

## 5. Das Magnetpendel

Im Brainstorming zu einem praktischen Teil kam der Begriff des Magnetpendels zum ersten Mal zur Sprache. Anhand eines Magnetpendels kann auf einfache und doch anschauliche Weise Chaos gezeigt werden. Speziell für diese praktische Arbeit fragte ich den Zahntechniker Gerhard Hugi an, ob er mir bei diesem Vorhaben helfen würde. Mit Hilfe seiner Erfahrung in feinen und präzisen Arbeiten und meinen Vorstellungen entstand so ein Magnetpendel, das ich für meine Forschung am Chaos verwenden konnte.

### 5.1. Bauplan

Das Pendel muss gewisse Voraussetzungen erfüllen, um für die geplante Forschung geeignet zu sein. Dazu gehören:

- Grösse
- Stabilität
- Flexible Versuchsanordnungen
- Sichtbarer Bahnverlauf
- Keine magnetischen Materialien

Die Dimension des Pendels war insofern ausschlaggebend, da sich alles weitere danach richtete. Um eine möglichst grosse Vielfalt in der Versuchsanordnung zu erreichen und die Übersichtlichkeit zu garantieren, wäre ein grosses Pendel von Vorteil. Hingegen wäre im Hinblick auf Transport und Kosten ein kleines geeigneter. Um diese beiden Aspekte in einem Mittelmass zu vereinen, habe ich mich für eine Konstruktionshöhe von ca. 1m entschieden.

Da am Pendel auch mit den Magneten grosse Kräfte von mehr als 100N wirken, ist eine stabile Konstruktion notwendig. Aufgrund experimenteller Versuche habe ich herausgefunden, dass sich eine Pyramidenform am besten eignet. Ein Tetraeder wäre zwar noch stabiler, aber das Dreieck als Grundfläche wäre für die experimentelle Anordnung der Magnete zu klein.

Um in der Versuchsanordnung eine grösstmögliche Flexibilität zu erreichen, mussten sowohl die Magnetpositionen wie auch ihre Polarität variabel sein. Die Magnete sollten aber andererseits fest sein, so dass sie sich beim Wirken starker Kräfte nicht verschieben. Zudem war die Idee einer verstellbaren Pendelhöhe vorhanden, mit Hilfe derer man die Distanz zu den Magneten erhöhen und damit die Stärke der Magnetkräfte reduzieren könnte.

Weil speziell für einen Versuch im Zusammenhang mit dem Lyapunovexponenten<sup>1</sup> eine sichtbare Bahn notwendig war, musste ich mir Gedanken darüber machen, wie ich die Pendelbahn aufzeichnen könnte. Die Problemstellung erwies sich später schwieriger als erwartet. In einer intensiven Experimentierphase versuchte ich es mit Hilfe eines Lasers zu lösen.

---

<sup>1</sup> Siehe Kap.3.3

Das Verwenden jeglichen magnetischen Materials war beim Bau des Pendels nicht möglich, da die in den Versuchen verwendeten Magnete dadurch beeinflusst worden wären. Dies bedeutete, dass alle Stabilitätsstreben nicht aus Eisen sein durften, was den Bau und das Schweißen im Zusammenhang mit dem dadurch verwendeten Aluminium erheblich erschwerte.

Um diese Vorstellungen zu konkretisieren, habe ich mit Hilfe des CAD-Programms<sup>1</sup> „AutoCAD-Light“ einen Gesamtplan des Magnetpendels gezeichnet. (Alle Baupläne mit Bemessungen und Detailausschnitten befinden sich im Anhang). Der Gedanke der Pyramidenkonstruktion wird übernommen, da er Stabilität und Grundfläche geeignet vereint. Der Plan sieht vor, das gesamte Pendel bis auf die Grundplatte<sub>6</sub>, aus Aluminium zu bauen, um zu garantieren, dass die Konstruktion nicht anziehend auf die Magnete des Pendelkopfes wirkt.

Zudem wird auf der Spitze des Pendels ein Führungsrohr<sub>1</sub> aus Aluminium angebracht und mit zwei Stellschrauben versehen, so dass sich der Pendelstab in der Höhe variieren und dann mittels Stellschrauben befestigen lässt. Der untere Teil des Pendelstabs<sub>4</sub> ist jedoch immer noch frei bewegbar, da er nur über ein Fadengelenk<sub>3</sub> mit dem oberen<sub>2</sub> verbunden ist.

