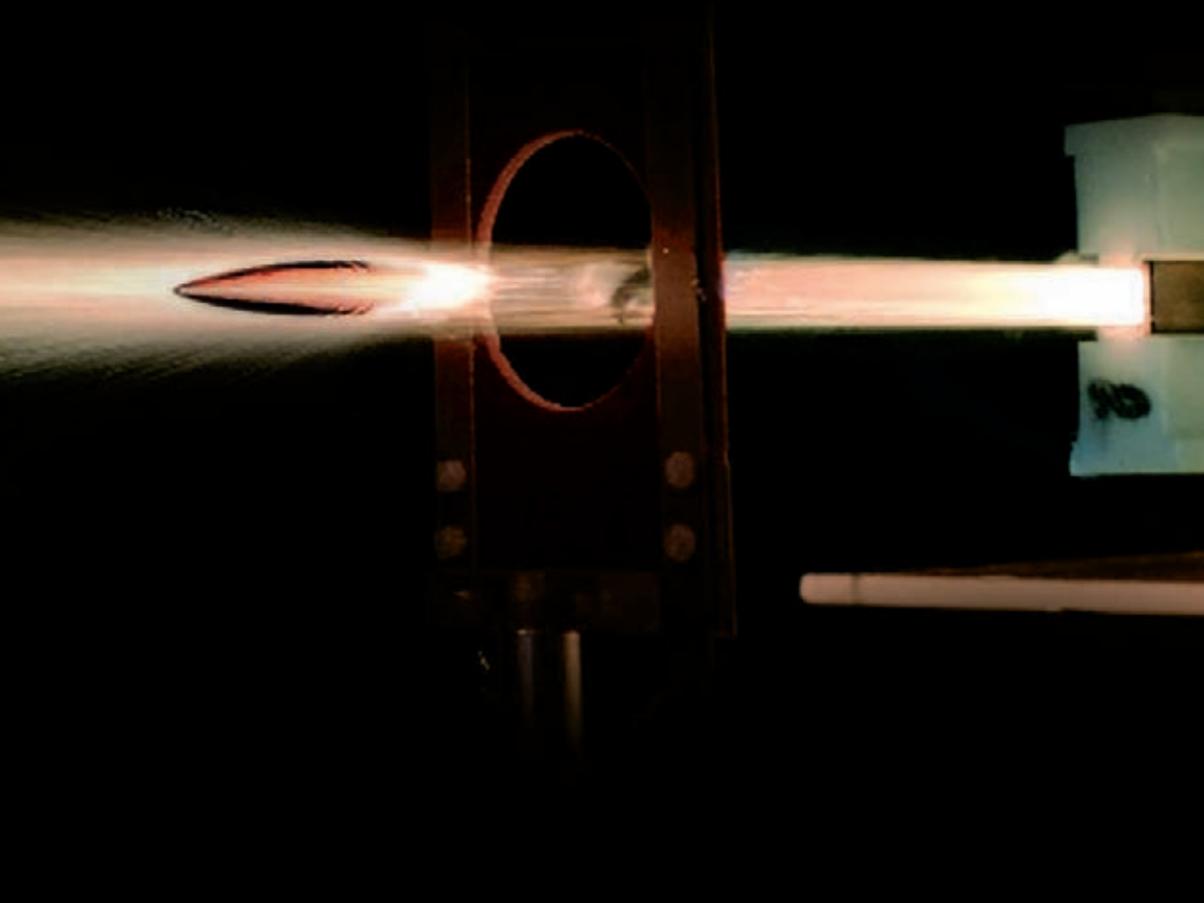


Thomas Rapp

**FRANZIS**  
EXPERIMENTE

BAND 11



# Experimente mit **Electric Guns**

Geschichte, Grundlagen und Selbstbau elektronischer Kanonen

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Geschichtliche Entwicklung .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
2.1	Spulenkannonen / Coilguns .....	14
2.2	Die Reluktanzkanone .....	15
2.3	Wirbelstrom-Spulenkannone .....	16
2.4	Fliegender Ring .....	16
2.5	Reconnection Coilgun .....	17
2.6	Mehrstufige Spulenkannonen .....	19
<b>3</b>	<b>Selbstbauprojekte .....</b>	<b>34</b>
3.1	Spulenkannone Einsteigermodell .....	34
3.2	Einfache Spulenkannone mit Hochspannungstreiber .....	36
3.3	Mehrstufige Spulenkannone mit Gleitkontakten .....	38
3.4	Mehrstufige Spulenkannone mit optischer Triggerung .....	41
3.5	Vierstufige Induktionsspulenkannone .....	44
3.6	Achtstufige Induktionskannone .....	48
3.7	Fliegender Ring .....	52
3.8	Fliegende Scheibe .....	54
3.9	Prallplattenbeschleuniger .....	55
3.10	Reconnection Coilgun .....	59
3.11	Mehrstufige Reconnection Gun .....	61
3.12	Schienenkannone/Railguns .....	61
3.13	Railgun mit serieller Augmentation .....	62
3.14	Hochleistungs-Railgun .....	65
3.15	Railgun mit Plasmaarmatur .....	68
3.16	Elektrische Schleuder .....	72
3.17	Elektrische Schleuder 2 .....	73
3.18	Elektrische Armbrust .....	74
<b>4</b>	<b>Spezielle Bauelemente .....</b>	<b>80</b>
4.1	Speicherelemente .....	80
4.1.1	Elektrolytkondensatoren/Elkos .....	80
4.1.2	Hochspannungskondensatoren .....	80
4.1.3	Spulen und Batterien .....	82
4.2	Die Hochleistungsschalter .....	83
4.2.1	Mechanische Schalter .....	83
4.2.2	Transistoren .....	85

4.2.3	Thyristoren .....	85
