periodischen Druckschwankungen als Schall wahr. Je mehr Schwankungen pro Sekunde unsere Ohren erreichen, einen umso höheren Ton hören wir.

Je stärker die Luft zusammengedrückt wird, umso lauter wird der Ton. Bei einem Knall oder einem Donnerschlag ist die Druckänderung sehr gross und wir hören sie dann sehr laut

## Schallausbreitung

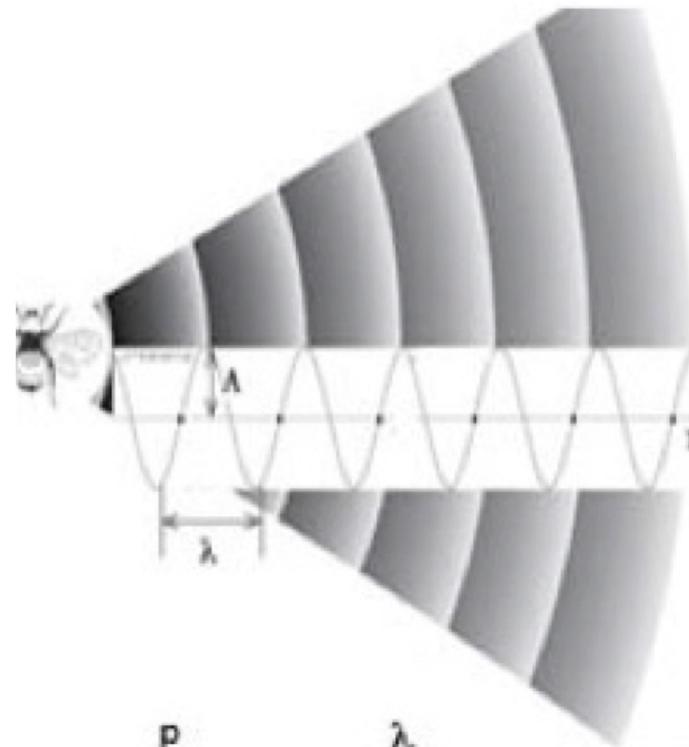
In der Luft übertragen die Moleküle die Energie auf die unmittelbare Umgebung. Wie schnell das geht hängt vom Luftdruck und von der Temperatur ab. In Luft ist das 330 m/s. Da die Kopplung zwischen den Molekülen in Flüssigkeiten und in Gasen grösser ist, ist dort auch die Schallgeschwindigkeit grösser.



## Darstellung von Wellen

Die einfachsten Schallwellen können in zwei Dimensionen durch eine Sinus-Funktion dargestellt werden. Ausschläge über der Nulllinie sind Druckerhöhungen, unter der Nulllinie verminderte Druckgebiete.

Mit solchen Darstellungen erreicht man immer nur eine Momentaufnahme.

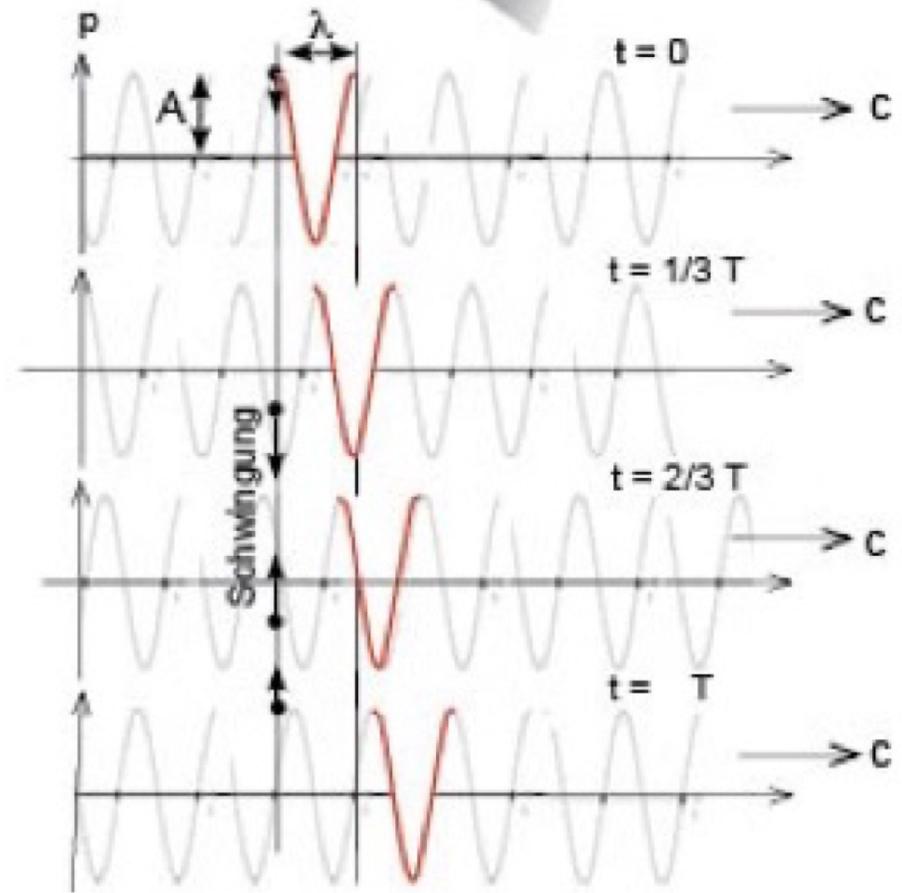


In mehreren Diagrammen die verschiedenen Momentaufnahmen entsprechen, kann die Ausbreitung untersucht werden.

In der Periodendauer  $T$  vollführt ein Luftmolekül eine volle Schwingung.

In dieser Zeit haben sich die Wellenberge um die Wellenlänge (Abstand zwischen zwei Wellenbergen) verschoben. Folglich ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit-Wellenlänge und Frequenz, der bei allen Wellen gilt:

Geschwindigkeit = Wellenlänge x Frequenz



## 2. Lochsirene

„Aus dem letzten Loch gepiffen“

Wir haben es hier mit einem „Klavier“ der ganz besonderen Art zu tun. Die Lochscheibe wird in Rotation versetzt und mittels Ventilen (Tasten) können die verschiedenen Lochreihen angeblasen werden, was zu periodischen Luftdruckschwankungen führt. Die Anzahl Löcher, die pro Sekunde bei der Düse vorbei kommen, bestimmen die Tonhöhe.

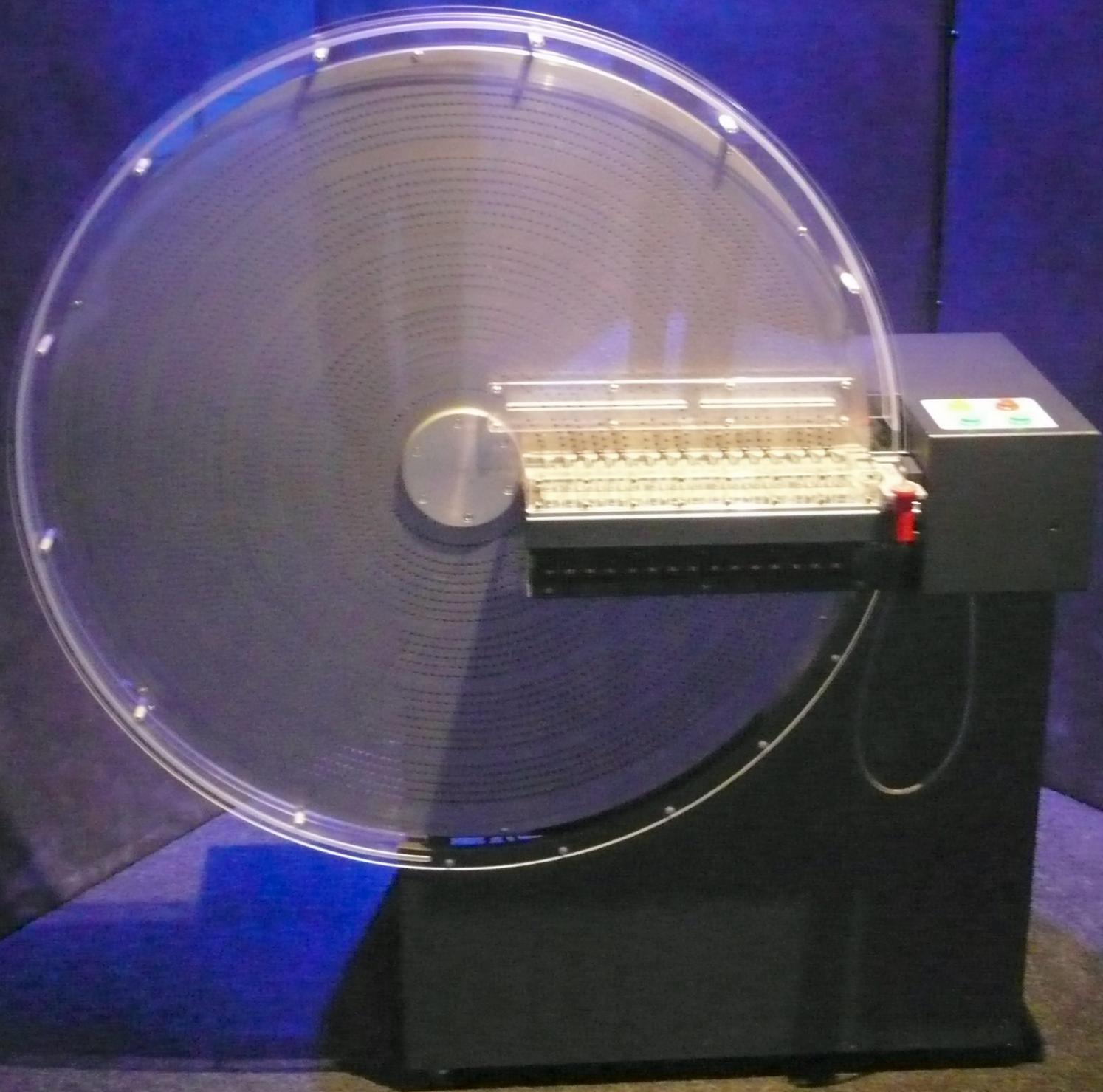
Die Naturtonreihe, die aus kleinen Ganztonschritten (10/9), grossen Gantonschritten (9/8) und Halbtonschritten (16/15) besteht wurde aus den Obertönen entwickelt (Kap. 3) Bei einem so gestimmten Instrument, das nicht ständig nachgestimmt werden kann, bietet das erhebliche Probleme.

So wurden für diese Instrumente die Tonschritte (Frequenzverhältnisse benachbarter Töne) leicht verfälscht, und es gibt nur noch Halbtonschritte und Ganztonschritte, also 12 Halbtonschritte pro Oktave. Das führt zu einem Halbtonschritt, der der zwölften Wurzel aus Zwei entspricht.

Diese Stimmung nennt man temperiert.

Die Ventile können mit Elektromagneten über einen Computer direkt gesteuert werden, und so kann Musik von Geisterhand gespielt werden.





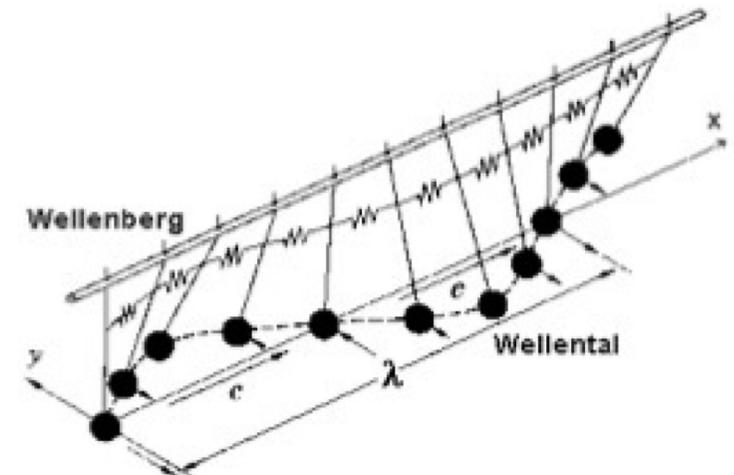
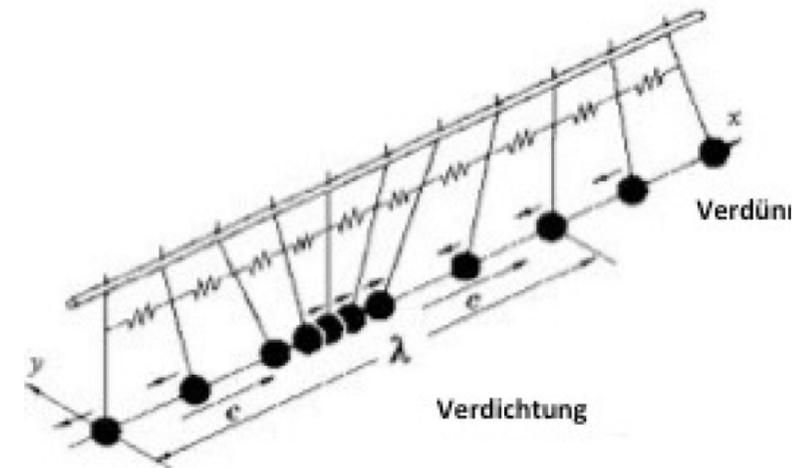
## Wellenarten

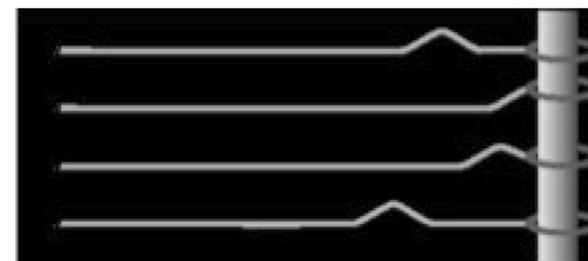
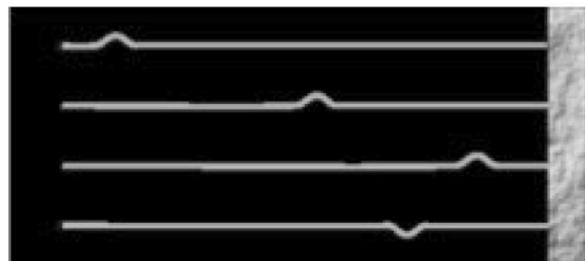
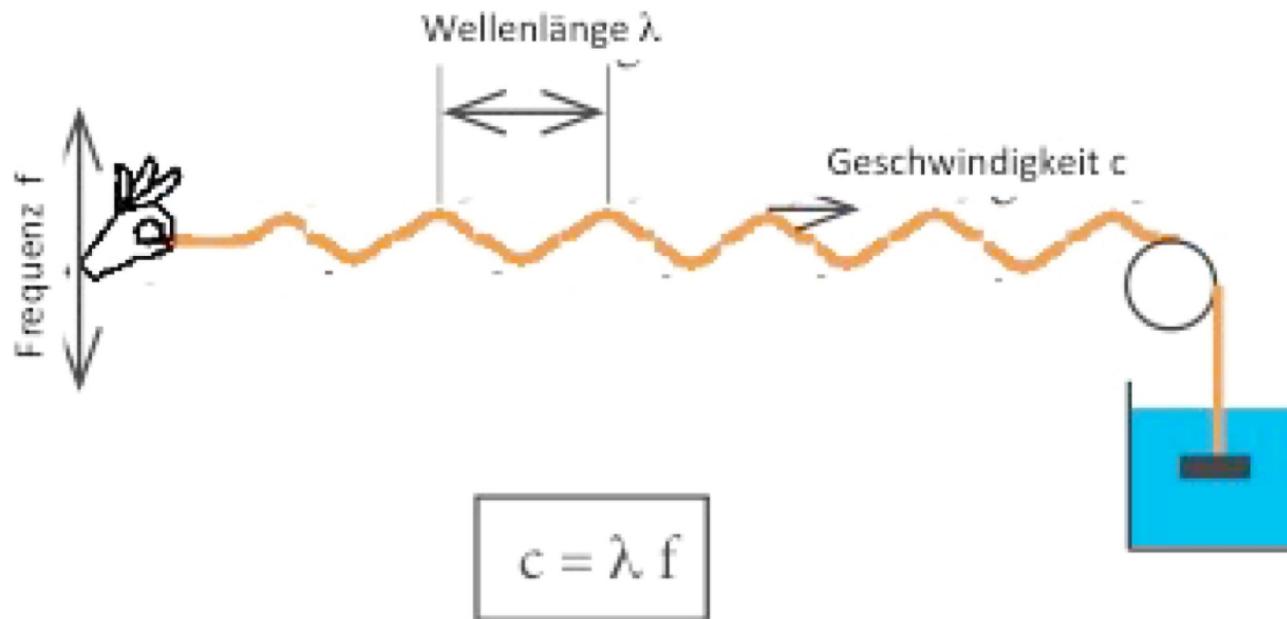
In einem Gas können die Impulse nur durch Stöße weitergegeben werden. Dort wo die Energie übertragen wird, kommt es zu einer Verdichtung. Wie schnell sich diese im Gas ausbreiten kann hängt von der Gassorte ab (in He ist die Geschwindigkeit grösser als in SF<sub>6</sub>.)

In Gasen gibt es nur Wellenbewegungen in der Richtung, in der die Moleküle/Atome schwingen. Es sind das sog. Longitudinalwellen.

In Flüssigkeiten und in Festkörpern, in denen die Kopplung zwischen den einzelnen Atomen und Molekülen stärker ist, können die Teilchen auch senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung (in Fig.: x-Richtung) schwingen. Diese Wellen bezeichnet man als Transversalwellen.

In Flüssigkeiten und Festkörpern gibt es sowohl **Transversal-** als auch **Longitudinalwellen**.





