

Handreichung im Themenkreis 2

zum Thema Schallwellen

zum Modul:
Demonstrationspraktikum 1

bei
Dr. Jürgen Kirstein
Dr. Dirk Schwarzhans
Luzy Krüger M.Sc.

am
Fachbereich Physik
Freien Universität Berlin



Ludwig Schuster und Florian Conrad (Gruppe 1)
09. Februar 2015   

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stehende Wellen	3
2.1	Einleitung	3
2.2	Rijke Rohr	4
2.2.1	Aufbau	4
2.2.2	Funktion	4
2.3	Orgelpfeife	5
2.3.1	Aufbau	5
2.3.2	Funktion	6
3	Auflösungsvermögen	6
3.1	Einleitung	6
3.2	Schallplattenspieler	7
3.2.1	Aufbau	7
3.2.2	Funktion	8
3.3	Ausblick auf die Zukunft des Schallplattenspielers	10

Abbildungsverzeichnis

1	Skizze: Stehende Welle	3
2	Skizze: Rijke-Rohr	4
3	Skizze: Luftstrom	5
4	Skizze: Aufbau einer Orgelpfeife	6
5	Foto: Labium	6
6	Skizze: Aufbau des Joghurt Grammophons	7
7	Abb.: REM-Aufnahme der Abtastnadel auf der Schallplatte	8
8	Skizze: Funktionsweise des Tonabnehmers	9
9	Abb.: REM-Aufnahmen der Abtastnadel in der Spurrille	9

Literatur

- [Eul00] EULER, Manfred: Selbstorganisation, Strukturbildung und Wahrnehmung – Versuche mit dem singenden Rohr. In: *Biologie in unserer Zeit* 30. Jahrgang Nr. 1 (2000)
- [Kre11] KRESSIERER, Sepp: *Rijke Rohr (Münchhausenrohr)*. <http://www.av.ph.tum.de/Experiment/1000/Beschreibungen/ver1703.php>.
Version: 2011, Abruf: 06.02.2015
- [Neu05] NEUMANN, Richard: *Orgeln und Flöten*. Vortrag im Rahmen des Ausbildungsseminars “Physik der Musikinstrumente” Prof. Maier, Dr. Ulrich Schwarz, 2005

1 Einleitung

Um das Thema “Schall” etwas näher zu betrachten, wurden einige anschauliche Experimente ausgesucht.

Zum Einen wird das Rijke-Rohr, ein Phänomen aus der Thermoakustik, gezeigt. Hiermit wird das Phänomen von stehenden Wellen in Rohren erläutert. Das Interessante hierbei ist, dass die Funktionsweise noch nicht vollständig untersucht ist. Es gibt einige Erklärungsansätze, von denen einer ausgesucht wurde, ihn näher zu betrachten. Das Rijke-Rohr zeigt etwas Unerwartetes, weswegen es ein spannendes Experiment darstellt. Eine zweite Art der Schallerzeugung wird anhand des Beispiels einer Labialpfeife in einer Orgel gezeigt. Der Unterschied der beiden “Rohre” in Puncto Erzeugung von Schallwellen wird hierbei verdeutlicht.

Weiterhin wird Anhand eines Schallplattenspielers, das Auflösungsvermögen für das Abtasten des Spurrillenmusters einer Schallplatte gezeigt. Hier wird genauer darauf eingegangen, wie die Informationen auf der Platte gespeichert sind und wie diese ausgelesen werden, sodass wir sie hören können. Außerdem wird gezeigt, dass für die Schallerzeugung im Plattenspieler nur die Nadel entscheidend ist und ein Lautsprecher nur der Verstärkung dient.

2 Stehende Wellen

Eine stehende Welle, ist eine Welle, deren Amplitude an bestimmten Stellen Null bleibt. Sie kann als Überlagerung

zweier sich gegenläufig fortbewegender Wellen mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude angesehen werden. Die gegenläufigen Wellen können einerseits von verschiedenen Erregern erzeugt werden, oder aber sie entstehen dadurch, dass eine alleinige Welle an z.B. einem geschlossenen Ende eines Rohres reflektiert wird. Die beiden Schallwellen bilden Knoten und Bäuche. Es bildet sich eine stehende Welle innerhalb des Rohres aus.