Der Pendelkopf<sub>5</sub>, in dem sich ein Laser zur Aufzeichnung der Bahnen befindet, ist mit Magneten ausgestattet, so dass diese mit den Magneten der Grundplatte anziehend oder abstossend wirken und das Pendel in chaotische Bahnen bringen können.

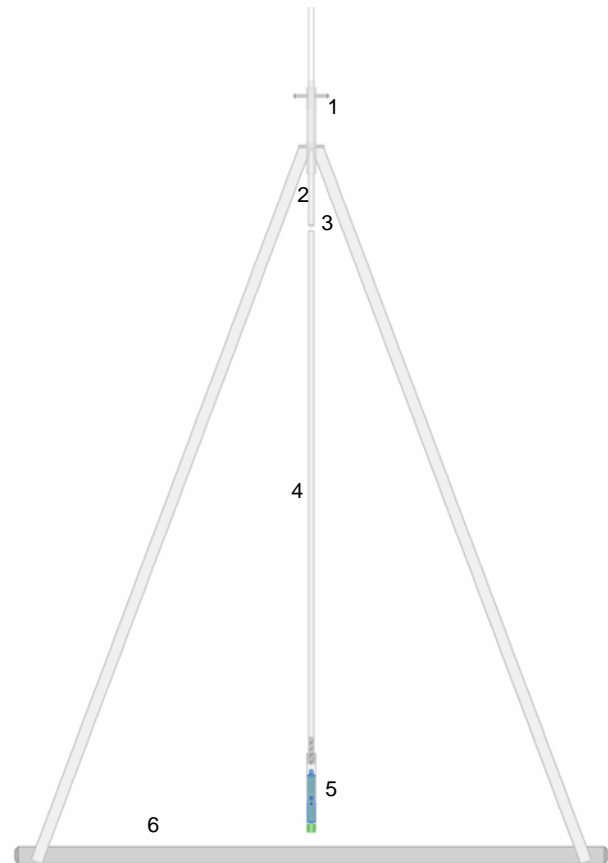


Abb.13: Übersichtsplan der Gesamtkonstruktion des Pendels, inkl. Nummerierung.

<sup>1</sup> Ein Programm, das nicht mit Bildpunkten, sondern mit Masseinheiten rechnet. Solche Programme werden insbesondere in der Vermessungstechnik verwendet.

## 5.2. Die Grundplatte

Die für das Pendel verwendete Grundplatte ist eine buchenbeschichtete Spanplatte. Ihre Dimensionen betragen 720mm x 720mm x 18mm, bzw. eine Brettdiagonale von 1018mm. Für die gesamten Arbeiten mit der Grundplatte habe ich mit dem Schreinerlehrling Jonas Hugi zusammen gearbeitet, der mir eine grosse Hilfe war.

Die vier Führungslöcher für die Aluminiumstreben für den Aufbau müssen jeweils in einem 60°-Winkel zueinander stehen, damit die 980mm langen Alustreben in der Spitze der

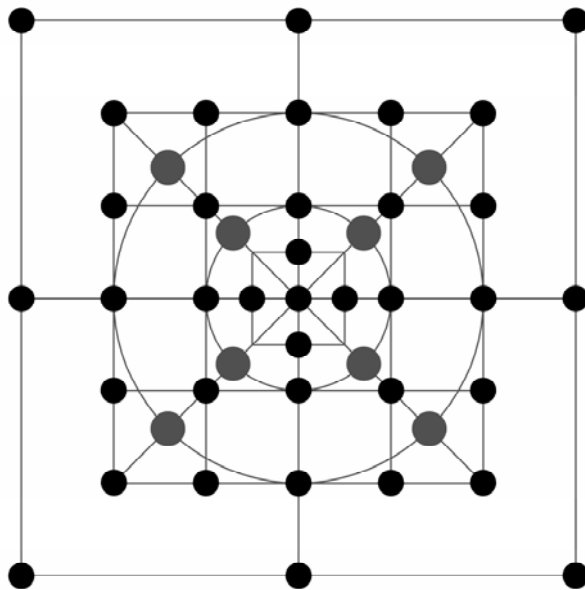


Abb.14: Schematische Darstellung zur Anordnung der Magnete.