**Ausbreitung von Wellen:**

**Reflexion von Wellen:** Festes Ende mit Phasensprung

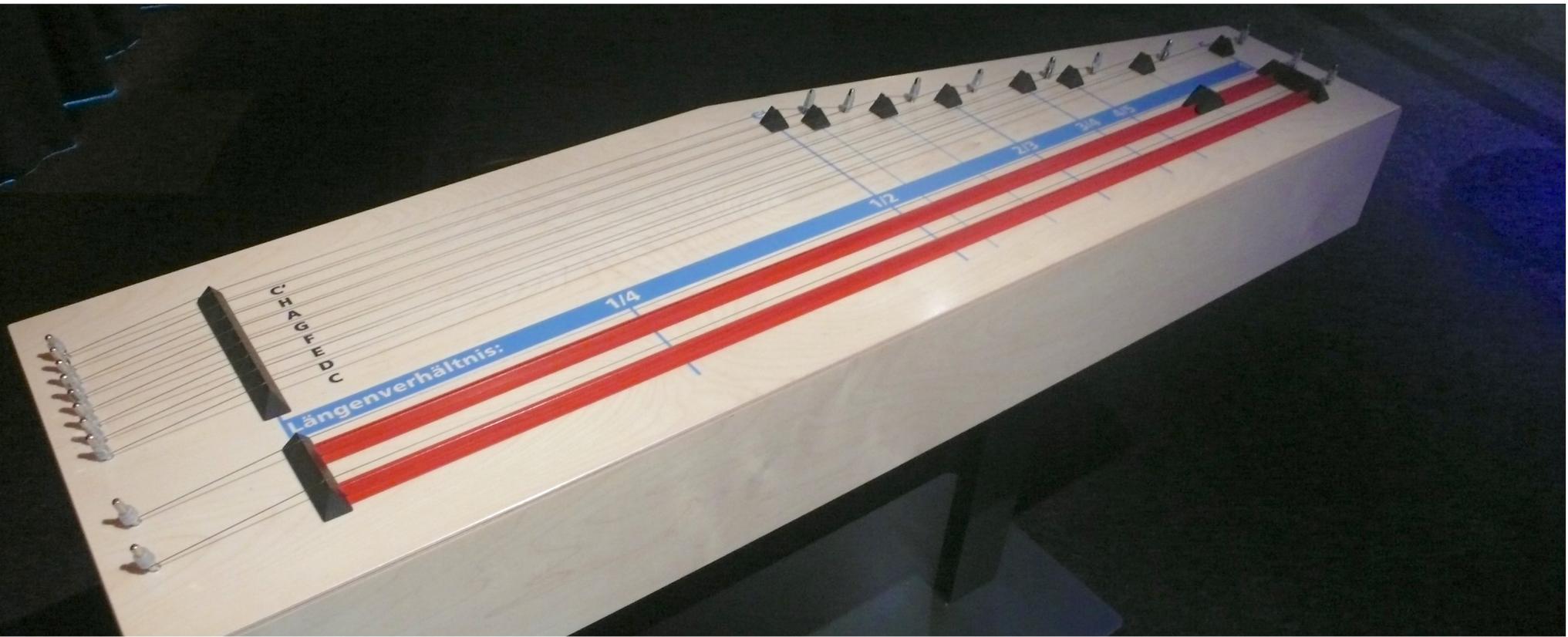
Losses Ende ohne Phasensprung

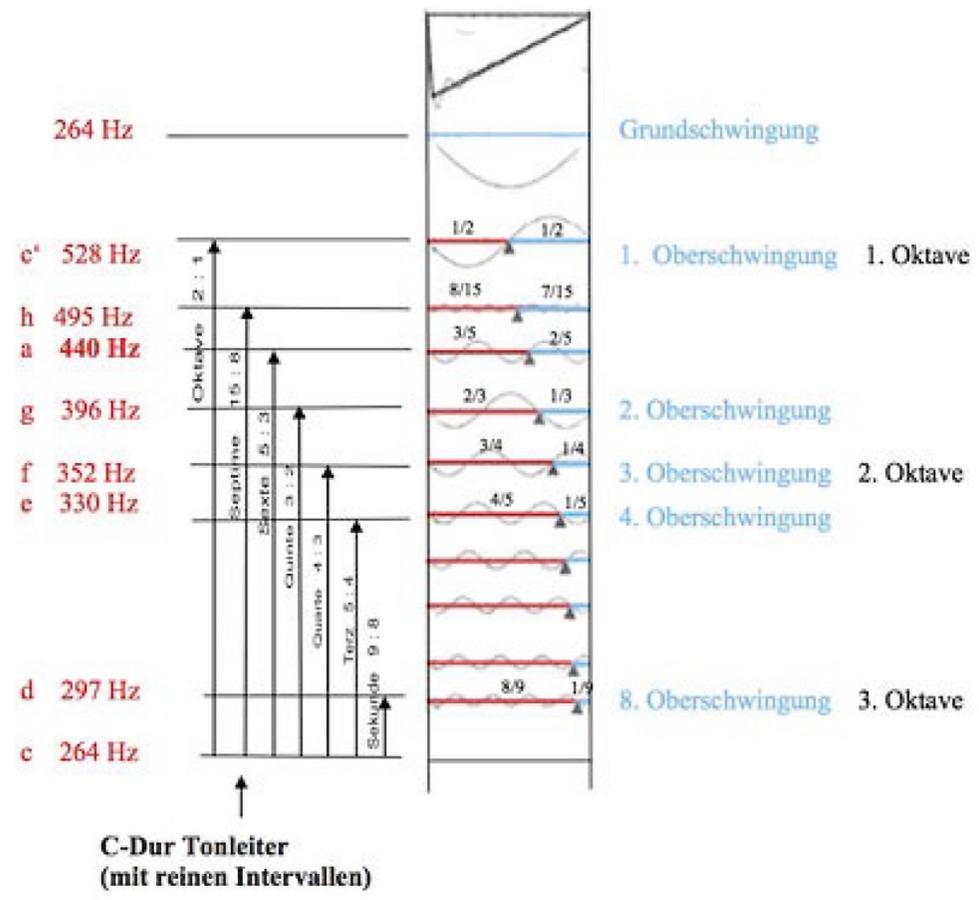
### 3. Polychord

Im Klavier ist jedem Ton eine Saite entsprechender Länge zugeordnet. Der Violinist verändert während des Spiels die Saitenlängen und so die Tonhöhen. Um jedoch den Tonumfang eines Klaviers annähernd zu erreichen, müssen verschiedene Streichinstrumente – Bass, Cello, Bratsche, Geige - eingesetzt werden.

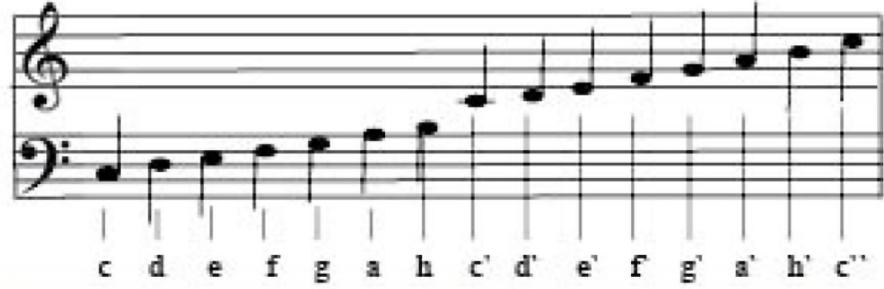
Beim sinusförmigen Anregen einer Saite wandern ein „Berg und ein Tal“ mit grosser Geschwindigkeit von einem festen Ende zum andern, werden dort reflektiert, kommen invertiert als Tal und Berg zurück.

Der Vorgang wiederholt sich immer wieder nach der gesamten Laufzeit  $T$  (hin und zurück). Wähle ich die Anregungszeit (Auf- und Abbewegung) gerade so gross wie die Laufzeit, so entsteht eine stehende Welle oder eine sog. Eigenschwingung. Den Kehrwert der Laufzeit ( $T$ ) nennt man Frequenz. ( $f = 1/T$ ). Sie gibt an, wie oft die Saite in einer Sekunde eine volle Schwingung vollführt. Wird die Saite nicht sinusförmig angeregt, so sind der Grundschwingung weitere Oberschwingungen überlagert. Nebenstehende Figur zeigt ein Beispiel sägezahnartiger Anregung (Zupfen)



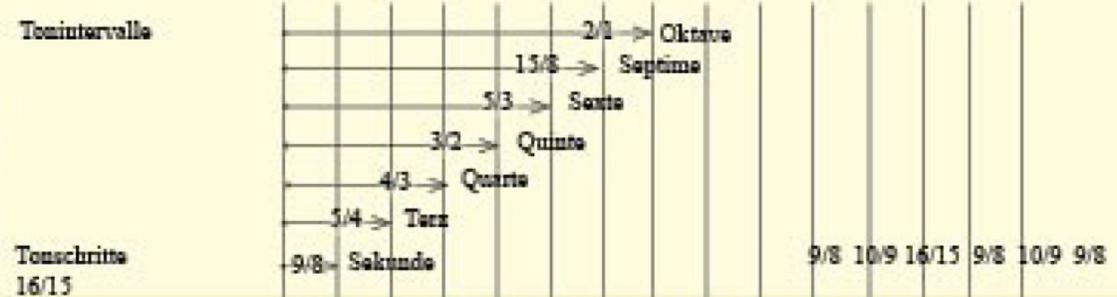


Eigenschwingungen einer Saite / Naturtonreihe



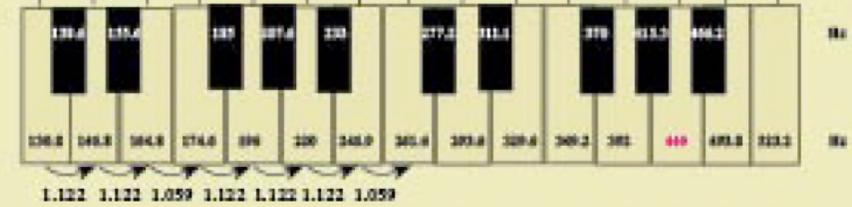
132 148 165 176 198 220 247 264 297 330 352 396 440 495 528 Hz

Chromatische C-Dur Tonleiter



Temperierte Tonleiter

$$\sqrt[12]{2} = 1.059$$
 (Halbtonschritte  $x = 1.059$ )



Die Frequenzen der Obertöne sind ganz-zahlige Vielfache des Grundtones. Ihre Verhältnisse sind umgekehrt proportional zu den Saitenlängen. Eine Halbierung der Saitenlänge führt zu einer Verdoppelung der Frequenz, also zu einem Oktavensprung.

Die Schwingweite gibt die Lautstärke an. Diese Töne sind als Klänge wohklingend. Aus diesem Grund wurde die natürliche Tonleiter auf der Basis der Obertöne gebildet. Daraus resultieren die reinen Tonintervalle. (Sekunde, Terz, Quarte, Quinte, Sexte, Septime, Oktave)

In der Musik wurde die Frequenzskala auf den Kammerton  $a = 440$  Hz normiert. Die

Frequenzintervalle legen dann alle weiteren Töne der Tonleiter fest. Wird nun die Saite in einem bestimmten Verhältnis verkürzt, so nimmt die Frequenz im umgekehrten Verhältnis zu. (Kap.4)

Versetze ich eine Saite in Schwingungen, so entsteht immer zum Grundton, je nach Instrument, eine Beimischung von Obertönen. Der Grundton ist am lautesten und die Obertöne so leise, dass wir sie kaum einzeln wahrnehmen können. Ihre Beimischung zum Grundton liefert die Klangfarbe.

Die Frequenzen der Obertöne sind ganzzahlige Vielfache der Frequenz des Grundtones. Man spricht von harmonischen Obertönen.

Wählen wir einen einfachen Bruchteil (zwischen  $1/2$  und  $1$ ) der ursprünglichen Saitenlänge, so entstehen weitere Töne innerhalb einer Oktave. Die ausgewählten Töne stehen in einem engen Zusammenhang zu den Obertönen und liefern die reine Diatonische Dur-Tonleiter.

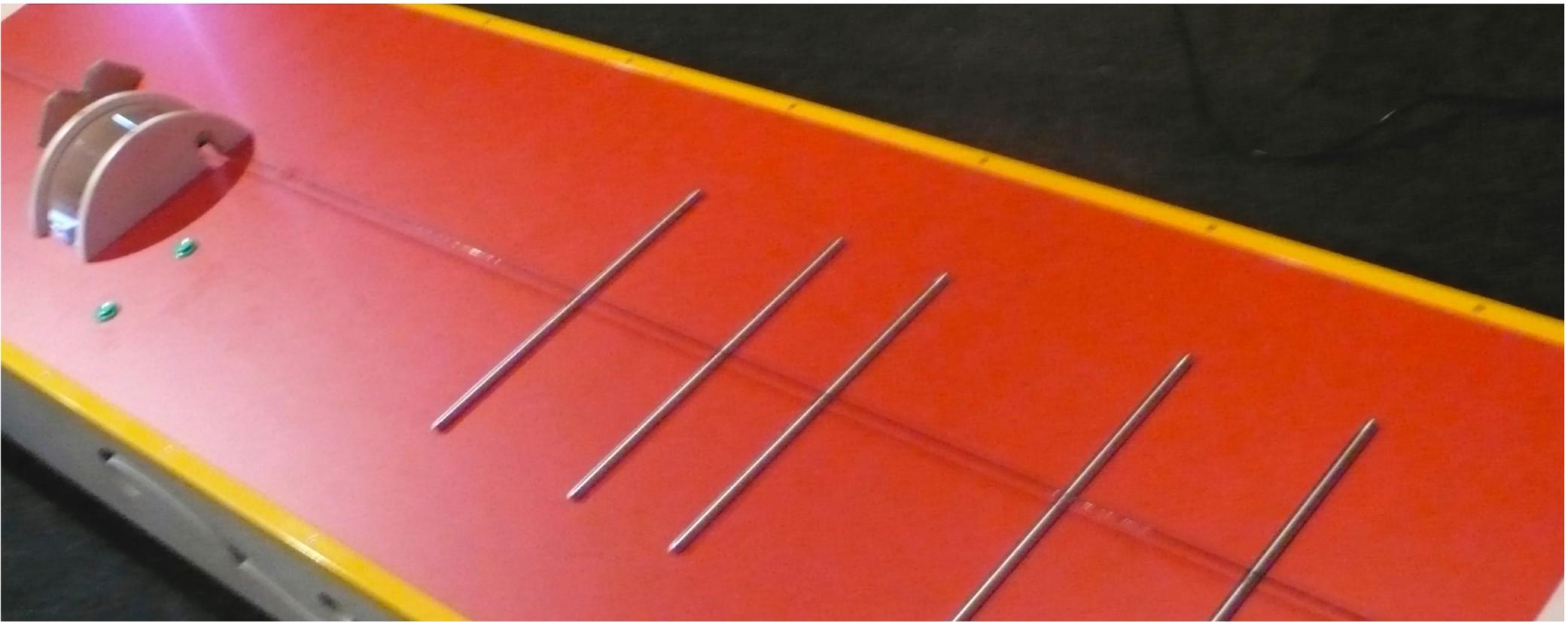
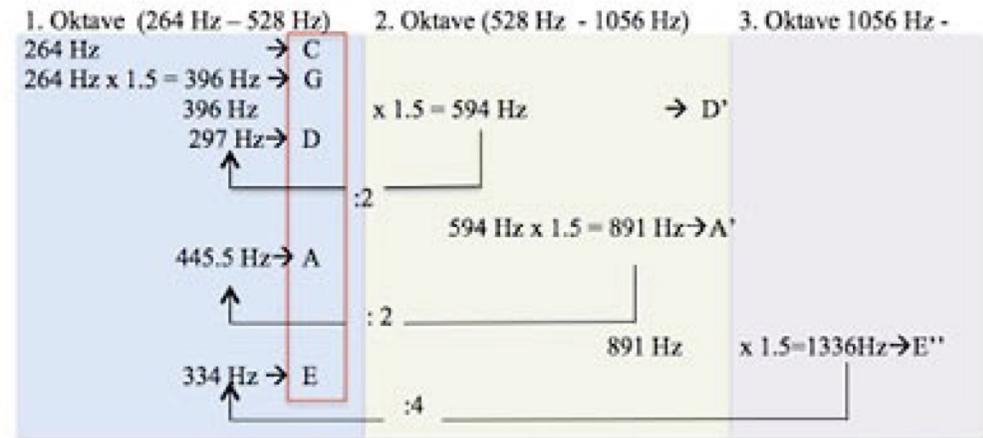
Verkürzung	Frequenzerhöhung	Tonintervall
1/1	1	Grundton
1/2	2	1. Oberton 1.Okt
1/3	3	2. Oberton
1/4	4	3. Oberton 2.Okt
1/5	5	4. Oberton
1/6	6	5. Oberton
1/7	7	6. Oberton
1/8	8	7. Oberton 3.Okt

## Reine Diatonische Dur-Tonleiter

## 4. Walking Bass

Die fünf Tonhöhen in der Pentatonik passen sehr gut zueinander. Die Frequenzverhältnisse zwischen den einzelnen Tönen sind einfach, und es gibt keine Halbtonschritte.

Lassen wir die eher problematischen Töne F und H in der C-Dur Tonleiter weg, so ergibt sich die Dur-Pentatonik, bestehend aus den fünf Tönen C D E G A. Diese Töne sind aufeinander geschichtete Quintenschritte (Frequenzverhältnis 3:2) von C->G->D->A->E zurückgenommen in eine Oktave. Da die Frequenzverhältnisse zwischen den einzelnen Tönen sehr einfach sind, trifft man sie prominent beim Improvisieren und in Kinderliedern an.

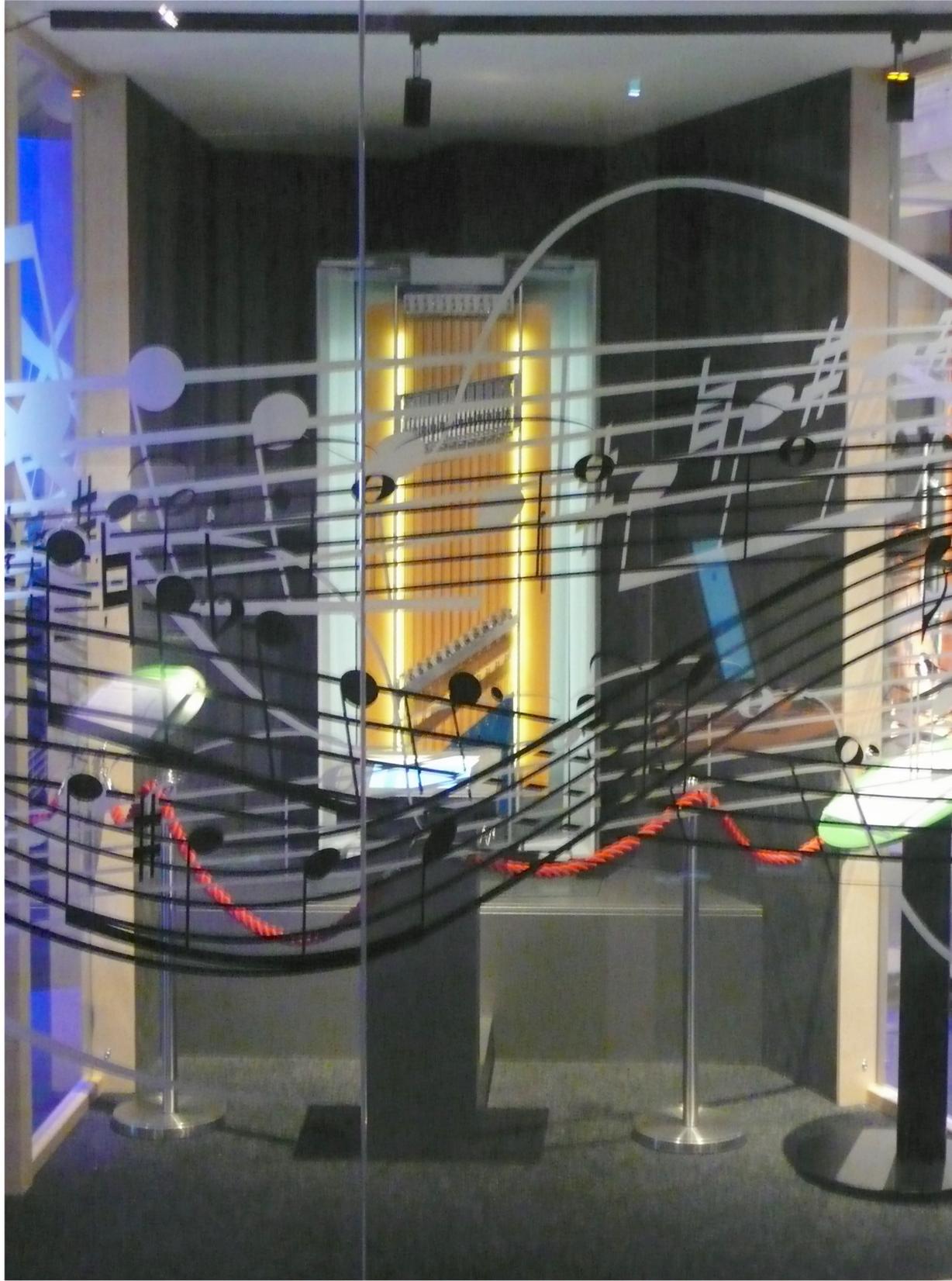


## 5. Syntharp

Der Musiker Rolf Krieger alias Arion Pascal aus Teufen entwickelte eine ganz spezielle Harfe mit 12 chromatisch gestimmten Saiten, bei denen 200 Obertöne über den Computer elektro-magnetisch angeregt werden können. Mit dieser Technik können Obertöne beliebig gemischt werden, so dass aus einem Saiteninstrument ungewohnte Klänge ertönen.