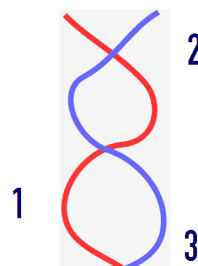


Abbildung 1 : Skizze einer stehenden Welle durch Reflektion in einem Rohr mit der Grundwelle (1), dem Rohr (2) und der resultierenden Welle (3)

2.1 Einleitung

Das Rijke Rohr ist ein Thermoakustischer Resonator. Das heißt, akustische Phänomene können mit Hilfe thermischer Voränge gezeigt werden, es existiert also ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Schall (wellen).

Den Namen Münchhausenrohr trägt es jedoch nicht zu unrecht. Bekannt ist die Geschichte von Münchhausen, in der die Töne im Jagdhorn gefroren waren und im Wirtshaus wieder auftauten, so

dass dann die lange zuvor geblasenen Töne erschallten. Beim Rijke-Rohr gibt es einen ähnlichen Effekt.

Die Tonerzeugung im Rijke-Rohr kann mit der Tonerzeugung in einer Orgelpfeife verglichen werden, da dort ähnliche Prozesse von statten gehen.

2.2 Rijke Rohr

2.2.1 Aufbau

Aufgebaut wird ein Glasrohr, welches über einem Bunsenbrenner mit Hilfe von Stativmaterial fixiert wird. Im Glasrohr befindet sich ein Metallgitter, welches durch den Brenner erhitzt wird.



Abbildung 2 : Skizze des Aufbaus des Rijke-Rohrs mit Bunsenbrenner(1) zum Erhitzen des Metallgitters (2) im aufgehängten Glasrohr (3)

Ein **Glasrohr** (ca. 1 m lang, 7cm Durchmesser) wird, wie in Abb. 2 angedeutet, senkrecht an einem **Stativ** mit zwei **Stativklammern** aufgehängt. In dem Rohr befindet sich auf etwa $\frac{1}{4}$ der Höhe ein **Metallgitter**(hier: ein Ge-

flecht aus zusammengeknäultem Metalldraht). Dieses Metallgitter wird durch einen **Bunsenbrenner**(LEYBOLD 303 11) erhitzt bis es anfängt zu glühen. Anschließend wird der Bunsenbrenner entfernt und ausgeschaltet.

2.2.2 Funktion

Bei der Durchführung des Versuches können zwei Töne festgestellt werden. Der erste Ton entsteht beim Erhitzen des Gitters. Es ist ein hoher, je nach Rohrdurchmesser fast pfeifender Ton. Er entsteht durch den Luftstrom, der durch das erhitzte Gitter und den dadurch resultierenden Kamineffekt. Luft wird unter dem Gitter nach oben gezogen, da die Luft über dem Gitter erhitzt wird und eine geringere Dichte hat. Strömt nun Luft nach oben und demnach auch oben aus dem Rohr hinaus, so entsteht unter dem Gitter ein Unterdruck, welcher Luft von unten nachströmen lässt.

Der zweite Ton entsteht, nachdem der Brenner unter dem Gitter weggenommen wurde. Auf diesem Ton liegt auch das Hauptaugenmerk des Versuches. Die Luft im Rohr ist durch die Restwärme des Gitters über eben Jenem weiter erhitzt. Die erwärmte Luft über dem Heizgitter steigt im Rohr auf und es entsteht eine senkrechte Strömung.³ Durch das Heizgitter Wenn das Heizgitter im unteren Viertel des Rohres liegt, dann sind Wärmefreisetzungs-schwankungen und akustische Druckschwankungen in Phase ,daher wird die Eigenfrequenz der Luftsäule im Rohr wird angeregt. Dadurch entsteht der Ton. Dabei werden

alle Frequenzen angeboten; es entsteht ein Rauschen. Nun wird aber nur eine einzige Frequenz verstärkt und die Anderen verschwinden, da sie nicht weiter aufgebaut werden. Dies ist die Resonanzfrequenz oder Eigenfrequenz der Luftsäule im Rohr. Am stärksten gehört wird daher die eigentliche Resonanzfrequenz. Die Wellen dieser Frequenz schreiten im Rohr fort zum oberen, offenen Ende und werden an diesem reflektiert, wodurch eine stehende Welle entsteht. (vgl. [Eul00])