Pyramide zusammen kommen und verschweisst werden können. Weitere 37 Löcher mit dem Durchmesser 15mm müssen für die Anordnung der Magnete gebohrt werden. Diese werden von unten in die Platte gebohrt, damit die Magnete nicht durch die Anziehungskraft des Pendelkopfes aus ihren Löchern gezogen werden. Die Magnete werden nur durch Reibung in ihren Löchern gehalten und können jederzeit ausgetauscht und entfernt werden. Das Lochmuster wird in einem 90mm x 90mm Raster angeordnet. Dazu kommen zwei Kreise mit den Radien 90mm bzw. 180mm. Die sich auf den Schnittpunkten der Kreise mit den beiden Diagonalen befindlichen Löcher haben einen Durchmesser von 20mm, da sie für Spezialmagnete gedacht sind.

Aufgrund der grösseren Elongation<sup>1</sup> des Pendels nimmt die Distanz zwischen Grundplatte und Pendelkopf zu und somit die Kräfte der Magnete ab. Die schwächer wirkenden Magnete am Rande der Grundplatte sind für meine Versuche grösstenteils uninteressant und so wurde ihre Zahl auf 8 reduziert. Im Zentrum der Grundplatte um die Nulllage herum, wo die Elongation des Pendels klein bis null ist, wirken die Magnete stark, so dass sie auch für die Experimente interessant werden. Es werden deshalb zusätzlich 4 Magnetlöcher mit der Distanz 45mm zur Nulllage angeordnet.

<sup>1</sup> Elongation = Auslenkung des Pendels

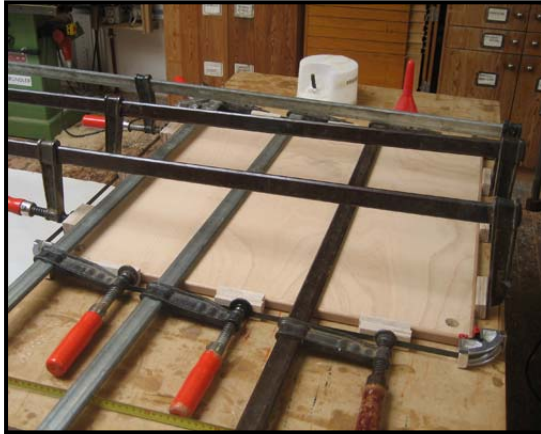


Abb.15: Anleimen der Buchenleisten und die Fixierung derer.

Als Abschluss an den Kanten werden Buchenleisten auf Länge und Gehrung gesägt, danach fest geleimt und rund geschliffen. Unschöne Stellen werden mit Kitt verschlossen und nachträglich abgeschliffen. Wenn alles ausgehärtet und getrocknet ist, wird die gesamte Grundplatte abgeschliffen und mehrfach geölt. Nach dem Einziehen des Öls in die Spanplatte wird sie erneut mit wenig Öl übergossen und poliert. Dies geschieht ebenfalls mehrfach, bis eine schöne und glatte Oberfläche entsteht.



Abb.16: Bohrung der Löcher für die Magnete, nach vordefiniertem Muster (siehe Abb.14)

In regelmässigen Abständen von einem Tag muss die Grundplatte weiterhin eine Woche lang mit Öl behandelt werden. So wird sie resistenter gegen jegliche Einwirkung von Flüssigkeiten und kann auch bei versehentlichen Kratzern nachpoliert werden. Die gesamte Grundplatte dehnte sich aufgrund der mehrfachen Behandlung mit Öl aus, so dass nun alle Magnetlöcher zu klein für die Magnete waren. Diese müssen nachgebohrt werden, so dass die Magnete problemlos ausgewechselt werden können.

### 5.3. Der Aufbau

Der Aufbau des Magnetpendels ist komplett aus Aluminium. Er dient als stabiler Aufhängungspunkt für das Pendel, so dass es frei schwingen kann, aber nicht durch die Wirkung von Kräften verschoben wird. Um die Stabilität des Aufbaus zu gewährleisten, mussten alle Aluminiumverbindungen geschweisst werden. Da aber Aluminium heikel zu schweißen ist<sup>1</sup>, hat der Aluminiumschweisser Roman Straub der Firma Schweisszone diese Angelegenheit für mich übernommen.