Eine einzelne Saite wird zum Schwingen angeregt mit einem Geigenbogen, einem Plektrum, einem Klavierhämmerchen und mit einer elektromagnetischen Spule. Aus den Schwingungsformen ermittelt ein Computerprogramm (Fast Fourier Transformation FFT. Kap. 6) die jeweiligen Frequenzspektren.





## 6. Obertöne

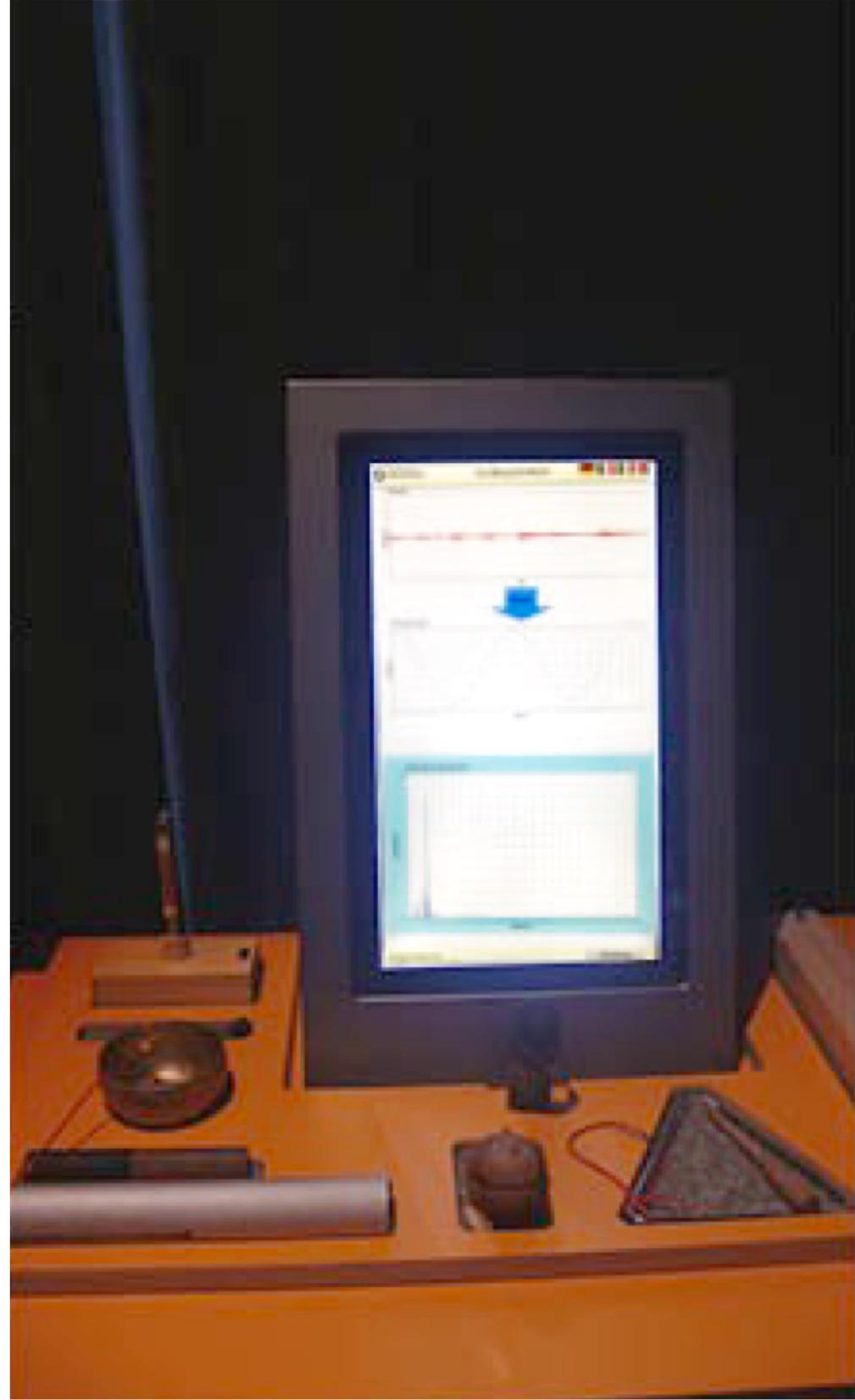
„Ton, Klang, Geräusch“

Ein Mikrofon nimmt die Klänge der verschiedenen Schallgeber

- Stimmgabel
- Klangschale
- Frosch
- Triangel
- Saite
- Klangrohr

auf.

Mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) wird aus dem Schallsignal das Obertonspektrum extrahiert. Sowohl Schallsignal als auch Obertonspektrum werden auf dem Monitor angezeigt.



## Beispiele von Schallsignalen

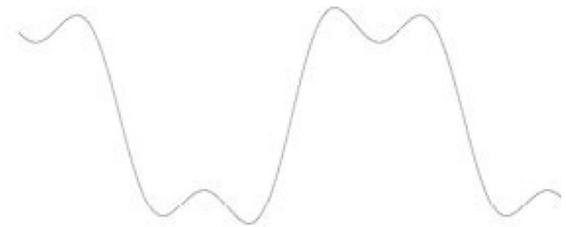
### Töne

Eine sinusförmige Schwingung einer bestimmten Frequenz (Stimmgabeln).



### Klänge

Sie bestehen aus einem Grundton (Tonhöhe) und der Beimischung passender Obertöne. Die Obertöne bestimmen die Klangfarbe.



### Geräusche

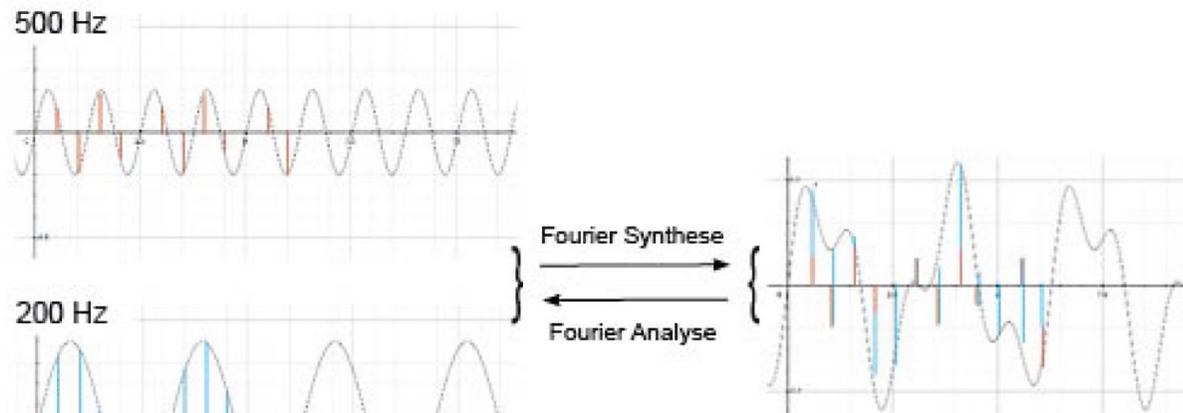
Mischung von vielen unharmonischen Tönen (Kratzen, Rascheln).



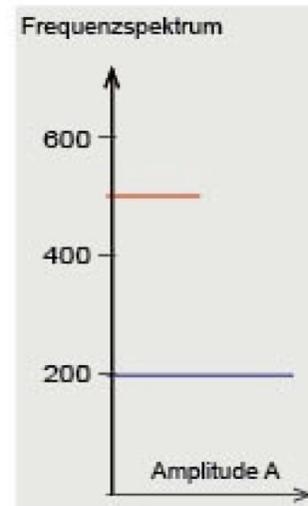
### Knall

Mischung von sehr vielen, lauten, unharmonischen Tönen, die sehr schnell abklingen.





Jeder Klang besteht aus einem Grundton (z.B. 200 Hz.) und Obertönen (z.B. 500 Hz). Die Überlagerung dieser Töne ergibt das Timbre oder die für das Instrument typische Klangfarbe. Mit einer Fourier-Transformation (FFT: Fast Fourier Transformation) kann das komplizierte, periodische Schallsignal in den Grundton und die Obertöne zerlegt werden. Das Frequenzspektrum gibt über die Zusammensetzung des Klanges Auskunft.



## 7. Riecke-Rohr

„Heissluftorgel“

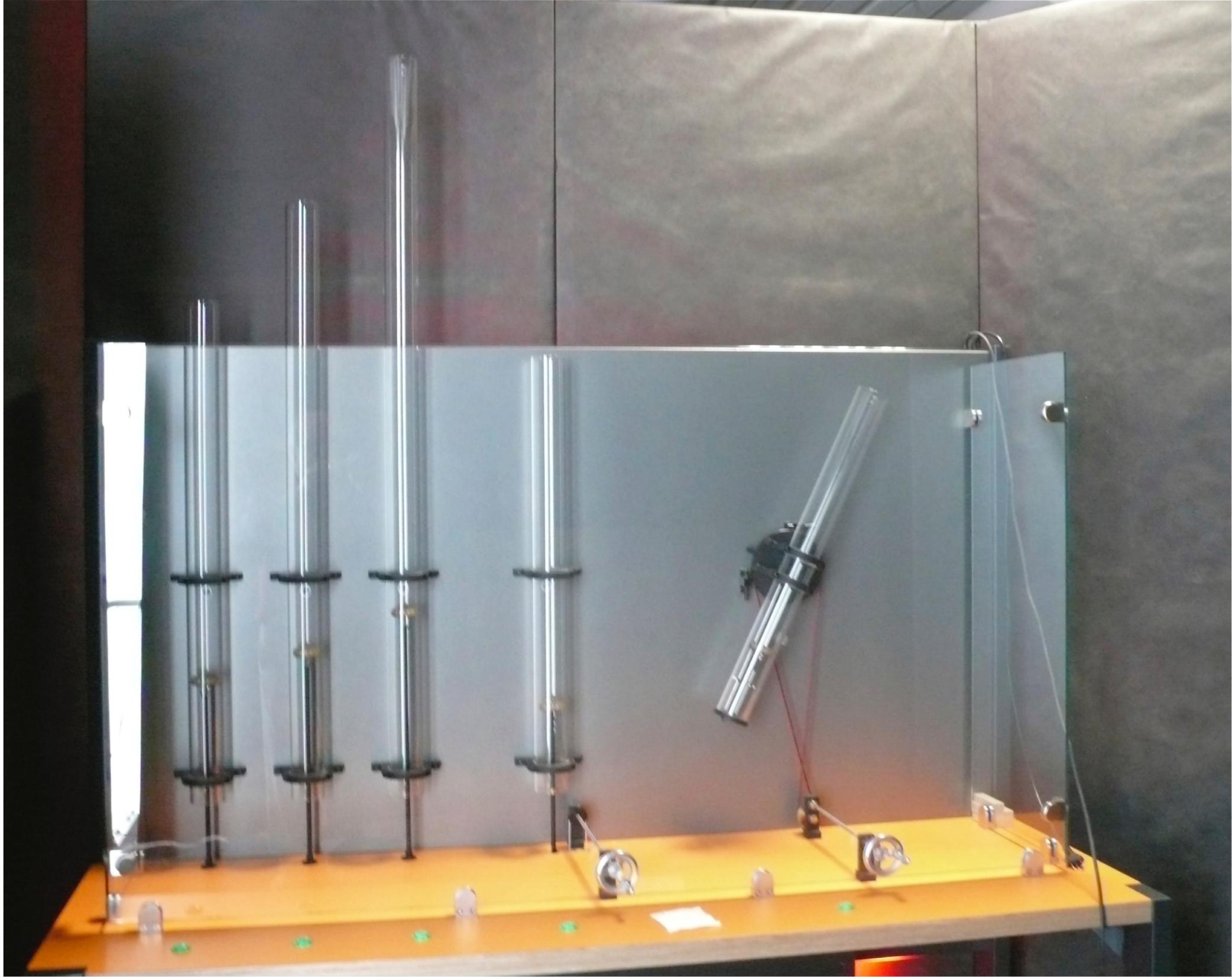
Am unteren Ende eines senkrecht stehenden Glasrohres wird die Luft erhitzt. Eine Druckwelle steigt nach oben, wird am oberen Ende z.T. reflektiert und überlagert sich mit der ankommenden Druckwelle. Es bildet sich im Rohr eine stehende Welle aus (Kap.3) mit Bewegungsbäuchen an den Rohrenden und einem Bewegungsknoten in der Mitte. Die Frequenz dieser Welle entspricht gerade dem Reziproken der halben Laufzeit von unten nach oben. Kurze Röhre bedeutet also kurze Laufzeit und dementsprechend hohe Frequenz und umgekehrt.

Mit der allgemein gültigen Gleichung für Wellen, dass die Wellenlänge multipliziert mit der Frequenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles ergibt, berechnet man für ein Rohr der Länge 1m eine Tonhöhe von ungefähr 170 Hz.

Wird an der falschen Stelle geheizt - z.B. im Bewegungsknoten in der Mitte - so kann sich die stehende Welle nicht ausbilden.

Wird das Glasrohr horizontal gestellt, so verstummt sie auch, weil die heisse Luft nicht mehr nach oben steigen kann.





## 8. Orgelpfeifen

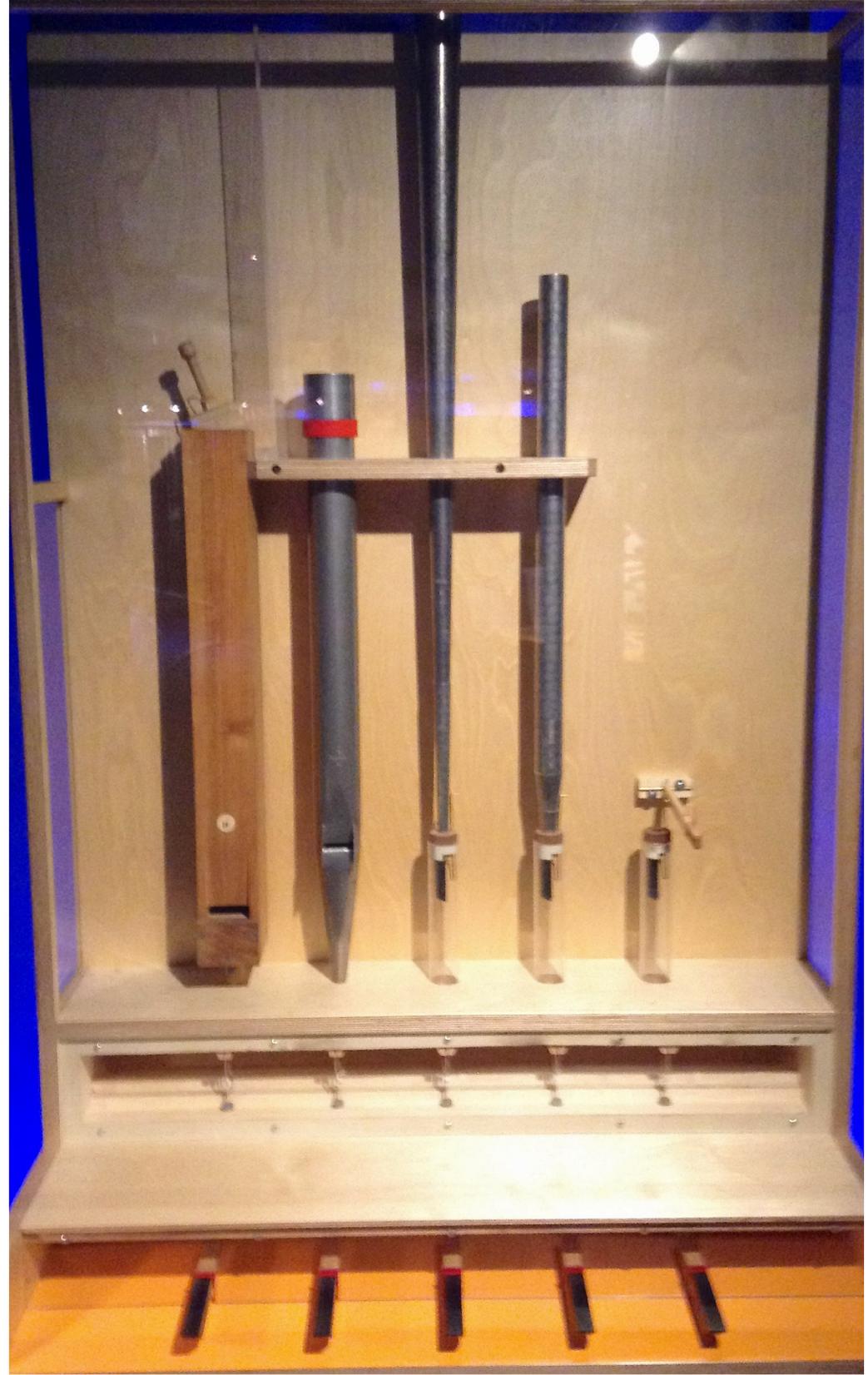
Die Orgelbaufirma Metzler in Dietikon ZH erstellte dieses sehr schöne Exponat, bei dem die gängigen Orgelpfeifen untersucht werden können.

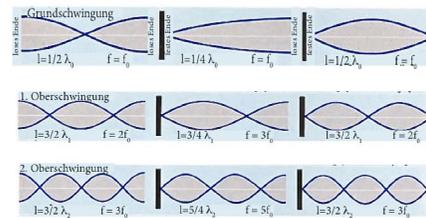
Das Funktionsprinzip ist demjenigen der Riecke-Rohre sehr ähnlich (Kap. 7). Der grosse Unterschied besteht in der Erzeugung der Druckschwankung im Rohr und der Ausgestaltung des Rohres selbst.

Bei den **Zungenpfeifen** bringt ein Luftstrom eine Metallzunge ins Schwingen. Die einstellbare Zungenlänge bestimmt die Schwingfrequenz. Diese Schwingung unterbricht immer wieder den Luftstrom und so entsteht ein schnarrendes Geräusch. Die aufgesetzten Resonatoren filtern die Obertöne aus und ergeben eine typische Klangfarbe (Krummhorn, Oboe).

Bei der **Lippenpfeife** wird der Luftstrom gegen eine Lippe geblasen, und es kommt zur Wirbelbildung. Diese Wirbel erzeugen im Rohr die Druckschwankung.

Die Holzpfeife hat, als Lippenpfeife, wiederum ein anderes Obertonspektrum. Sie kann mit einem Stöpsel geschlossen werden, was zu einem Oktavensprung führt. Die Obertöne „gedackter“ Pfeifen sind nur ungeradzahlige Vielfache des Grundtones.