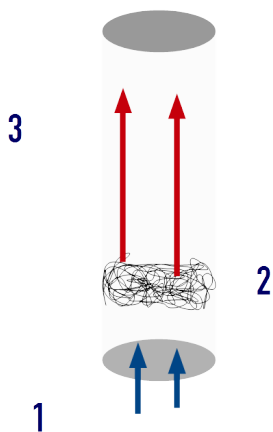


Abbildung 3 : Skizze des Luftstromes im Rijke-Rohr mit dem Kaltluftstrom (1) dem noch heißen Metallgitters (2) und dem heißen Luftstrom (3)

Es bleibt zu erörtern, warum die Wellen am offenen Ende der Luftsäule reflektiert werden. Intuitiv gesagt würde eine Reflektion einer Welle nur bei einem mindestens einseitig geschlossenem Rohr entstehen.. Dazu gibt es mehrere Erklärungen, eine davon soll hier näher beschrieben werden (vgl.[Kre11]). Eine der Erklärungen ist die, dass die erhitz-

te Luft, wenn sie das Ende des Rohres erreicht, auf die viel kältere Luft des Raumes trifft. Die erhitzte Luft hat eine geringere Dichte als die sie umgebende Luft ,dadurch hat die erhitzte Luft einen starken Auftrieb und wird von der Öffnung des Rohres “weg gesogen”. Am Ende des Rohres entsteht ein Unterdruck und die (umgebene kältere) Luft gleicht den Unterdruck aus. Sie strömt jetzt in das Innere des Rohres und trägt zugleich die Schallwelle zurück in das Rohr.

2.3 Orgelpfeife

Orgelpfeifen finden wir in jeder Kirche, die Verbreitung des Instrumentes ist weltweit gegeben. Das Funktionsprinzip besteht seit Jahrhunderten, die ältesten Orgeln stammen aus dem 15. Jahrhundert. Im Laufe der Jahre wurden die Orgeln zwar immer wieder verbessert, modernisiert und teilweise mit Elektronik versehen, das Prinzip der Schall- und damit der Tonerzeugung bleibt jedoch über die Jahrhunderte das Gleiche.

Im Vergleich zum Rijke-Rohr wird gezeigt, wie die Tonerzeugung bei einer Orgelpfeife funktioniert. Diese stellt ein einseitig geschlossenes Rohr dar.

2.3.1 Aufbau

Ein funktionierendes Modell einer Orgelpfeife (Labialpfeife) aus der Sammlung (LEYBOLD 412 32) wird demonstriert und Anhand dieses Modelles erklärt wie die Tonerzeugung in einer Orgel funktioniert.

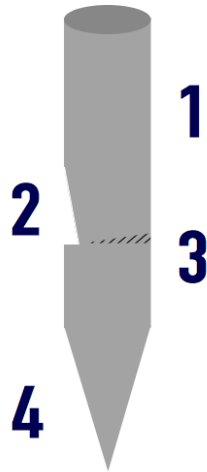


Abbildung 4 : Skizze des Aufbaus einer Orgelpfeife (Labialpfeife) mit dem Pfeifenkörper (1), dem Labium zur Erzeugung der Schwingung des Luftstroms (2), dem Kern (3) zur Tonerzeugung und dem Pfeifenfuß (4)

2.3.2 Funktion

In der Orgelpfeife (hier am Beispiel einer Labialpfeife wie in Abb. 4 zu sehen) wird durch einen Blasebalg ein Überdruck erzeugt. Dieser lässt im Kernspalt einen Luftstrahl entstehen, der den Mundraum durchquert. Dann trifft er auf das Labium. Das Labium ist eine sich in der Pfeife befindende schmale Kante. Dieses Labium dient dazu, den einströmenden Luftstrom zwischen beiden Außenseiten des Labiums hin und her Pendeln zu lassen um so Rückkopplungseffekte geschehen zu lassen, welche den Pfeifenkörper zu Schwingungen anregt. Wie beim Rijke-Rohr wird die Eigenfrequenz verstärkt. Sollte in der Pfeife bereits ein Ton klin-

gen (zum Beispiel in Mitten eines gespielten Stückes) so wird die Schwingung des vorhandenen Tones verstärkt. (vgl. [Neu05])