Vier Aluminiumvierkantrohre dienen als Grundstützen für die gesamte Aufhängung. Diese werden in die vier dafür gebohrten Führungslöcher eingelassen, so dass sie an ihren Enden aneinander passen. Dann werden alle vier über ein 4mm starkes Aluplättchen miteinander verbunden und verschweisst. In die Mitte dieses Aluplättchens wird ein Loch gebohrt, um das 12mm ( $\varnothing$  10mm innen) dicke Aluminiumführungsrohr einzupassen und ebenfalls fest zu schweißen. 10mm unterhalb des oberen Endes dieses 105mm langen Führungsrohrs werden noch jeweils zwei Löcher in das Rohr gebohrt, um zwei Stellschrauben einzupassen. Diese sind später dafür verantwortlich, dass die Höhe des Pendelstabs fixiert werden kann.

Der Pendelstab, an dem später der Pendelkopf hängt, ist ebenfalls aus Aluminium. Er ist 8mm ( $\varnothing$  6mm innen) dick und besteht aus zwei Teilen, die über ein Fadengelenk miteinander verbunden sind. Der obere Teil des Pendelstabs ist über das Führungsrohr mit der Aufhängung verbunden und somit fest. Bei gelösten Stellschrauben kann er jedoch vertikal bewegt und durch ihn die Höhe des gesamten Stabs und somit auch diejenige des Pendelkopfes verstellt werden. Das Fadengelenk besteht aus einer Nylonschnur, wie sie zum Angeln verwendet wird, die genau im Zentrum des Rohrdurchmessers beider Teile befestigt ist. So ist der untere Teil frei drehbar und hat eine relativ geringe Reibung in der Aufhängung. Am unteren Ende des Pendelstabs ist eine kleine Gewindestange ( $\varnothing$  5mm), mit Hilfe derer der Pendelkopf am Pendelstab festgeschraubt werden kann.

Da die vier Stützstreben nicht fest mit der Grundplatte verbunden sind, lässt sich der gesamte Aufbau des Pendels von der Grundplatte lösen und ist somit relativ gut zu transportieren. In diesem Zustand ist der gesamte Aufbau jedoch gefährdet, da dem Aufbau ohne Grundplatte die Stabilität fehlt und die Aluminiumschweissnähte in diesem Zustand relativ sensibel sind.

---

<sup>1</sup> Aluminium muss mit einem Schutzgas geschweisst werden, das das Eloxieren des Aluminiums verhindert

## 5.4. Der Pendelkopf

Das eigentliche Kernstück des gesamten Magnetpendels ist der Pendelkopf. Mit Hilfe des in ihm eingebauten Lasers lässt sich das Pendel exakt positionieren, da der Laserstrahl die Auslenkung optisch verlängert. Zudem konnte ich mit dem Laser im Versuch zum „experimentellen Nachweis“ des Lyapunovexponenten<sup>1</sup> die Bahnen des Pendels aufzeichnen. Des Weiteren spielt der Pendelkopf eine zentrale Rolle hinsichtlich des Verlaufs der Pendelbahn. Die in ihm eingebauten Magnete bewirken zusammen mit denjenigen der Grundplatte den chaotischen Bahnverlauf des Pendels.

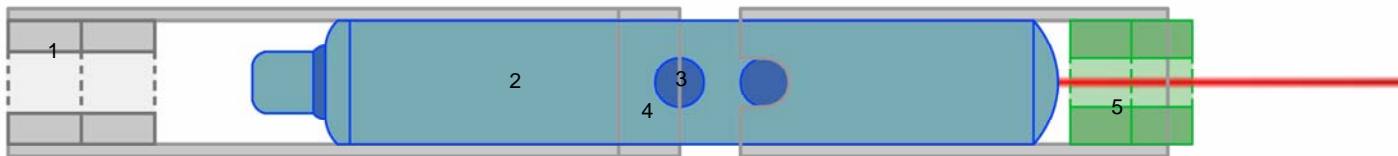


Abb.17: Plan zur Konstruktion des Pendelkopfes, inkl. Nummerierung.

Der Pendelkopf besteht im Wesentlichen aus drei Teilen. Der erste ist ein Aluminiumröhrchen ( $\varnothing$  12mm aussen,  $\varnothing$  10mm innen). Im hinteren Teil des Aluminiumröhrchens sind zwei Schraubenmutter<sub>1</sub> hineingeklebt, so dass der Pendelkopf mit der Gewindestange des Pendelstabs verschraubt werden kann. Dieser Teil passt exakt über den Laserpointer<sub>2</sub>, so dass sie durch Reibung zusammenhalten.