**Luftschwingungen/Saitenschwingungen mit festen und losen Enden**

## 9. Whirleys

Diese rotierenden Elektroinstallationsrohre erzeugen bei der Rotation Töne, deren Tonhöhe abhängig ist von der Rohrlänge. Es gilt wiederum: Je länger das Rohr, umso tiefer der Ton (Kap. 7)

Ohne die Riffelung in den Rohren gelingt das Experiment nicht, denn sie sorgt dafür, dass die durch die Zentrifugalkraft nach aussen strömende Luft verwirbelt wird und es so zu Druckschwankungen kommt.

Wird die Rotationsgeschwindigkeit erhöht, so nehmen auch die Tonhöhen zu. Die Tonintervalle bleiben gleich.



# 10. Schalllinsen

Bei der Schalleitung wird ein Impuls von einem Atom auf das nächste übertragen. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, hängt wesentlich davon ab, wie stark die einzelnen Atome miteinander gekoppelt sind und wie gross die thermische Bewegung (die Temperatur) des Stoffes ist. In Gasen (Luft als Gasgemisch) ist diese Kopplung schwach und die Schallgeschwindigkeit dementsprechend klein (ca. 340 m/s in Luft). Eine Druckwelle pflanzt sich also mit dieser Geschwindigkeit in Luft fort.

In einem Festkörper ist die Kopplung zwischen den Atomen stärker und die Schallgeschwindigkeit grösser (über 5000m/s in Metallen, 1540 m/s in Wasser).

Die Schallgeschwindigkeit in Gasen ist auch noch von der Gassorte abhängig. Je träger die einzelnen Atome oder Moleküle, umso langsamer geht die Impulsübertragung.

Tritt eine Welle von einem Medium grösserer Ausbreitungsgeschwindigkeit in ein solches kleinerer, so wird sie dem Lot der Begrenzungsfläche zugebrochen, und es kommt zu einer Bündelung. So kann mit dem Gas Schwefelhexafluorid eine Schallsammellinse gebaut werden. Mit Helium erhält man eine Schallstreulinse.



# 11. Schall im Festkörper

„Klanggarderobe“

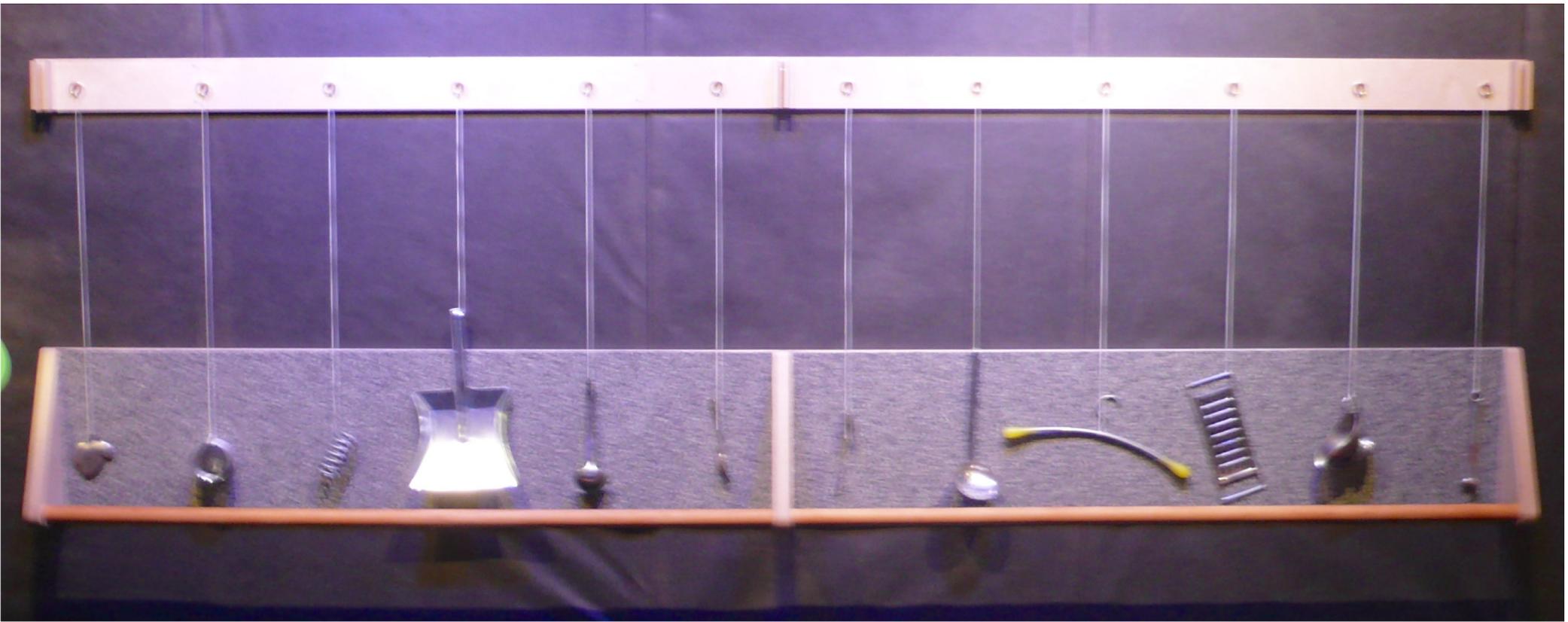
„Musik mit Biss“

„Musik im Arm“

Über die Schnüre werden bei der Klanggarderobe die Töne der angeschlagenen Küchengegenstände ins Ohr übertragen.

Wird auf den Trinkhalm der über ein nach Musik vibrierendes Stäbchen gebissen, so kann der Schall direkt über die Knochen ins Innenohr geleitet werden.

Schallwellen werden von einem vibrierenden Stift über den Ellbogen, die Armknochen, die Schläfe ins Ohr geleitet.



## 12. Schallarmer Raum

Die Frage, was man in einer Muschel hört (Meeresrauschen? Blutzirkulation?) wird hier beantwortet.

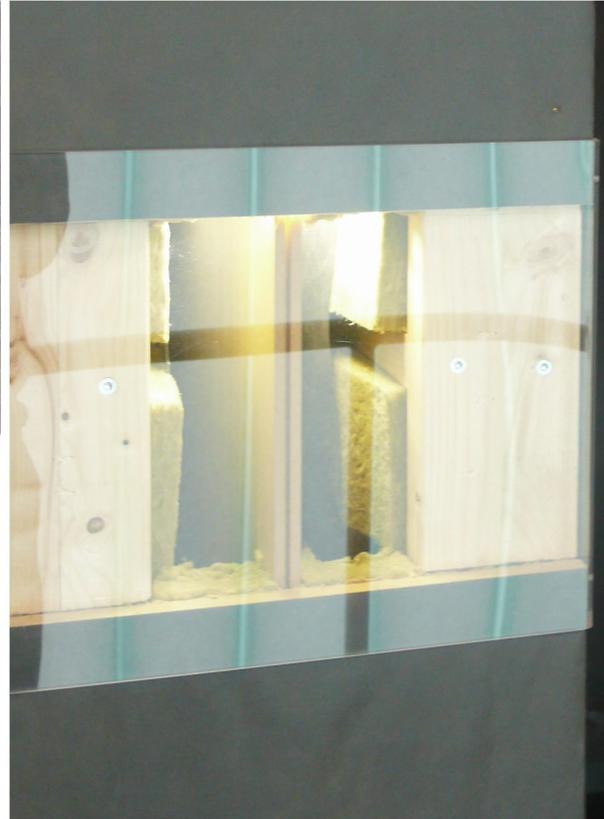
Da im schallarmen Raum kaum etwas zu hören ist, muss angenommen werden, dass die Muscheln aus dem Umgebungslärm einzelne Töne herausfiltern (Kap.21)

Die Wände in diesem Raum sind so beschaffen, dass alle Schallwellen verschluckt werden. Es dringen von aussen auch keine Schallwellen in den Raum hinein. So ist es denn unheimlich ruhig und es fehlt das uns im Alltag begleitende Untergrundrauschen. Unsere Ohren sind in diesem Raum nicht mehr übersteuert und können feinste Druckschwankungen wahrnehmen. Es stellt sich ein unangenehmes Gefühl der Verlassenheit und der Isolation ein.

Mit Hilfe der Akustikabteilung der EMPA konnte eine optimale Lösung gefunden werden. Es müssen zwei Anforderungen erfüllt werden: Der Umgebungsschall soll nicht in den Raum eindringen und der Schall im Raum soll absorbiert werden. Schall kann über die Luft oder die Wände übertragen werden (Kap. 10)

Schwere Aussenwände reflektieren den Aussenschall. Im Innern verwendet man poröse Materialien in denen die Schallenergie in Wärme umgewandelt wird. Hohlräume haben eine ähnliche Wirkung.

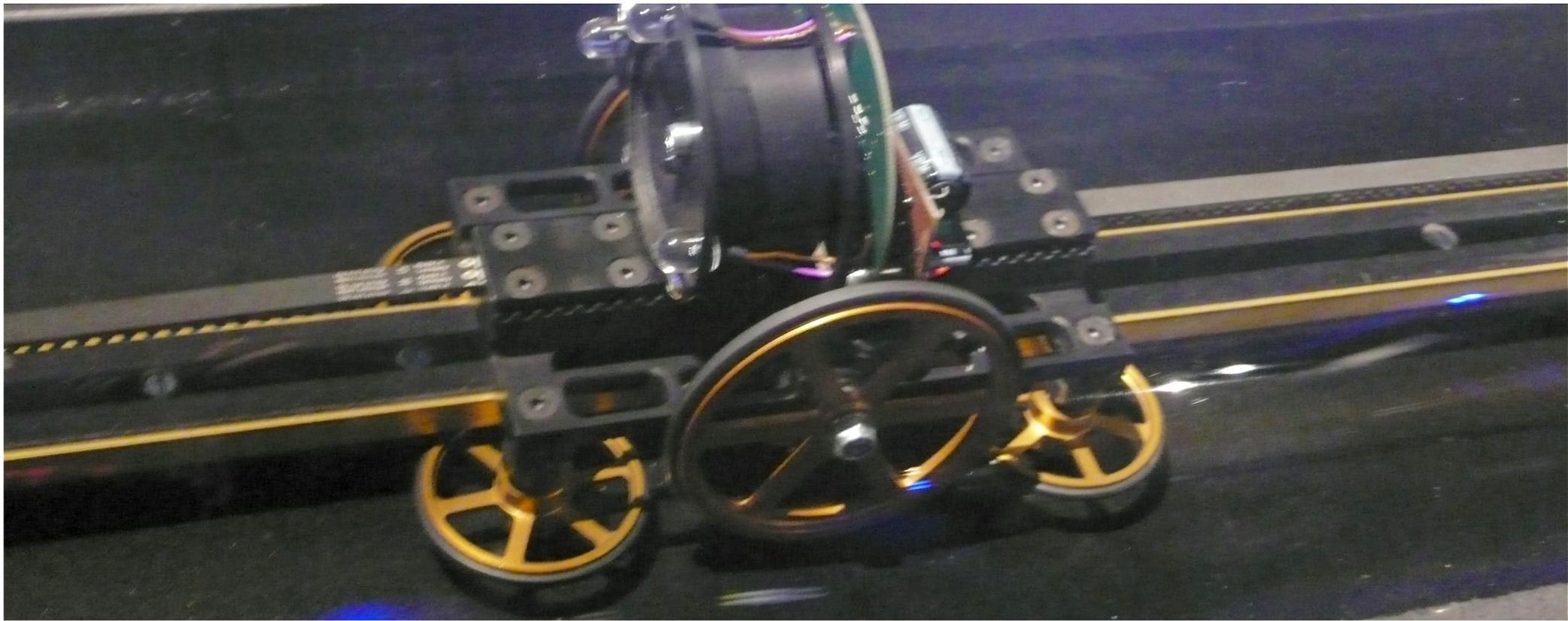
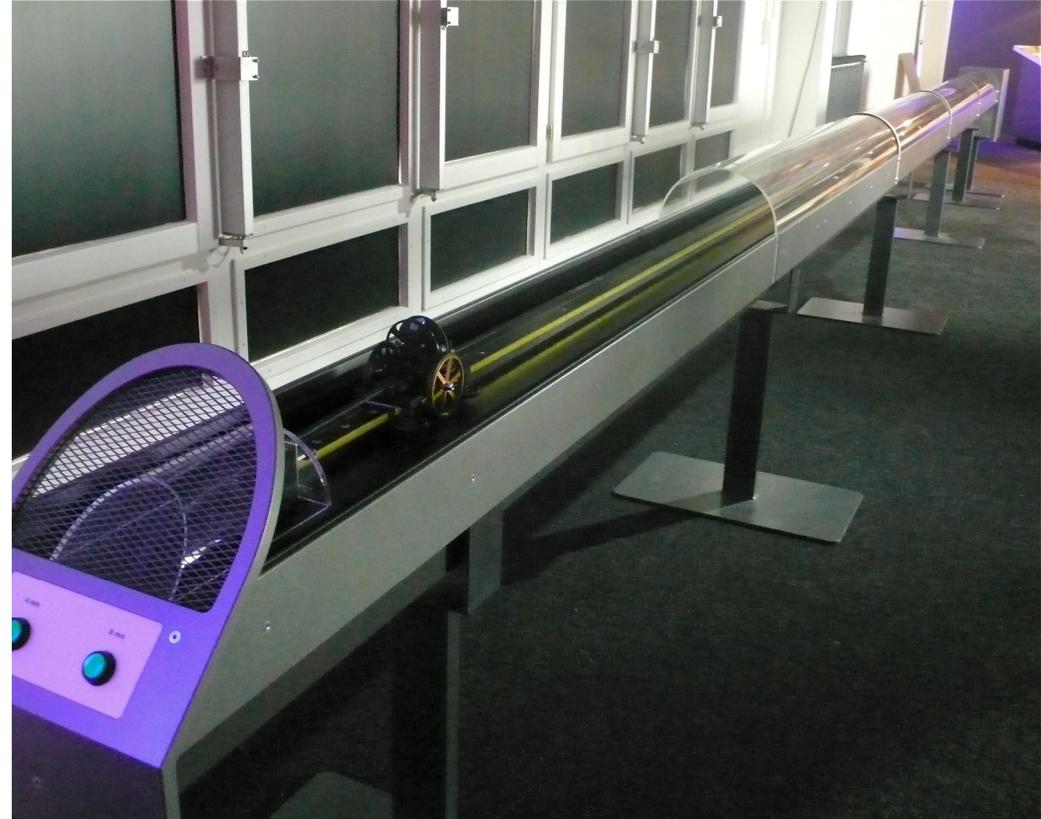




## 12. Doppler Effekt

Entfernt sich ein Schallerzeuger vom Beobachter, so werden die Wellen auseinandergezogen. Grössere Wellenlänge bedeutet tieferer Ton. Die Frequenzänderung berechnet sich aus  $v/c$ . Bei der Annäherung passiert das Umgekehrte.

Mit  $v = 8 \text{ m/s}$  und  $c = 340 \text{ m/s}$  ergibt das eine Frequenzänderung von 2.5 %. Da in der temperierten Stimmung der Halbtonschritt 5.8 % ausmacht (Kap.2), ist dies ein halber Halbtonschritt. Man muss also gut hinhören.

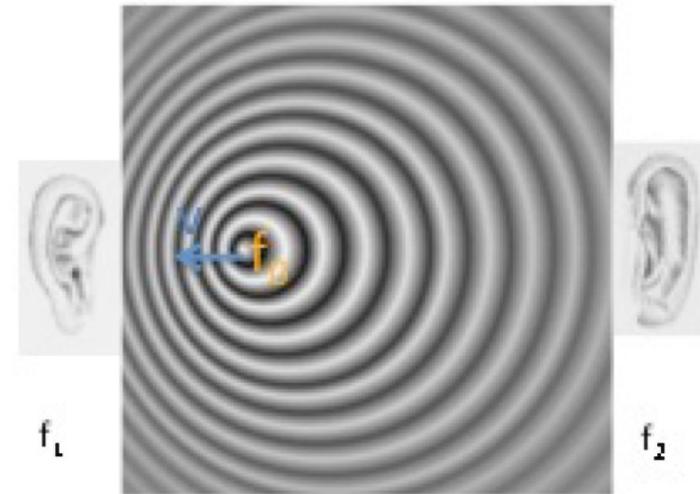


## Doppler Effekt

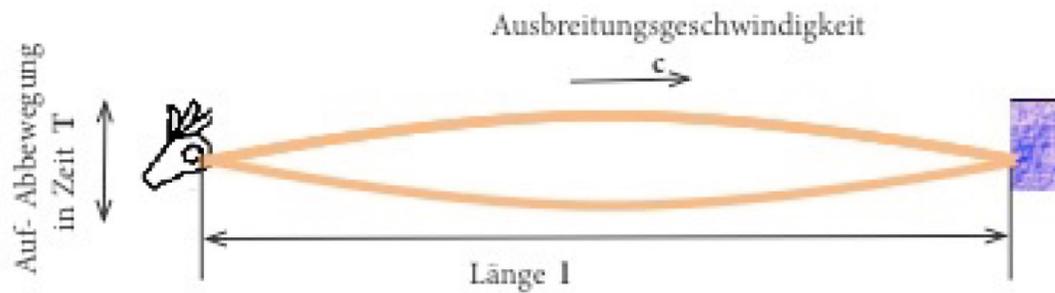
Bewegt sich die Schallquelle, die Wellen der Frequenz  $f_0$  aussendet auf einen Beobachter zu, so hört dieser einen Ton höherer Frequenz  $f_1$ .

Entfernt sich die Schallquelle, so hört er einen tieferen Ton der Frequenz  $f_2$ .

Es gilt:  $f_{1/2} = f_0 (1 \pm v/c)$



## Stehende Wellen



$$c = 2l/T = 2lf = \lambda f$$

$$c = \lambda f$$

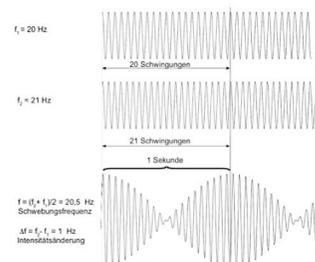
# 14. Schwebung

Zwei Töne nahezu gleicher Frequenz ergeben einen Mischton, der in seiner Lautstärke zu und abnimmt. Die Frequenz des gehörten Tones entspricht dem arithmetischen Mittel der beiden ursprünglichen Frequenzen. Die Intensität ändert mit der Differenz der beiden Frequenzen.

Instrumente werden nach diesem Prinzip abgestimmt. Die beiden Töne haben dann dieselbe Frequenz, wenn der „Wau-Wau-Effekt“ verschwindet.

Eine von zwei 440 Hz Stimmgabeln kann leicht verstimmt werden. Zwei ebenfalls auf 440 Hz abgestimmte Flöten können leicht verstimmt werden. An einem Drehpotentiometer kann die Tonhöhe eines Lautsprechers gegenüber einem anderen Lautsprecher quantitativ verändert werden.