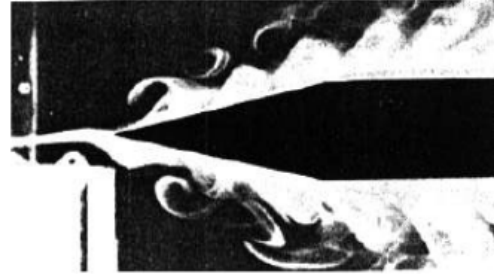


Abbildung 5 : Fotoaufnahme eines Labiums, auf welches ein Luftstrom auftrifft (vgl. [Neu05])

3 Auflösungsvermögen des Abtastvorgangs einer Schallplatte

Anhand des Schallplattenspielers und einer dazugehörigen Schallplatte wird das Abtastvermögen der Nadel gezeigt und erläutert. Beim Plattenspieler werden die Töne erzeugt, indem eine sehr feine Nadel die Spurrillen der Schallplatte abtastet und in Schwingung versetzt wird. Mithilfe eines Resonanzkörpers wird diese Schwingung verstärkt und als Ton ausgegeben. Das Funktionsprinzip ist hierbei bis heute das gleiche geblieben.

3.1 Einleitung

Das Prinzip des Schallplattenspielers ist bereits lange bekannt (die ersten Plattenspieler gab es um ca. 1880) und wurde im Detail vielfach optimiert. Grundsätzlich aber wird immer noch

ein Abtastnadel über eine unebene Rille gezogen und dabei seitlich ausgelenkt. Die Geschwindigkeit und die Auslenkung der Nadel durch die Rille führen dazu dass die Nadel zu Schwingungen angeregt wird, die dem Schallsignal entsprechend, welches auf der Platte gespeichert ist.

Schallplattenspieler lassen sich für Experimente sehr gut verwenden, da die Rückkopplung von manipulativen Eingriff in die Rotation der Platte und dem direkten Hören der Auswirkung auf den Schall einen intuitiven Zugang zum Funktionsprinzip gibt. Mit den Mechanismen die bei einem Schallplattenspieler wirken lassen sich viele Dinge in der Physik zeigen.

3.2 Schallplattenspieler

Im Experiment wird auf das Auflösungsvermögen eingegangen. Die Saphir-Nadel des Tonabnehmers ist sehr fein und aufgrund des Materials sehr genau geformt. Genaue Angaben zur Breite einer Saphirnadel fehlen uns leider, aber Anhand der ungefähren Breite einer normalen Spurrille einer Schallplatte (ca. $40\ \mu\text{m}$) lässt sich vorhersagen, dass eine Saphir-Nadel dünner sein muss als eben diese Angabe. Nun lässt sich schon mit einfachen Mitteln zeigen, dass schon eine simple Nähnadel (ca. $0,021\ \text{mm}$ Breite an der Spitze) mit einem passenden Resonanzkörpers die Musik auf einer Schallplatte hörbar machen.

3.2.1 Aufbau

Über dem **Schallplattenspieler** (im Prinzip eine Schallplatte mit rotierendem Tisch) wird frei hängend ein **Plastikbecher** so mit einem **Stativ** positioniert, dass die im Boden des Bechers steckende **Nadel** ruhig auf der Platte zum aufliegen kommt. Nun wird der Plattenspieler eingeschaltet.

Nach Durchführung des Experimentes mit dem Becher, wird der Plattenspieler ordnungsgemäß betrieben. Zum Vergleich des Klangbildes, wird das Stativ mit dem Becher entfernt und der Plattenspieler mit dem eingebauten Tonabnehmer und dem vorgesehenem Lautsprecher betrieben. Je nach Gruppengröße und Grundgeräusch kann zusätzlich der Lautsprecher wieder entfernt werden und die minimal Resonanz im Tonabnehmer gehört werden.

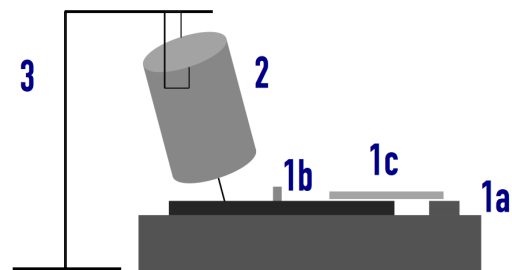


Abbildung 6 : Skizze des Aufbaus: Der Schallplattenspieler (1a) mit Tonarm und Tonabnehmer (1b) sowie dem Plattenteller (1c) wird regulär betrieben. Zusätzlich wird mit einem Stativ (3) ein Plastikbecher mit einer Nadel im Boden (2) über der Schallplatte frei hängend fixiert.