Der zweite Teil ist der Laserpointer LP-7. Dieser muss für die Aufzeichnung der Bahnen stark genug sein und ist deshalb ein Laserpointer Klasse 2<sup>2</sup>. Mit seinen 10mm Länge und 22g Gewicht ist er klein und leicht genug, um in den Pendelkopf mit eingebaut zu werden. Über den Laser ist ein 5mm breites Aluminiumröhrchen<sub>4</sub> ( $\varnothing$  12mm aussen,  $\varnothing$  10mm innen) gestülpt. Wenn man dieses über den Knopf<sub>3</sub> zu Bedienung des Laserstrahls zieht, ist dieser festgestellt und der Laserstrahl leuchtet dauerhaft.






Das Laserlicht ist für das Auge gefährlich.  
Niemals direkt in den Laserstrahl blicken.

<sup>1</sup> Siehe Kap.3.3

<sup>2</sup> Leistung: Klasse 1 < 25 $\mu$ W, Klasse 2 <1mW, Klasse 3A 1mW – 5mW, Klasse 3B 5mW – 500mW, Klasse 4 >500mW - Laserpointer Klasse 2 sind die höchsten hierzulande zulässigen.

## 5. Das Magnetpendel

Im vordersten und dritten Teil des Pendelkopfes befinden sich zwei Lochmagnete<sub>5</sub> (Stärke jeweils  $\sim 20\text{N}^1$ ). Diese wirken zusammen mit den sich in der Grundplatte befindlichen Magnete, so dass das Pendel in chaotische Bahnen gebracht werden kann. Gleichzeitig kann der Laserstrahl aber durch das Loch im Magnet auf die Unterlage projiziert werden. Die Magnete sind in ein Aluminiumröhrchen ( $\varnothing 12\text{mm}$  aussen,  $\varnothing 10\text{mm}$  innen) geklebt. Dieser vorderste Teil wird ebenfalls auf den Laserpointer gesteckt und durch Reibung optimal zusammengehalten.

	Die Magnetfelder sind für Menschen mit Herzschrittmachern gefährlich. Alle in der Arbeit verwendeten Magnete haben eine verheerende Wirkung auf jegliche elektronische Geräte, sowie Kreditkarten oder Ähnliches. Es wird ein Sicherheitsabstand solcher Geräte von min. 2m empfohlen.
	
	

Der gesamte Pendelkopf ist jederzeit in diese drei Teile zerlegbar, so dass er problemlos gewartet und die Batterien ausgetauscht werden können. Alle drei Teile des Pendelkopfs haben zusammengesteckt eine Länge von 97mm wiegen 38g. Der Pendelkopf hat also im Vergleich zur Pendelstange ein grösseres Gewicht pro Länge, so dass er effektiv als Schwerpunkt wirkt.



Die in der Grundplatte verwendeten Magnete sind mit  $\sim 60\text{N}$  noch stärker als diejenigen des Pendelkopfes. Wenn die Magnete des Pendelkopfes und die der Grundplatte so liegen, dass sie anziehend aufeinander wirken, so ist insgesamt ein Kräftepotential von rund  $80\text{N}$  vorhanden, welches sogar durch die 2cm dicke Holzplatte immer noch eine starke Wirkung hat. Um die Stärke der Magnete etwas zu reduzieren, kann man die Höhe des Pendelkopfes (siehe Kap.5.3) und somit die Distanz der Magnete etwas erhöhen.