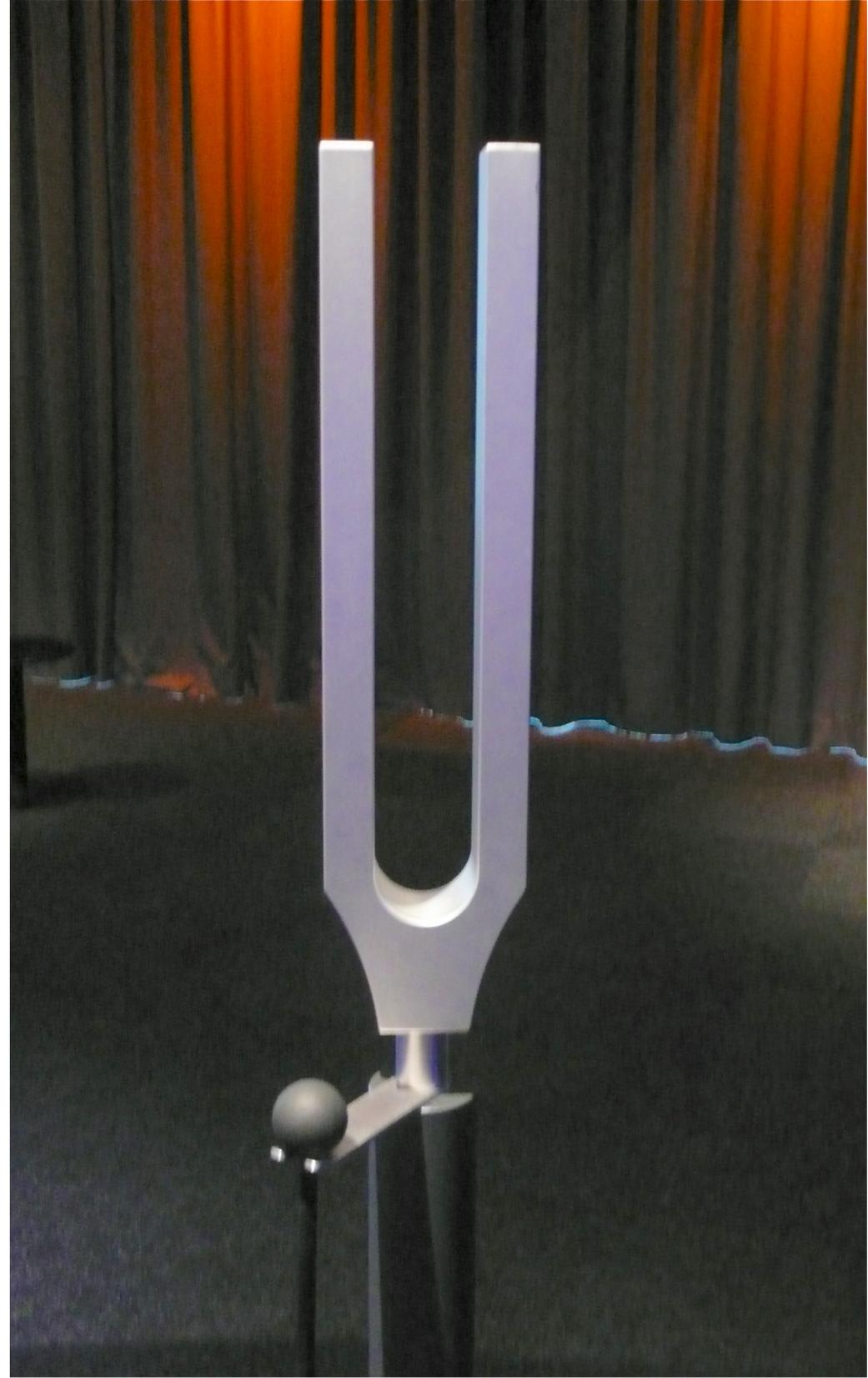
## Schwebungen

# 15. Stimmgabeln

Stimmgabeln sind Biegeschwinger. Die Berechnung der Schwingungsmoden ist mathematisch sehr anspruchsvoll. Die Schwingungsmoden sind keine Harmonischen. Beim Anschlagen hören wir zuerst wie bei Glocken den Schlagton und anschliessend sehr lange den Grundton und die unharmonischen Obertöne.

Von den beiden Zinken gehen Schallwellen weg, die sich in der Umgebung der Stimmgabel überlagern. Treffen an einem bestimmten Ort zwei Wellenberge aufeinander, so verstärken sie sich, treffen gleich hohe Berge und Täler aufeinander, so löschen sie sich aus. Man nennt das konstruktive, resp. destruktive Interferenz.

Bewegt man sich um die Stimmgabeln herum, so kann die Unterstützung und die Auslöschung in Lautstärkeänderungen wahrgenommen werden.

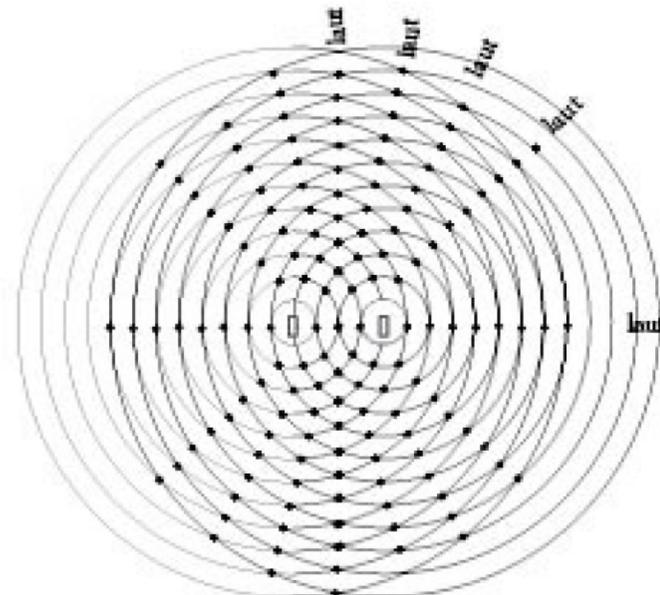




### Grund- und Oberschwingungen



### Interferenz bei Kreiswellen



## 16. Slow Motion

Die sehr schnellen Bewegungen der Stimmgabelzinken können unter normaler Beleuchtung nicht wahrgenommen werden. Wird ein Schwinger jedoch mit pulsierendem Licht von nahezu Stimmgabelfrequenz bestrahlt, so kann die Schwingung als Stroboskopbild wahrgenommen werden.

Stimmen die Lichtfrequenz und die Frequenz des Schwingers genau überein, so kann die Bewegung sogar eingefroren werden.

Ein grosser Glaskelch kann durch den Druck von Schallwellen in Schwingung versetzt werden. Dass dies bei bestimmten Frequenzen gut geht, hat mit dem Resonanzverhalten des Bechers zu tun. (Kap. 17).  
Wiederum kann die Glasschwingung mit Licht das mit nahezu der gleichen Frequenz blinkt, sichtbar gemacht werden



## 17. Glasharfe

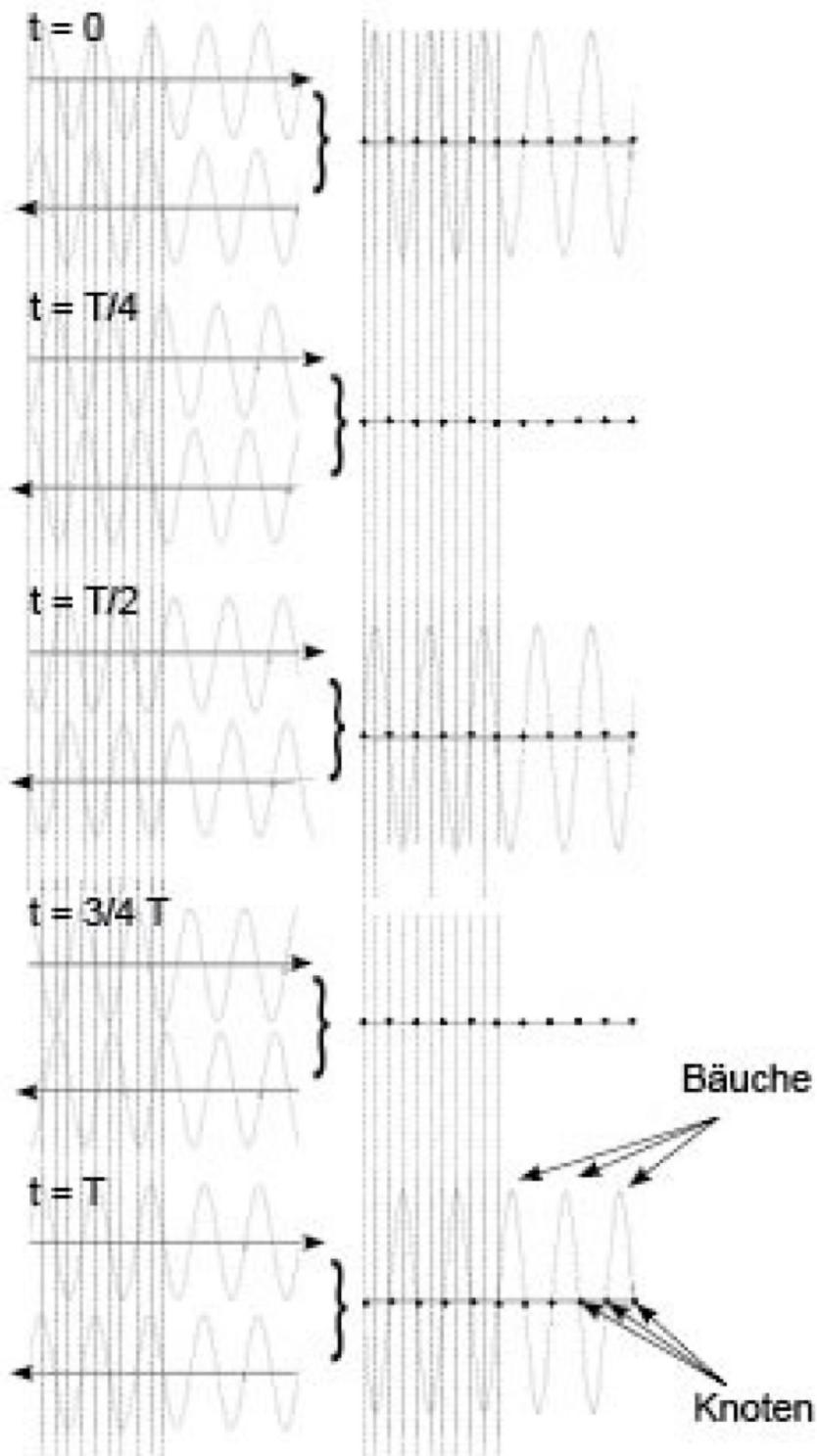
„Glasklänge“

Ein Weinglas kann zum Klingen gebracht werden, wenn mit dem nassen Finger der Glasrand überstrichen wird. Die Reibung zwischen Finger und Glas ist so gross, dass das Glas eine kleine Deformation erleidet und zurückschwingt. Da die Gleitreibung kleiner ist als die Haftreibung, kann das Glas unter dem Finger weiterschwingen, bis durch die Haftreibung erneut eine Auslenkung passiert. (Es ist dies derselbe Vorgang wie beim Streichen einer Saite mit dem Geigenbogen.)

Die Tonhöhe kann abgestimmt werden, indem Wasser in das Glas gegossen wird. Je mehr Wasser im Glas sich befindet, umso träger ist der Schwinger und umso tiefer der Ton. Die Gläser wurden nach einer pentatonischen Tonskala (Kap. 4) abgestimmt.

Bläst man über eine Flasche hinweg, so hören wir auch einen Ton, dessen Frequenz jedoch zunimmt, wenn wir mehr Wasser einfüllen. Der grosse Unterschied zur Glasharfe ist der, dass hier im Luftraum der Flasche eine stehende Welle entsteht wie bei den Pfeifen. (Kap.7)





## Überlagerung von Wellen/Stehende Welle

Laufen auf einer Saite zwei Wellen gleicher Amplitude und gleicher Frequenz gegeneinander, so ergibt ihre Überlagerung eine sog. Stehende Welle. Die Stehenden Wellen zeichnen sich dadurch aus, dass es bei ihnen Stellen ständiger Ruhe, sog. Knoten (Knotenlinien) gibt, die eine halbe Wellenlänge auseinanderliegen. Zwischen den Knoten hat es Bäuche, bei denen die Auslenkung maximal wird.

Ist der Schwinger eingespannt (die Saite an beiden Enden), so entstehen nur bei ganz bestimmten Erregerfrequenzen Stehende Wellen. (Kap.3) Die Schwinger schwingen dann mit der Frequenz, mit der sie schwingen würden bei einmaliger Anregung. Dieser Frequenz, die dem Schwinger eigen ist, bezeichnet man als Eigenfrequenz.

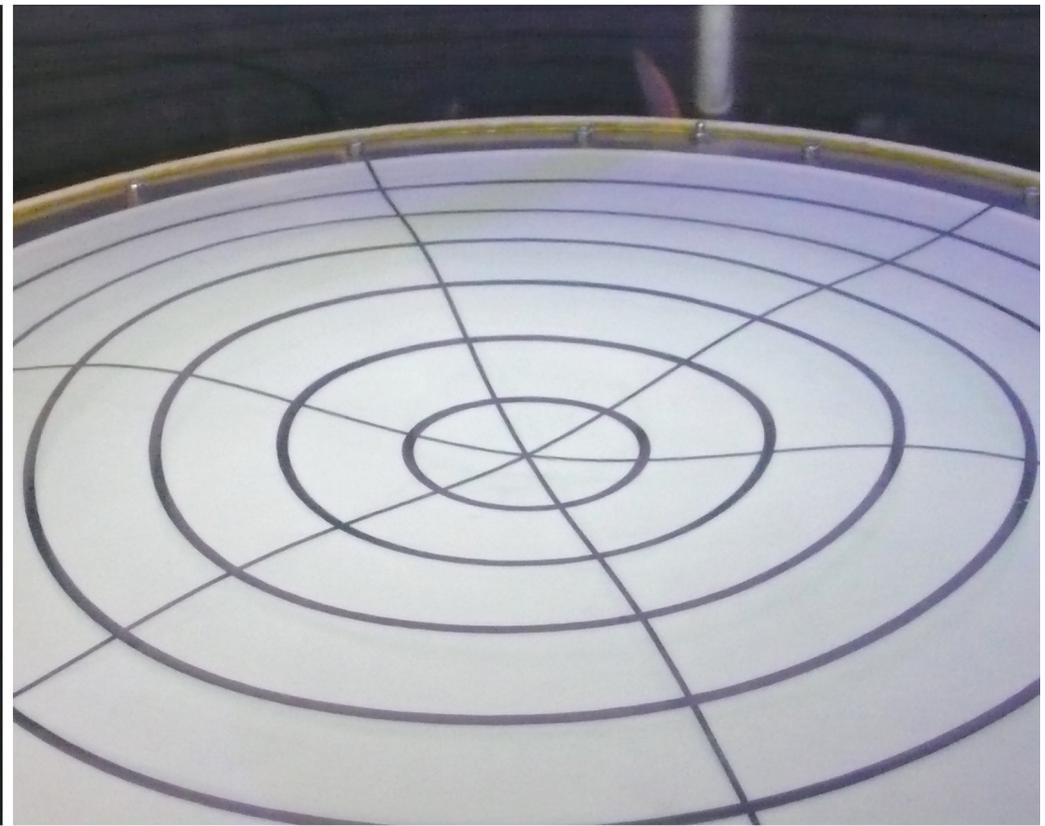
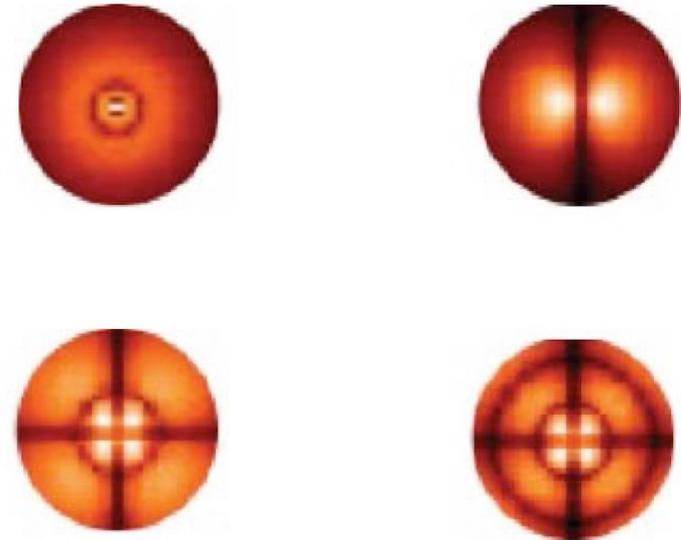
Rege ich einen Schwinger mit seiner Eigenfrequenz an, so wird er maximale Auslenkung zeigen. Diesen Vorgang bezeichnet man als Resonanz.

Resonanz erhalten wir also immer dann, wenn die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz ist.

# 18. Schwingende Membran

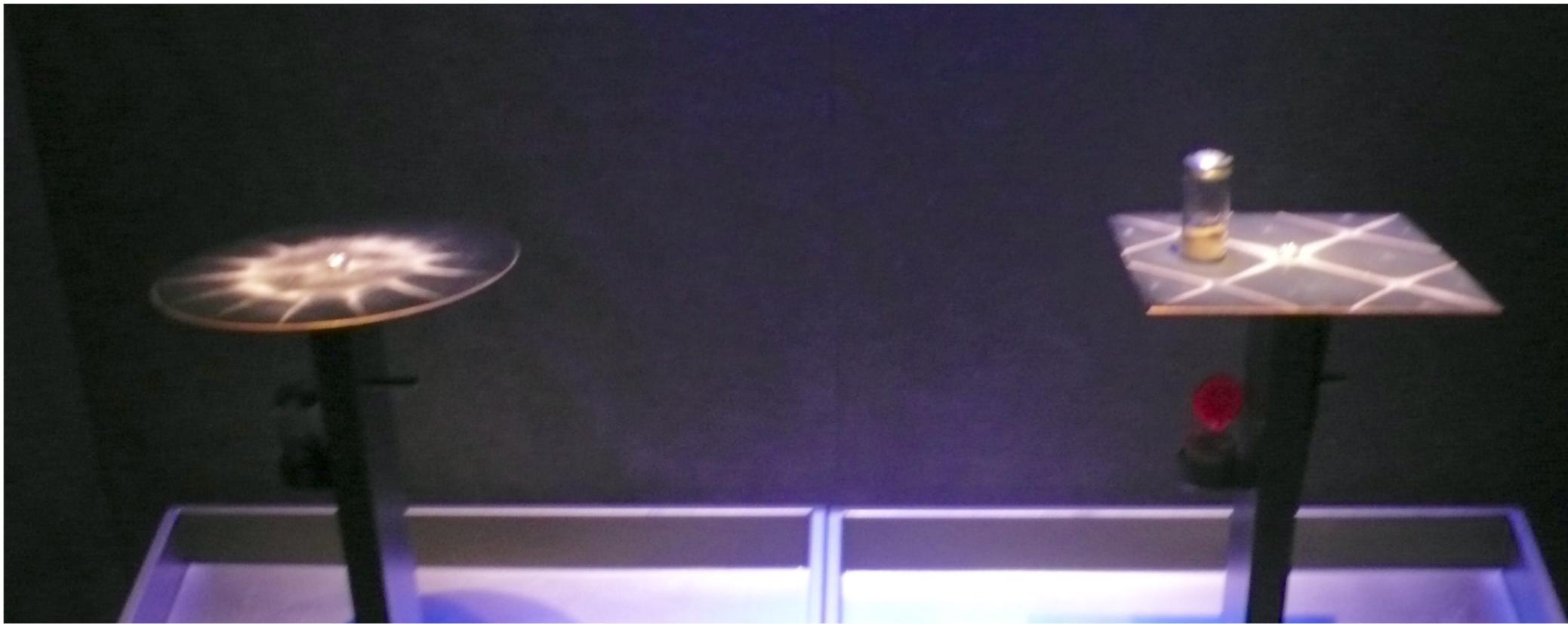
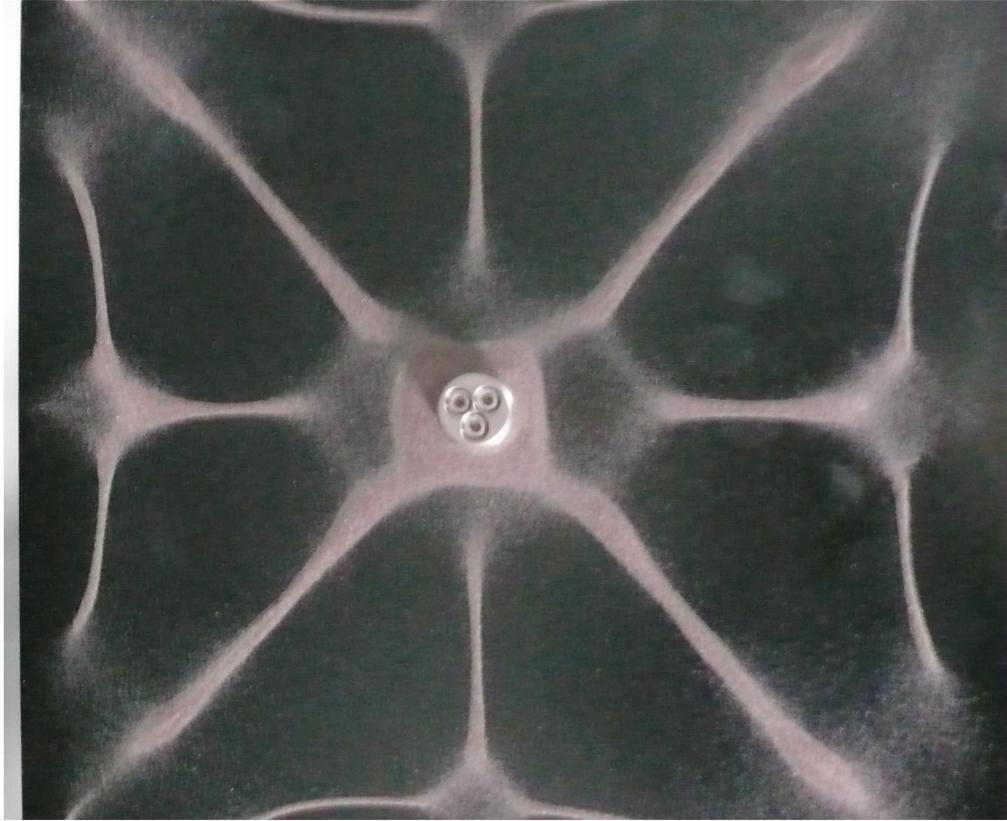
Wird eine Gummimembran durch einen Lautsprecher zu Resonanzschwingungen angeregt, so entstehen ganz charakteristische Muster. Die möglichen Schwingformen (Moden) werden durch die Randbedingungen festgelegt. Es entstehen hier Knotenlinien und Bäuche. Das Auf und Ab der Bäuche sieht man sehr schön im pulsierenden Licht. (Kap.16)