3.2.2 Funktion

Um zu verstehen, wieso schon der Plastikbecher mit einer Nadel ausreicht um die Schallplatte wiederzugeben und warum das anders klingt, als mit dem Tonabnehmer, muss die Funktion des Abtastens näher erläutert werden.

Die Abtastnadel des Tonabnehmers wird durch die Drehung der Schallplatte durch die feinen Spurrillen der Schallplatte gezogen. In 7 wird mittels eines eingefärbten Rasterelektronenmikroskop Bild gezeigt, wie das prinzipiell aussieht.



Abbildung 7 : Aufnahme einer Schallplatte mit Abtastnadel während der Wiedergabe. Eingefärbtes Bild eines Rasterelektronenmikroskop (REM). [Quelle: Science Photo Library]

Die Nadel wird dabei von den unebenen Spurrillenwänden ausgelenkt und fängt an zu schwingen. Diese Schwingungen werden in elektrische Signale umgewandelt. Eine Möglichkeit wie die Schwingung in elektrische Signale umgesetzt wird, ist in Abb. 8 gezeigt. Diese Art der Umsetzung wird "Moving Magnet" oder Kurz "MM" genannt, weil hier ein Permanentmagnet in Spu-

len bewegt wird und somit Strom erzeugt. Die Erzeugung des Stromes geschieht hierbei durch Induktion. Wenn ein Magnet in einer Spule bewegt wird, wird durch die induzierte Bewegung der Elektronen in der Spule Strom erzeugt. Es gibt auch den umgekehrten Fall, dass die Spulen (engl. Coil) bewegt werden. Das wird dann "Moving Coil" genannt oder kurz "MC". Dies sind zwei sehr verbreitete Varianten, doch es gibt auch noch weitere Varianten, in denen z.B. Piezo-Elemente benutzt werden. Weiterhin gibt es von jeder Variante zusätzlich noch sehr viele verschiedene Bauweisen. Alle Bauweisen verfolgen das Ziel, dass die Nadel mit möglichst wenig Druck durch die Rille bewegt wird (damit sowohl das Material der Nadel als auch das der Platte geschont wird), und trotzdem alle Schwingungen in ein Signal übertragen werden. Wie in Abbildung 8 gezeigt, gibt es ein rechtes, sowie ein linkes Signal beim Abtasten der Schallplatte. Diese Signale kommen dadurch zustande, dass beim Fräsen der Platte (im Herstellungsprozess) die Spurrille moduliert wird. Ziel ist es, zwei voneinander unabhängige Signale zu erhalten, die sich gegenseitig nicht interferieren. Beim Herstellen ist der Schreiber (hiermit wird als Rillenmuster erzeugt) in der Lage, den Stichel in zwei voneinander unabhängigen Bewegungsachsen zulenken und zu beschleunigen; diese stehen genau im Winkel von 90° zueinander und sind um jeweils 45° gegen die Oberfläche des Tonträgers angewinkelt. Die Modulationsachsen stehen demnach senkrecht auf den Rillenseiten.

Jede der beiden Modulationsrichtungen hat somit eine der Rillenseiten als Modulationsebene zur Verfügung.¹ Jede der beiden Bewegungsrichtungen entspricht dabei einem Kanal des erwünschten Stereosignals. Beide Kanäle zusammen ergeben eben Dieses. Beim Betreiben der Platte mit dem Plattenspieler fährt nun (in diesem Fall) die Nadel, welche am Permanentmagneten befestigt ist über beide Kanäle der Spurrille gleichzeitig. Sie schwingt dabei nicht einfach von rechts nach links und umgekehrt, sondern macht beim Entlangfahren ebenfalls eine Bewegung im 45° Winkel zur Seite. Dadurch stört der eine Kanal den anderen nicht und es entsteht ein klares Schallsignal.