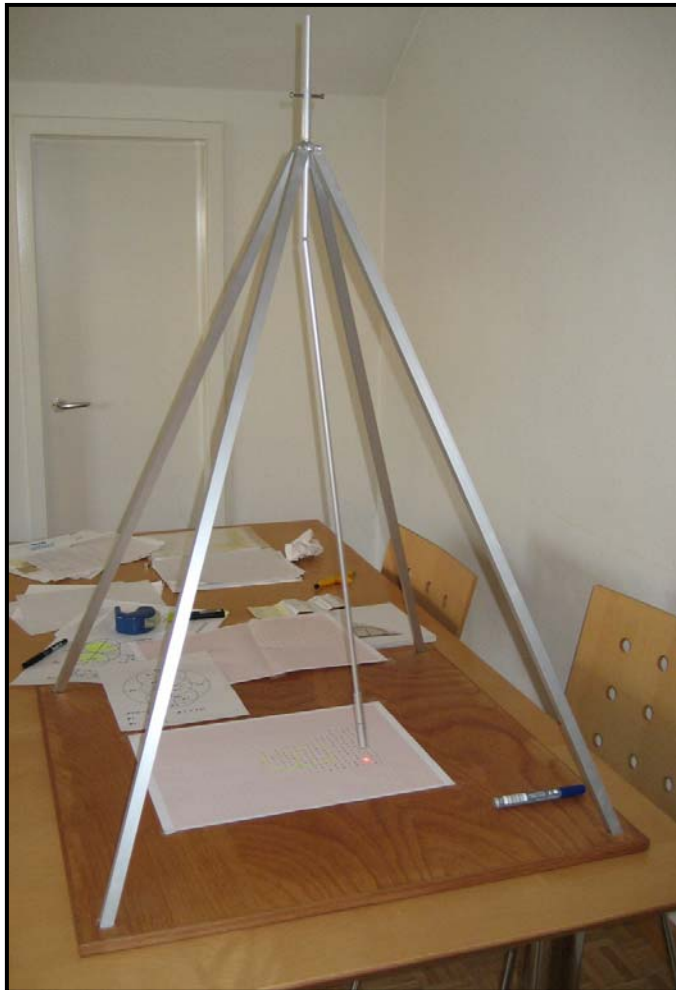
Abb.18: 500g schwerer und 1cm dicker Schreibblock, durch einen einzelnen Magneten an einer Heizung gehalten.

<sup>1</sup> Stärke angegeben in Newton (N). Haftkraft des Magneten,  $1\text{kg} \approx 9.80665\text{N}$ .



## 5.5. Das fertige Pendel

Die Grundplatte, der Aufbau und der Pendelkopf vereint, ergeben das komplette Pendel. Dieses hat, wie am Anfang geplant eine stabile Pyramidenform, mit einem Viereck als Grundfläche zur grösstmöglichen Flexibilität in der Versuchsanordnung. Alle Magnete sind in den 45 dafür vorgesehenen Löcher (auf dem Bild nicht zu sehen, da unter der Grundplatte)



frei auswechselbar. Das gesamte Pendel besteht, wo immer es möglich war, aus nichtmagnetischen Materialien, so dass die Magnete des Pendelkopfes möglichst in keiner Weise beeinflusst werden. Der Bau des Pendels, von der Idee bis zur Konstruktion, dauerte ca. vier Monate, wobei die Planung mehr als die Hälfte ausmachte. Interessanterweise gab es kaum Abweichungen vom Ursprungsplan. Bis auf den Pendelkopf, der mir in seiner Konstruktions- und Funktionsweise bis zum Schluss ein wenig Kopfzerbrechen bereitete, verlief alles planmässig.

Abb. 19: Das komplette und fertige Pendel.

## 5.6. Materialien und Kosten

**Materialien**

<u>Spezifikation</u>	<u>Masse</u>	<u>Stk.</u>	<u>Preis / Stk.</u>
Aluminiumrohr (vierkant)	15mm x 15mm x 980mm	4	SFr. 4.75
Aluminiumrohr (rund)	8mm x 100mm	1	SFr. 3.75
Aluminiumrohr (rund)	11mm x 100mm	2	SFr. 4.50
Schraubenmutter	10mm (6mm) x 5mm	2	SFr. 0.20
Gewindestange	6mm x 30mm	1	SFr. 2.80
Stellschraube	3mm x 20mm	2	SFr. 1.30
Aluminiumplättchen	1mm x 30mm x 30mm	1	SFr. 0.35
Spanplatte, beschichtet mit Buchenholz	720mm x 720mm x 20mm	1	SFr. 54.00
Buchenholzleiste	730mm x 3mm x 20mm	4	SFr. 2.80
Magnet S-15-08-N (rund)	15mm x 8mm	20	SFr. 0.90
Magnet S-20-02-N (rund)	20mm x 2mm	5	SFr. 0.70
Magnet R-10-04-04 (rund mit Loch)	10mm (4mm) x 5mm	2	SFr. 0.70
Laserpointer LP-7	10mm x 60mm	1	SFr. 28.00

*Materialkosten Total*      SFr. 154.00

**Dienstleistungen**

<u>Spezifikation</u>	<u>Firma</u>	<u>Kosten</u>
Aluminiumschweissen	Schweisszone (Roman Staub)	SFr. 70.00
Versand	Supernete.ch	SFr. 6.00

*Dienstleistungskosten Total*      SFr. 76.00

**Gesamtkosten**      **SFr. 230.00**