Ähnliche Bilder erhalten wir bei der Visualisierung der berechneten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des Elektrons im Wasserstoffatom. Das Proton zieht das Elektron an. Es ist in einem elektrischen Potential gefangen. Die Frequenzen, mit denen es um das Proton schwingen kann, sind auch hier durch die Randbedingungen festgelegt.



# 19. Chladni Figuren

Die Metallplatten (quadratisch, kreisförmig) werden mit Sand bestreut und am Rand mit einem Geigenbogen in Schwingung versetzt. Je nach der Stelle, an der die Platte mit einem Finger der zweiten Hand gedämpft wird, können verschiedene **Eigenschwingungen** angeregt werden. Entlang der **Knotenlinien** bleibt der Sand in Ruhe. Bei den **Bäuchen** wird der Sand weggewirbelt. So entstehen wunderbare, symmetrische Klangfiguren.



## 20. Resonanzrohr

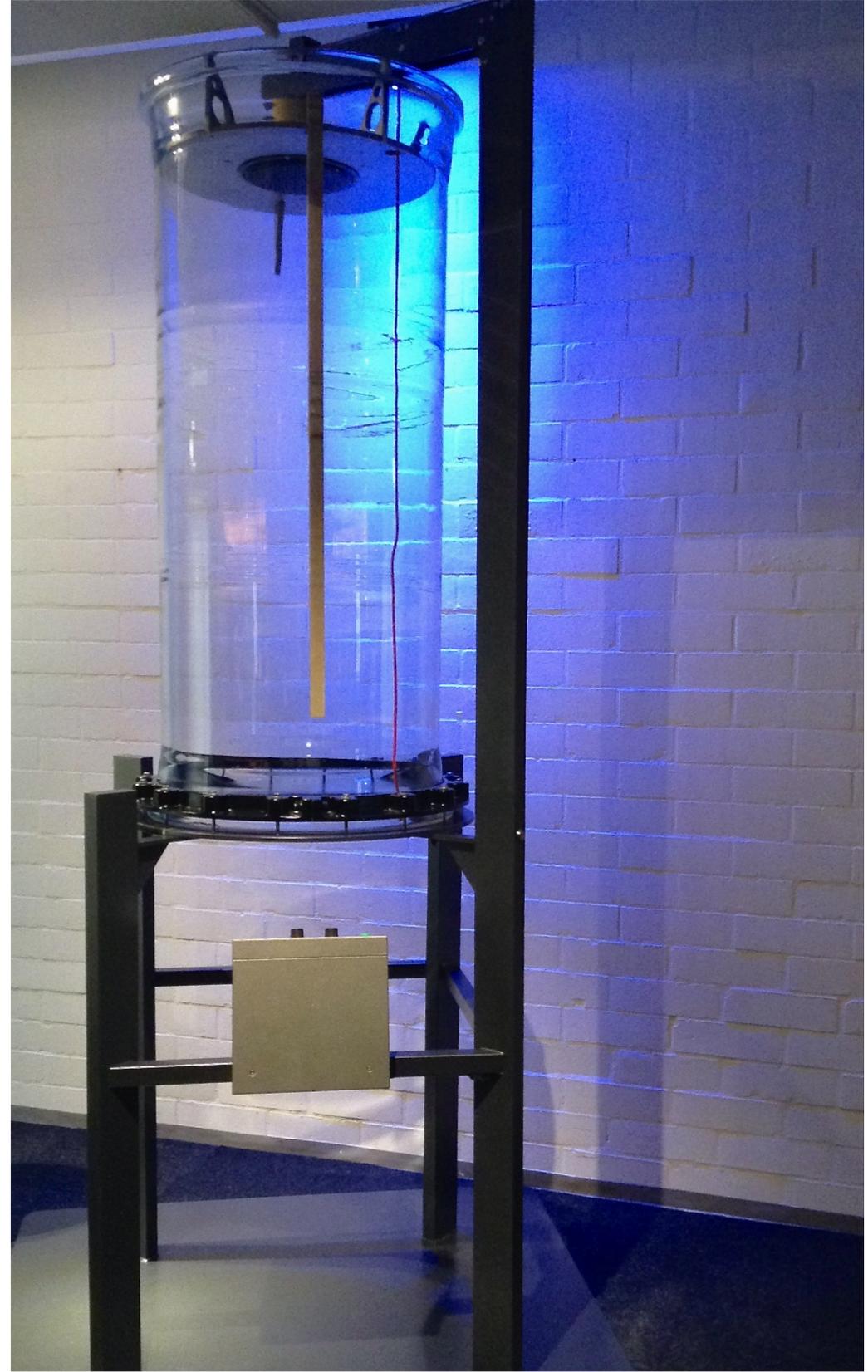
### „Grosses Resonanzrohr“

Die Luft im Glasrohr kann mittels eines im Deckel eingearbeiteten Lautsprechers in Resonanzschwingung versetzt werden (Kap.17). Die Erregerfrequenz kann mit einem Frequenzgenerator verändert werden. Die Eigenfrequenz der Luftsäule wird durch Absenken des Deckels verändert. Tritt wirklich Resonanz ein, so kann das physisch in der Säule erfahren werden.

Die Eigenfrequenzen eines Schwingers (die Frequenzen, mit denen er schwingt ohne äussere Einwirkung) sind bestimmt durch seine Geometrie und durch seine physikalischen Eigenschaften.

Zwinge ich ein System von aussen durch periodische Anregung zum Schwingen, dann wird die Amplitude (grösste Auslenkung) maximal, wenn die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz ist.

Das nennt man dann Resonanz.



## 21. Eimerradio

Die Signale eines Audioverstärkers werden auf einen Lautsprecher mit einem Stift an Stelle der Membran gegeben. Die Schwingungen können nicht gut auf die Luft übertragen werden, weil die Stiftfläche viel zu klein ist.

Legt man eine Platte (Kap.10) auf den Stift, so ändert das grundlegend. Stellt man einen kleinen Becher auf den vibrierenden Stift, so werden vor allem die hohen Töne hörbar. Ersetzt man den kleinen Becher durch einen grossen, so hört man vor allem die tiefen Töne. Die grossen Gefässe haben tiefe Eigenfrequenzen und übertragen diese resonant sehr gut. (Kap.17)

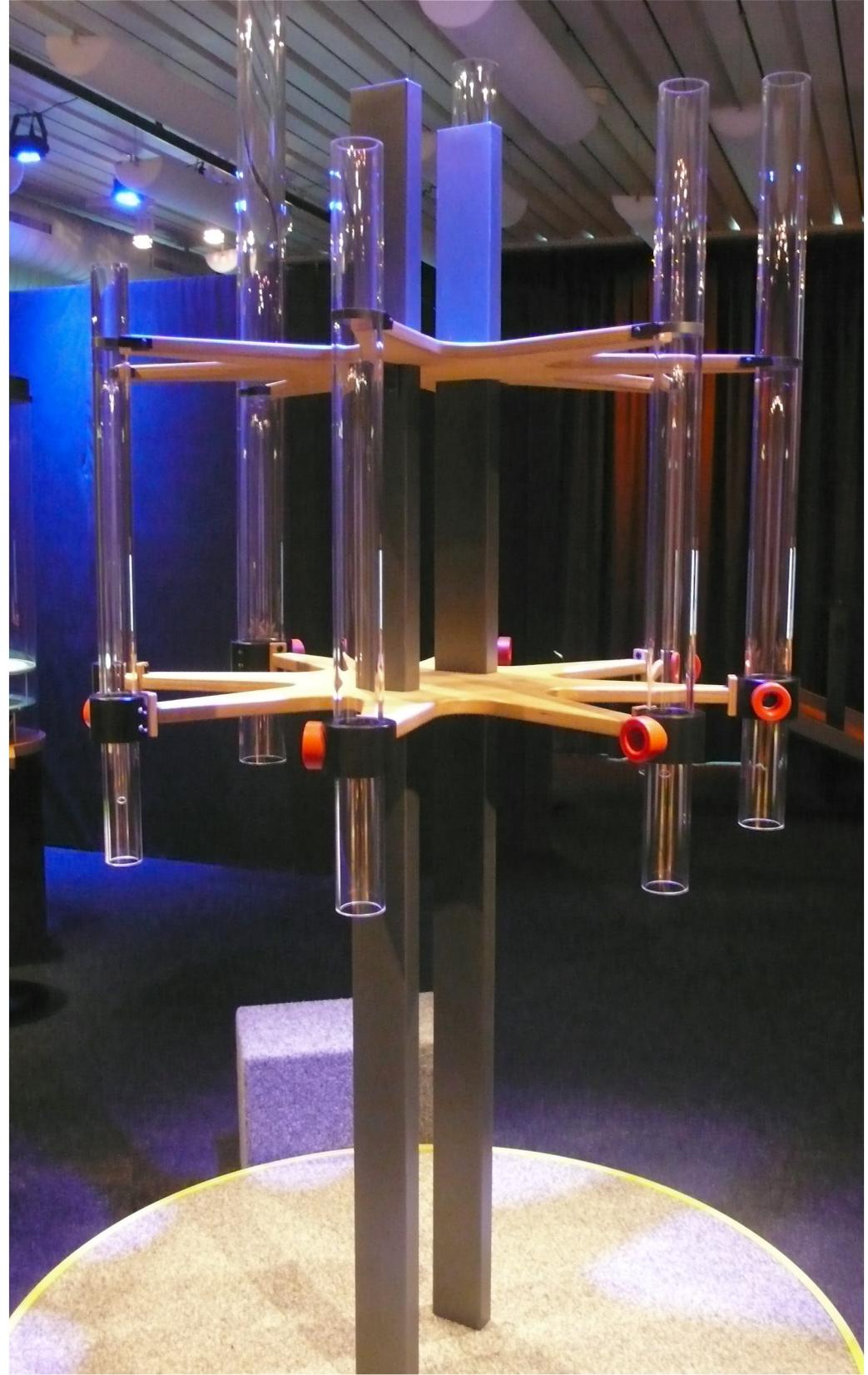


## 22. Hörorgel

Die acht verschieden langen Rohre stellen Frequenzanalysatoren der Umgebungsgeräusche dar.

Bei der roten Rohröffnung hören wir die Töne laut, deren halbe Wellenlänge gerade der Länge des Rohres entspricht. Dieses Exponat zeigt ähnliche Erscheinungen wie die Muscheln beim schallarmen Raum. (Kap.11)

Es handelt sich hier auch um die Umkehrung des Exponates mit den Orgelpfeifen (Kap.8) oder dem Riecke-Rohr (Kap.7). Hier werden nicht Töne in einem Rohr erzeugt, sondern die Töne, die sie selber erzeugen könnten, von der Umgebung eingefangen. Im weitesten Sinne handelt es sich hier wiederum um ein Resonanzphänomen.

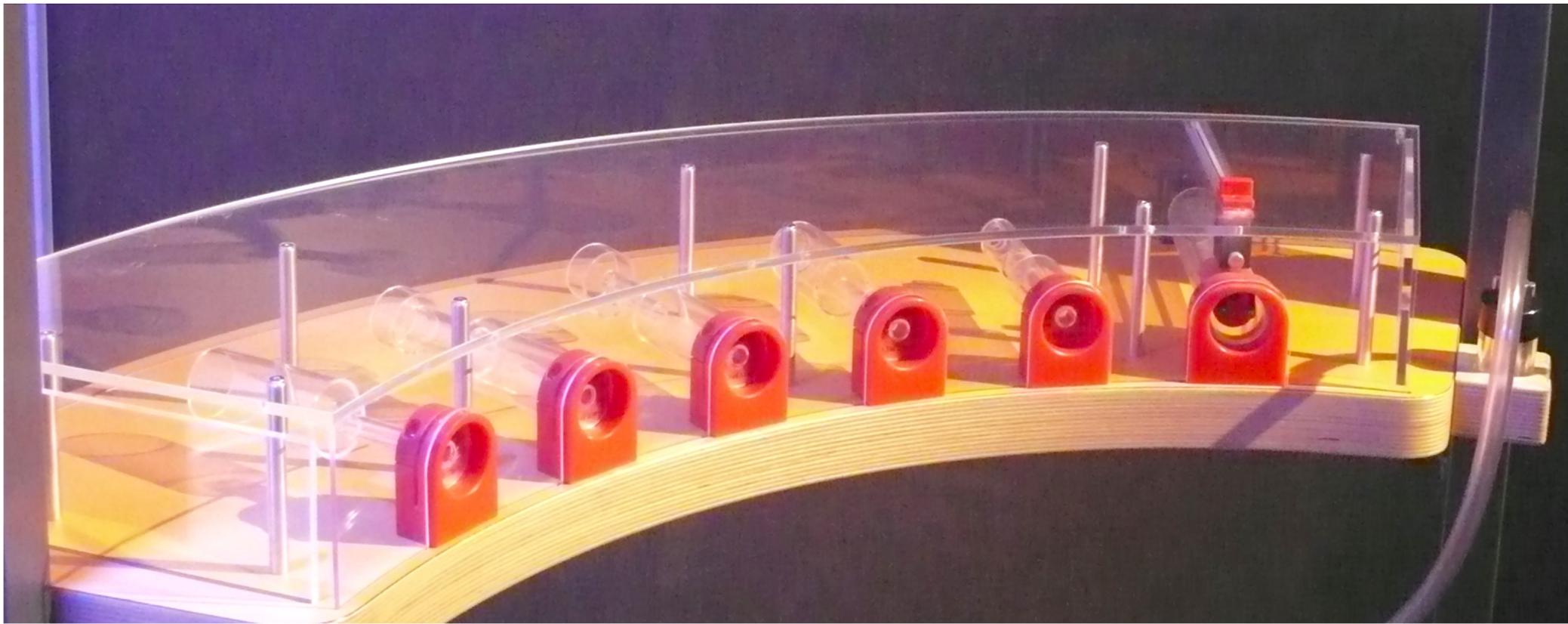


## 23. Vokaltröten

Ähnlich wie bei der Bechermusik (Kap.20) bilden wir die verschiedenen Vokale im Kehlkopf durch Veränderung des Resonanzraumes.

Fünf Resonanzräume wurden so gefertigt, dass beim Bespielen mit einem schnarrenden Geräusch die Vokale a, e, i, o und u zu hören sind.

Das Exponat hat eine grosse Ähnlichkeit mit den Zungenpfeifen mit aufgesetzten Resonanzrohren. (Kap.8)

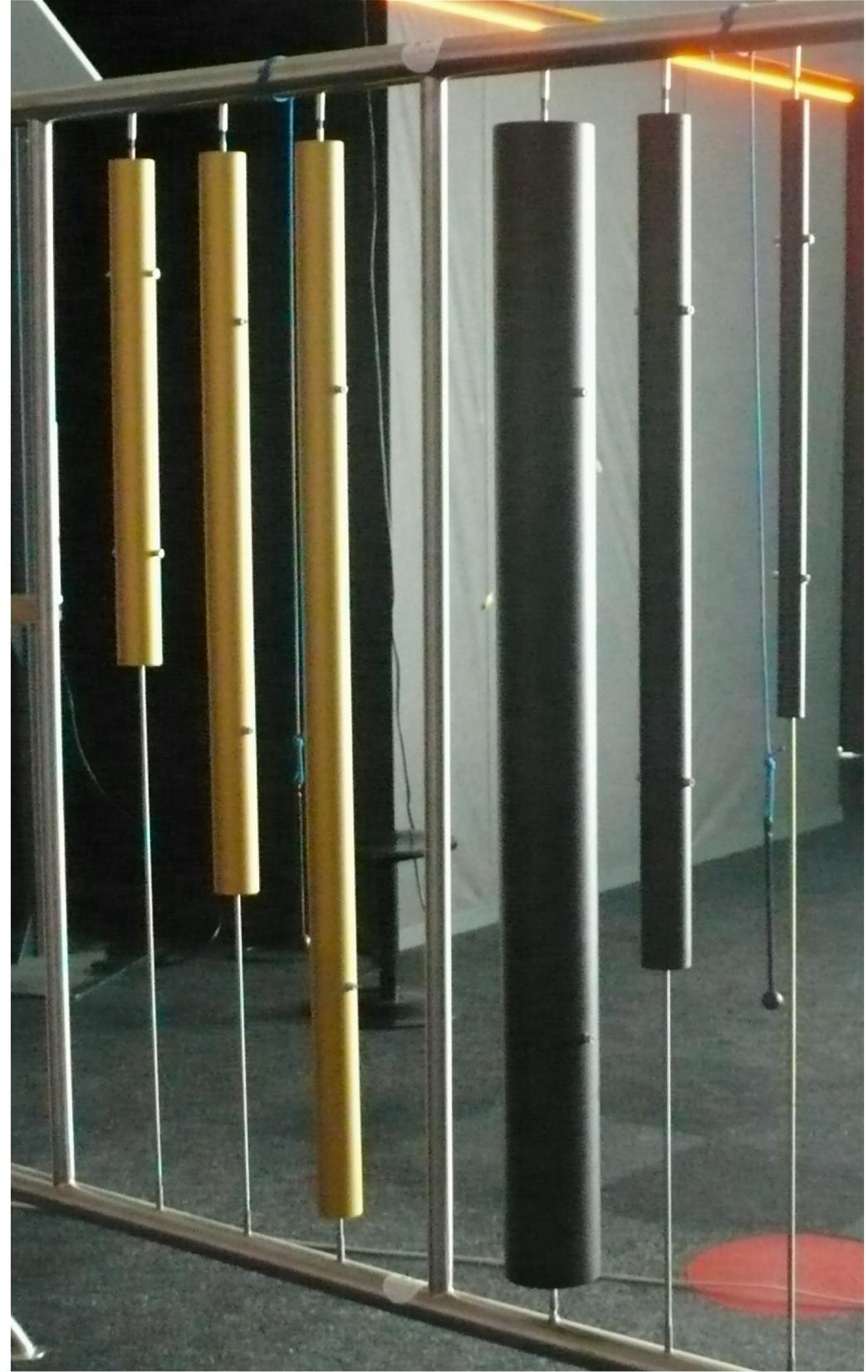


## 24. Röhrenglocken

### „Parameter Glocken“

Das Set von Röhrenglocken zeigt die Abhängigkeit zwischen geometrischer Form und Tonhöhe. Die Berechnung dieser Einflüsse ist recht anspruchsvoll, führt doch die Analyse auf Differentialgleichungen vierter Ordnung.