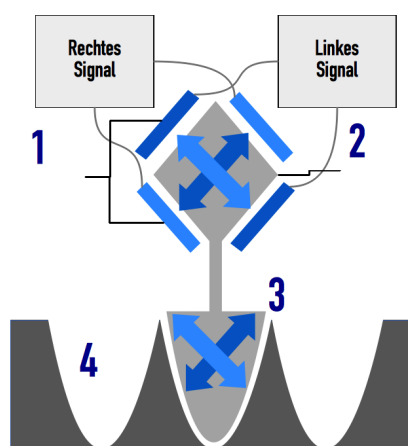
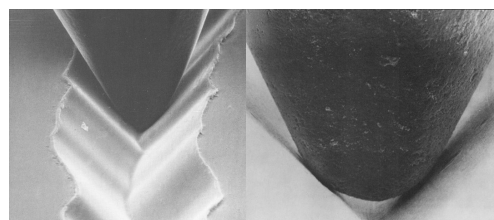


Abbildung 8 : Der Aufbau eines “Moving Magnet” (MM) Tonabnehmer. Die Nadel (3) ist fest mit einem Permanentmagneten (2) verbunden, der sich in Spulen (1) bewegt. Beim entlangfahren der Spurrillen in der Schallplatte (4) wird die Nadel durch die Oberfläche der Rille bewegt. Dadurch wird je nach Bewegungsrichtung Strom in einem der beiden Spulenpaaren induziert.

Die Klangliche Veränderung vom Lautsprecher zum Plastikbecher begründet sich in der Auflösung. Also dem Abtastvermögen der Nadel. Denn an den Tonabnehmer eines Schallplattenspielers ist eigentlich keine Nadel aus Metall wie man intuitiv annehmen könnte, sondern eine Spitze aus Diamant (meistens Saphir). Die Nähndadel aus Metall klingt also vor allem deswegen so anders, weil sie kaum in die Rillen eindringen kann und somit nur einen Bruchteil der Bewegung mitmachen kann. Des weiteren ist die Nadel trotz der frei schwingenden Lagerung im Vergleich zur Saphirspitze des Tonabnehmers fest. In Abb. 9 ist, wieder mit einem REM, gezeigt, wie die Saphirspitze in der Rille liegt (Abb. 8 a)) wo die Auflagepunkte sind (Abb. 8 b)).



a: Abtastnadel in der Spur. **b:** Auflage d. Nadel in der Spur.

¹ Quelle:<http://www.sst-ffm.de/haeufigeantworten>

Abbildung 9 : *Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) der Nadel in der Spurrille. [Quelle: Stanton Magnetics USA]*

3.3 Ausblick auf die Zukunft des Schallplattenspielers

Ist die Schallplatte tot? Nein. Die Physikerin Amanda Ghassaei hat 2012² Schallplatten mit einem 3D-Drucker hergestellt und 2013³ mit einem Laser Fräser. Ziel dieser Versuche war die Auflösung von 3D-Druckern zu erproben. Der Grund warum sie das auf diese Weise probierte ist der, dass Schallplatten wieder in Mode kommen. Einige Musikverlage stellen mittlerweile wieder Schallplatten unterschiedlicher Interpreten her und geben zusätzlich Downloadcodes beim Kauf aus um die Musik auch in digitaler Form zu haben, zum Beispiel zum Mitnehmen für den MP3-

Player für unterwegs. Das Problem hierbei ist, dass die Maschinen, die schon in den 70er Jahren Schallplatten pressten gleichzeitig diejenigen sind, mit denen heutige Platten gepresst werden. Die Maschinen sind alt, es wurden keine neuen mehr gebaut, da die Schallplatte irgendwann aus der Mode kam. Früher oder später werden diese Maschinen jedoch unbrauchbar (durch Verschleiß), da es aber keine neuen Maschinen dafür gibt, muss man sich anders behelfen. Auf diesem Hintergrund fußt die Idee, Schallplatten mittels 3D-Drucker, sowie einem Laser-Fräsgesetz herzustellen. Ebenfalls wurde durch das Prinzip des Abtastens mit sehr feinen Strukturen (Nadel) die Funktion des Rasterelektronenmikroskops (REM) inspiriert. Hierbei wird ein Elektronenstrahl maximal gebündelt und auf einen Punkt fokussiert. Folglich wird mit einer sehr dünnen "Spitze" ein Raster abgefahren und die Informationen gesammelt.

²http://www.amandaghassaei.com/projects/3D-printed_record

³http://www.amandaghassaei.com/projects/laser_cut_record