Zwei gleich lange Rohre mit demselben Aussendurchmesser und Wandstärken, die sich wie 1 : 2 verhalten, liefern Töne, die eine Oktave auseinander liegen. Erstaunlich ist, dass die dickwandige Röhre einen höheren Ton gibt.



## 25. Spezielle Instrumente

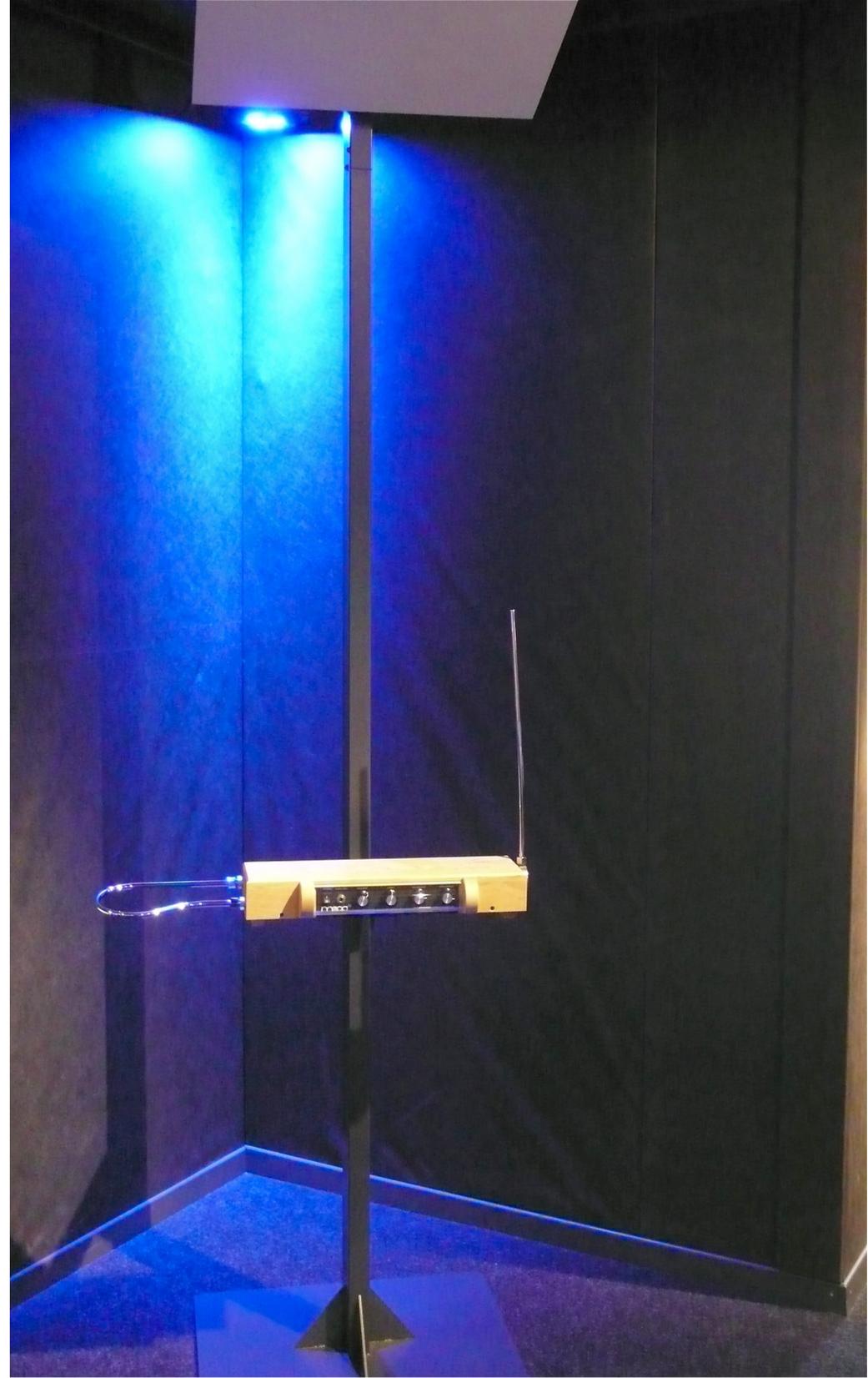
### „Teremin“

Das vom Russen Lew Termen 1920 entwickelte Instrument ist das erste elektronische Musikinstrument. Ein elektromagnetischer Schwingkreis erzeugt Schwingungen im akustischen Bereich. Diese werden auf einen Lautsprecher gegeben. Durch Annäherung einer Hand an die senkrechte Antenne wird der Schwingkreis und somit die Tonhöhe verändert. Ganz analog verändert man die Lautstärke durch Annäherung an die horizontale Antenne.

Siehe auch Kap. 1,2,3

### „Kugelbahnmusik“

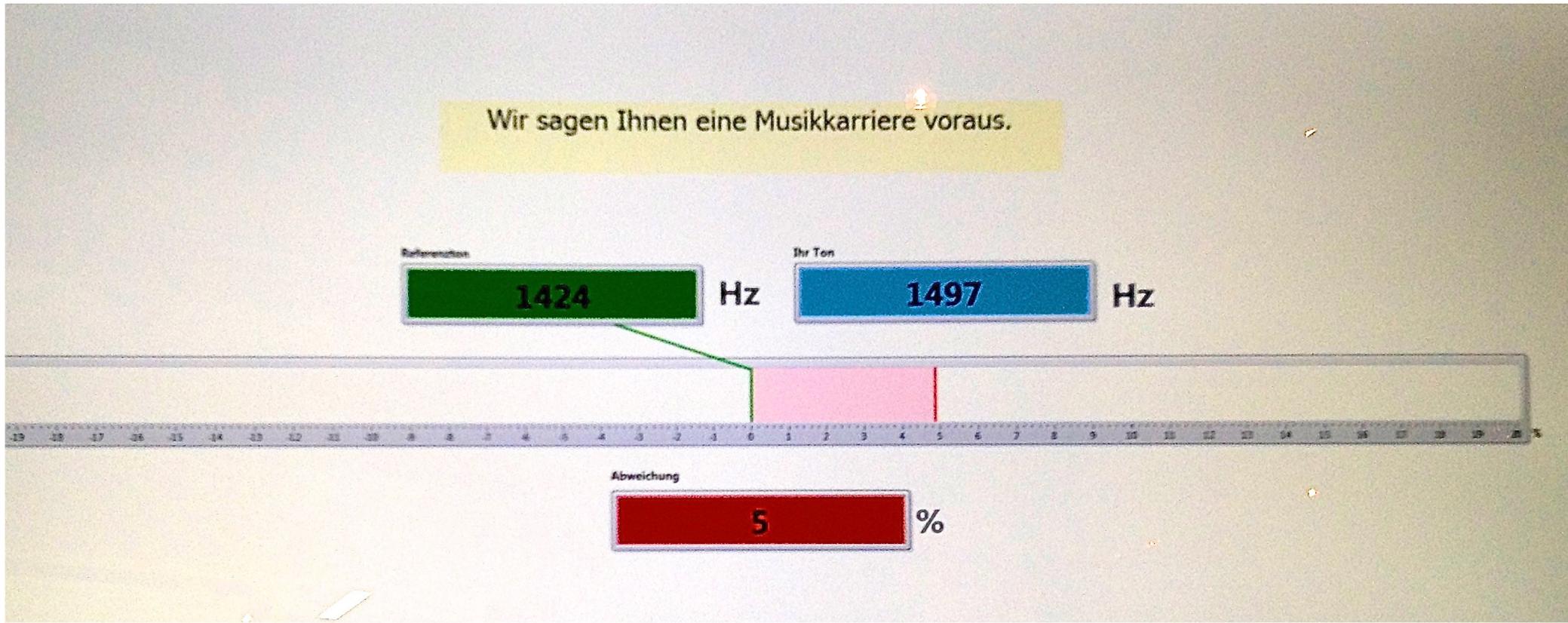
Xylophone werden auf einer schiefen Ebene so platziert, dass eine hinunter-rollende Kugel sie nacheinander anschlägt. So können Lieder zusammengestellt werden.





## 26. Tonememory

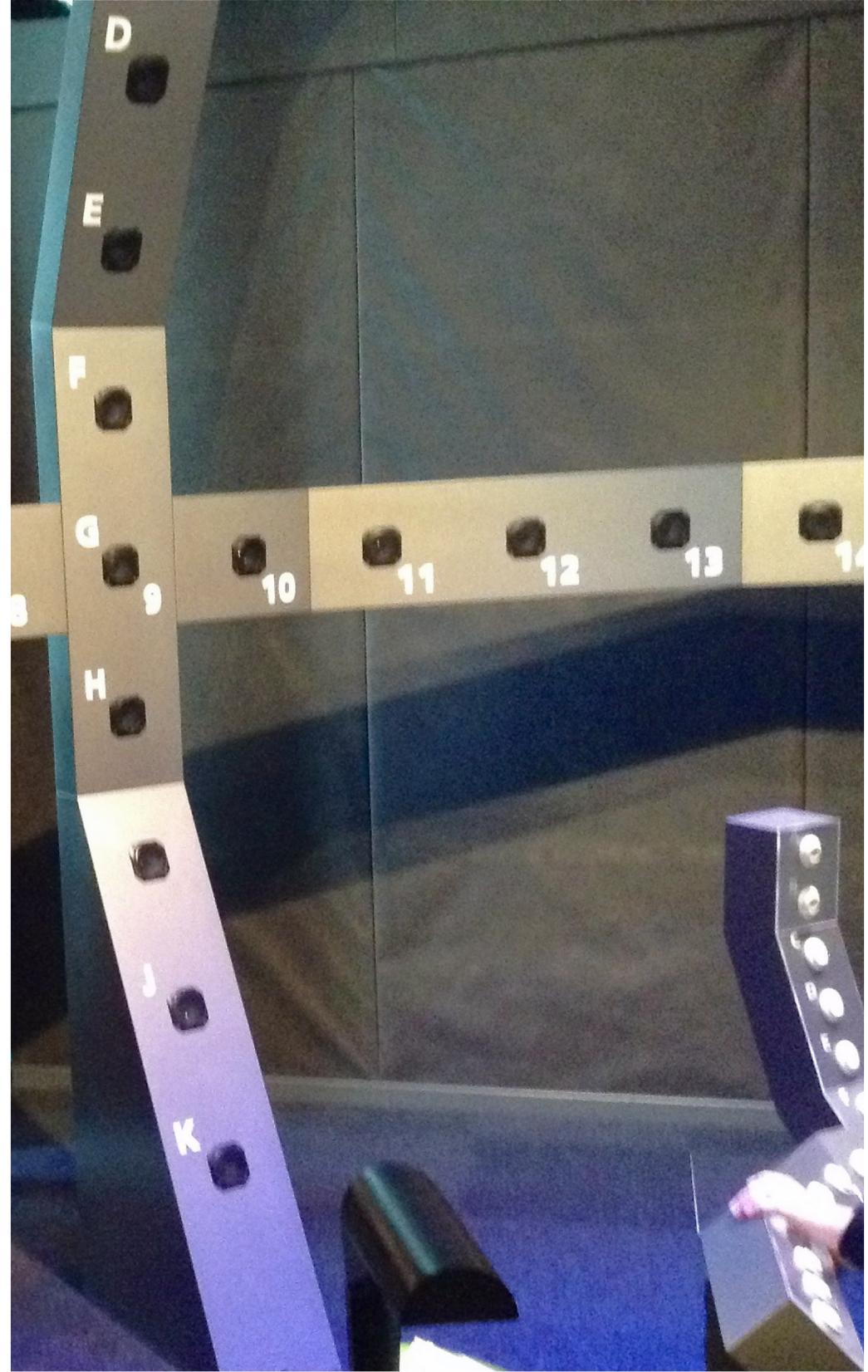
Nach dem Erklngen eines Tones kann durch Einstellung an einem Potentiometer der soeben gehörite Ton mit einem Frequenzgenerator selber wieder eingestellt werden. Die Analyse zeigt, wie gut dies gelungen ist durch Anzeige der absoluten und prozentualen Abweichung.



## 27. Richtungshören

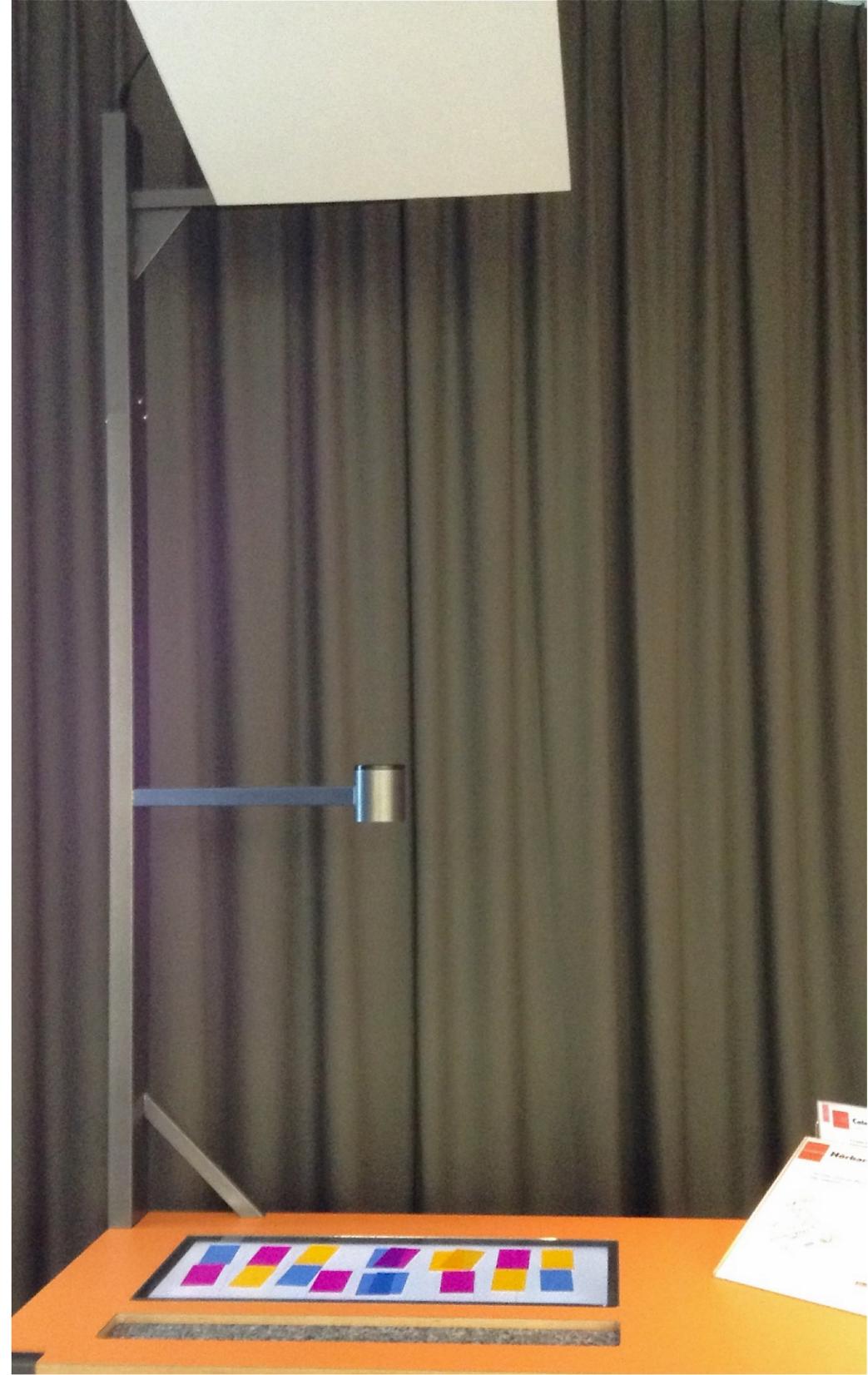
So wie wir auch nur mit zwei Augen Distanzen abschätzen können, gelingt die Ortung einer Schallquelle auch dank unseren beiden Ohren. Die Laufzeitdifferenz der Schallwellen zum rechten und linken Ohr wird vom Hirn in eine Richtung umgewandelt.

So erstaunt es auch wenig, dass Schallquellen horizontal relativ gut geortet werden können und dass die Festlegung einer Schallquelle in der Höhe weniger gut gelingt.



## 28. Hörbare Farben

Der Leuchtschirm wird durch einen Lichtsensor abgetastet und jeder Farbe wird eine Tonfrequenz zugeordnet. Dieses Tonsignal kann dann mit einem Lautsprecher hörbar gemacht werden. Auf diese Art wird jeder Farbe ein Ton zugeordnet. Es ist prinzipiell möglich, Musikstücke zu komponieren.



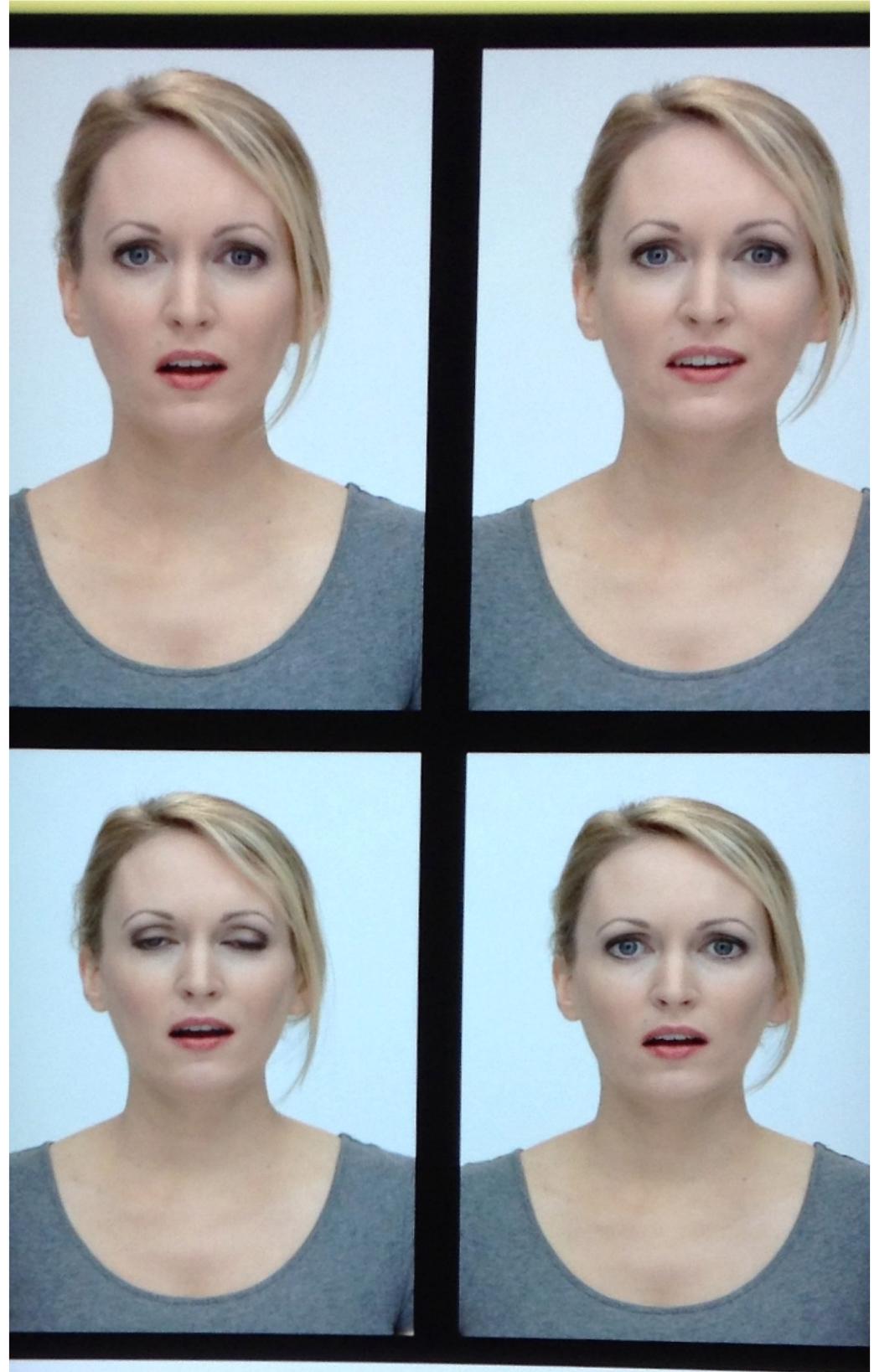
## 29. Mit den Augen hören „Mc. Gurk“

Die Augen hören offensichtlich mit. Die Person sagt bildlich baba, lala, dada und gaga. Das hören wir vermeintlich auch, wenn wir das entsprechende Bild anschauen.

In Wirklichkeit wird nur baba gesagt. Die Augen beeinflussen wesentlich unseren Hörvorgang. Offensichtlich gewichtet unser Gehirn die visuellen Informationen, nämlich die Bewegung der Lippen höher als die akustische Information und „korrigiert“ im Zweifelsfall die Wahrnehmung der Laute.

Mit einer gegen die oberen Schneide-zähne gepressten Unterlippe wie im Film oben rechts kann man kein „ba“ aussprech-en. Wir erkennen die Lippenbewegungen für „fa“ und hören auch „fa“. Wenn die visuellen und akustischen Informationen sehr wider-sprüchlich sind wie im Film unten rechts, hören manche Menschen sogar ganz neue Laute. So wird aus dem Laut „ba“ und der Lippenbewegung „la“ ein „tsa“.

So muss man manchmal die Augen schliessen oder wegschauen und sich ausschliesslich auf sein Gehör konzentrieren.



## 30. Rhythmen

### „Rhythmus-Karussell“

Jedes Musikstück hat eine Abfolge von Grundsschlägen. Diese werden durch eine Betonung einzelner Schläge in Takte aufgeteilt. Die Takte werden durch einen Bruch angegeben. Der Zähler gibt die Anzahl Schläge und der Nenner die Notenwerte an. Ein 3/4 - Takt besteht aus drei Viertelnoten. Die geläufigsten Takte mit den dazugehörigen Betonungen sind:

3/4 – Takt: ● o o , 5/4 - Takt : ● o o ● o ,

4/4 – Takt: ● o o o

Sie sind auf dem Tisch farbig markiert.

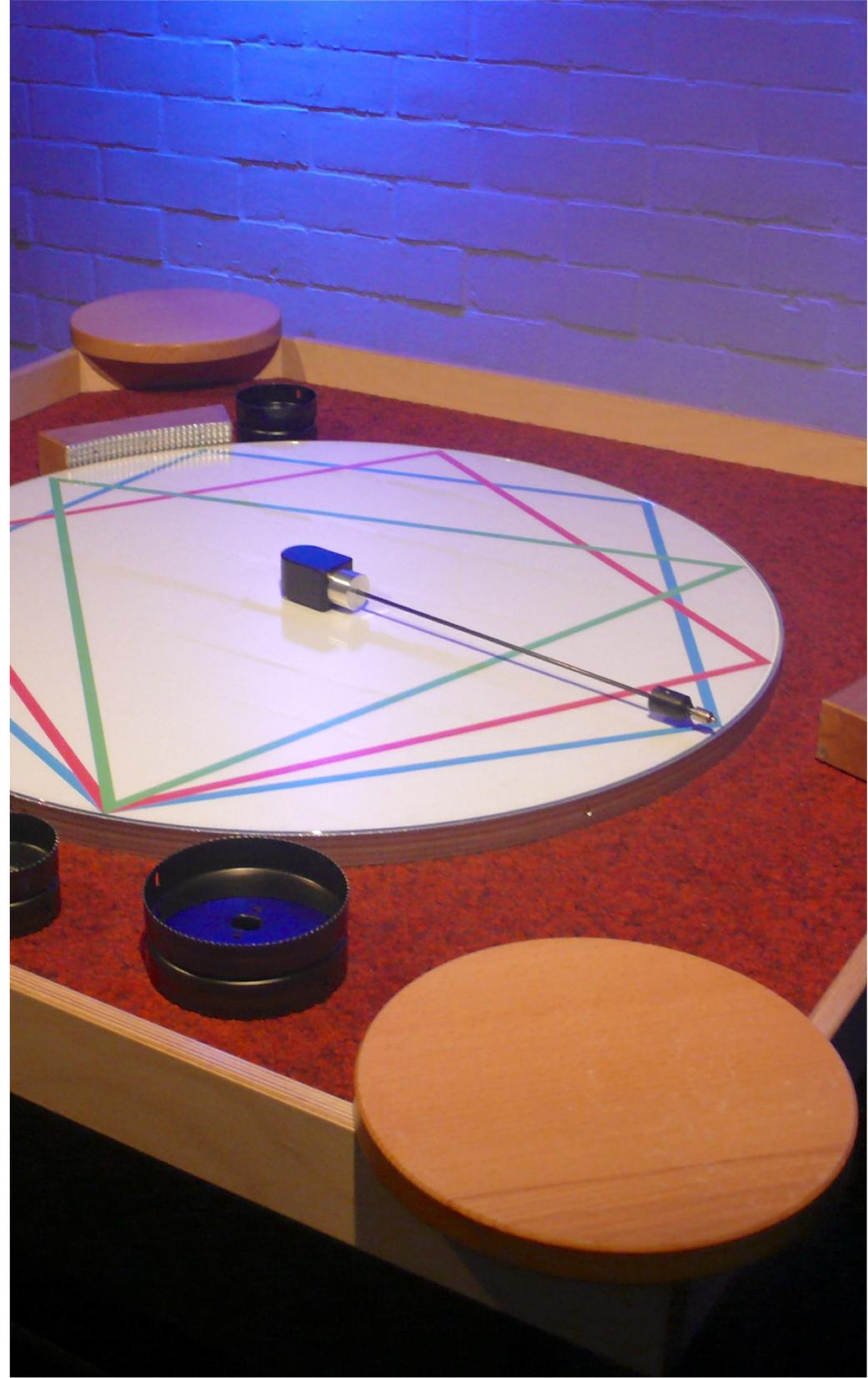
Schläge, die nicht mit den Grundsschlägen zusammenfallen, ergeben den Rhythmus. Hier spielt die Tondauer eine grosse Rolle.

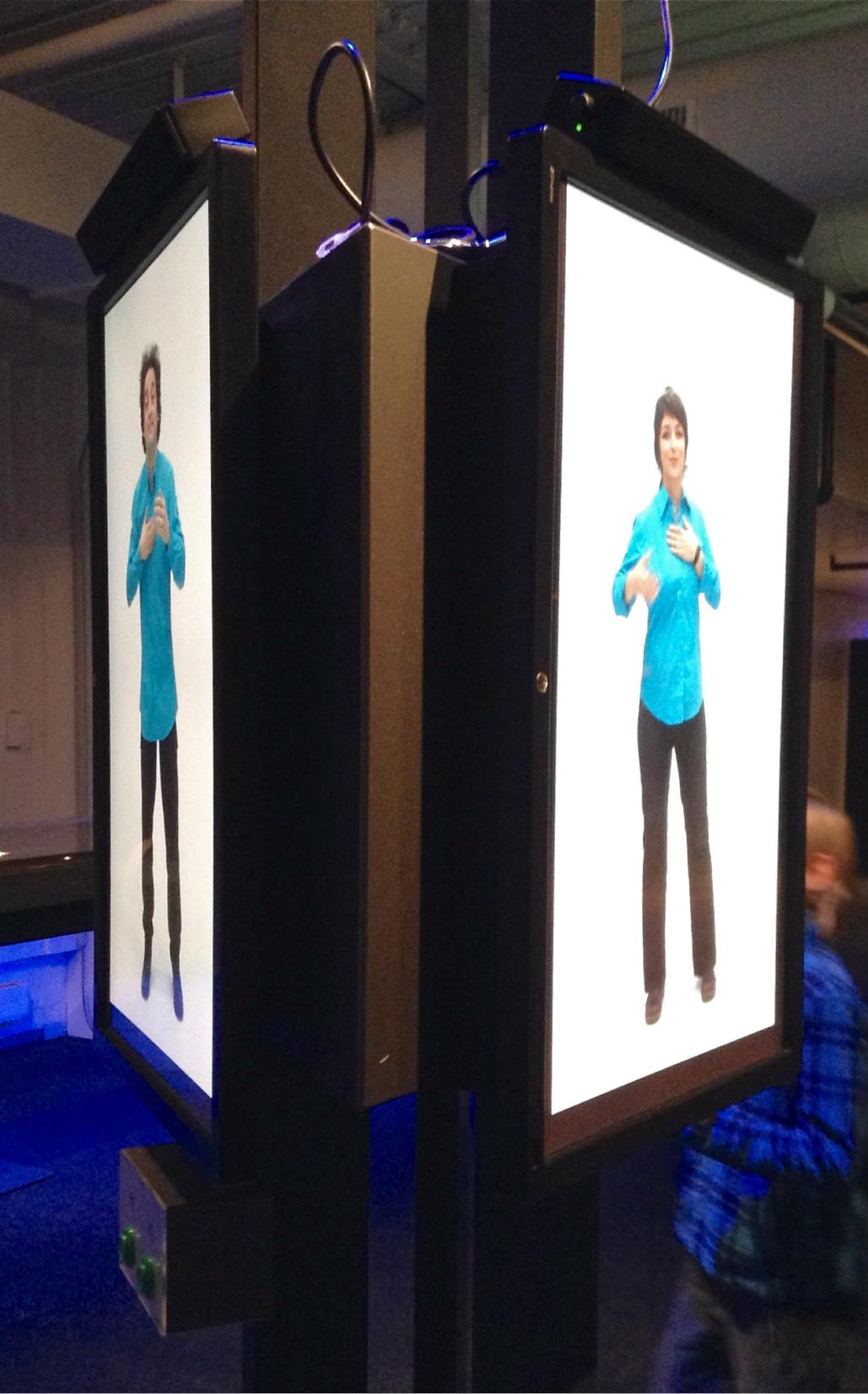
### „Körperklänge“

Drei Personen geben Rhythmen vor durch Klatschen, Schnippen, Klopfen etc. und animieren zum Mitmachen.

### „Trommeltisch“

Vier Personen können gemeinsam an einem Tisch trommeln. Über die Kopfhörer hören sie sich gegenseitig.

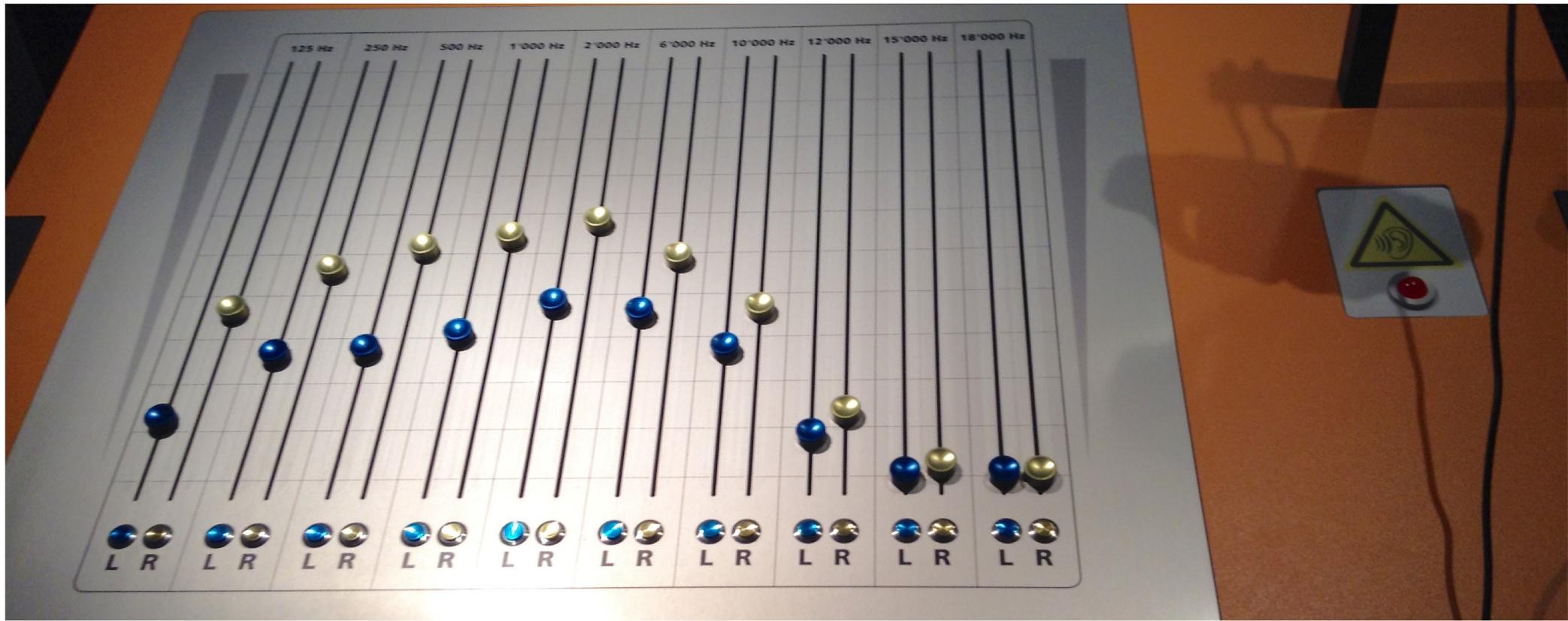




# 31. Hörkurve

Der Mensch kann Töne im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20000 Herz wahrnehmen. Diese Aussage stimmt nur für junge Leute. Mit dem Alter lässt das Hörvermögen nach.. Mit dem Experiment kann das persönliche Hörvermögen für beide Ohren getestet werden.

Es ist sehr erstaunlich, welche kleine Druckänderungen unser Hörorgan (Trommelfell, Steigbügel, Hammer, Amboss und die Cochlea) wahrnehmen kann. Ein Flüsterton erzeugt beim Trommelfell eine Luftschwingung von 1/10 ! Atomdurchmesser und es können Intensitäten in einem Intervall von zwölf Zehnerpotenzen wahrgenommen werden.

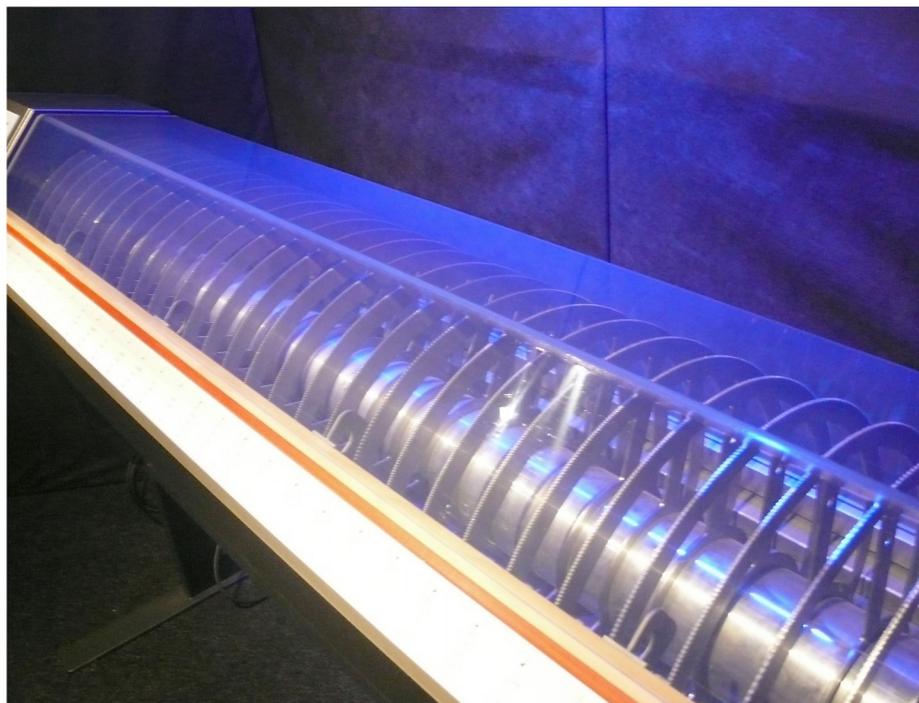






## Projektgruppe

Thorsten Künnemann	Direktor
Andreanszki Judith	Mechanikerin
Bernet Bruno	Elektroniker
Brüchsel Sascha	Elektroniker
Frei Gerhard	Wissenschaftler
Bär Julian	Mechaniker
Keller Rolf	Mechaniker
Miranda Marco	Laborleiter
Neff Barbara	Ausst. Leiterin
Moor Jörg	Leiter Werkstatt
Neuenschwander Jürg	Mechaniker
Petsch Kim	Didaktiker
Rutishauser Andreas	Schreiner
Schaller Wolfgang	Leiter Werkstatt
Teiler Markus	Elektroniker
Venuti Mario	Schreiner
Ziegler Max	Projektleiter,



## **Sonderausstellung Klangwelten 2014/15**

**Projektleitung,  
Berechnungen, Texte. Fotos  
Dr. M. Ziegler**