4.2.4	Thyratrons.....	87
4.2.5	Ignitrons.....	87
4.2.6	Funkenstrecken.....	89
4.2.7	Dielektrische Schalter.....	93
<b>5</b>	<b>Messtechnik.....</b>	<b>95</b>
5.1	Geräte zur Messtechnik .....	95
5.2	Spannungsmessung .....	96
5.3	Strommessung .....	96
5.4	Die Rogowskispule.....	97
5.5	Geschwindigkeitsmessungen.....	99
5.6	Das ballistische Pendel .....	99
5.7	Die Wurfparabel .....	101
5.8	Elektronische Geschwindigkeitsmessung .....	102
5.9	Hochgeschwindigkeitsfotografie.....	104
5.10	Kurzzeitblitzgerät .....	104
5.11	Verzögerungsschaltung.....	106
5.12	Verzögerungsgenerator mit PIC-Prozessor .....	107
5.13	Sensoren .....	110
<b>6</b>	<b>Aktuelle wissenschaftliche und militärische Projekte.....</b>	<b>115</b>
<b>Anhang.....</b>		<b>125</b>
	Programm-Listing für Delay-Generator.....	125
	Bezugsquellen.....	133
	Internetadressen.....	134
	Referenzliste .....	135

# 1 Geschichtliche Entwicklung

Bereits am Ende des 19. Jahrhunderts wurde bei den damals beliebten Vorträgen über die neu entdeckte Elektrizität der elektrische Mörser [1.1.] gezeigt. Im Prinzip eine thermoelektrische Variante, bei der eine Kugel durch die Druckwelle einer Entladung aus Leidener Flaschen (Vorläufer der Kondensatoren) aus einem Lauf geschleudert wurde. Natürlich war diese Kanone keine Konkurrenz zu den pulverbetriebenen Waffen, sondern diente nur zur Demonstration der Wirkung des elektrischen Stromes.

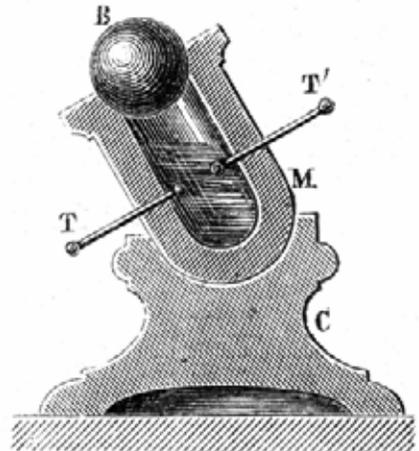


Abb. 1: Elektrischer Mörser

Erste ernst zu nehmende Versuche machte 1901 Kristian Birkeland, Professor an der Universität Kristiania in Norwegen. Er erhielt ab 1902 mehrere Patente auf seine elektrische Kanone und gründete kurz darauf eine Aktiengesellschaft zur Vermarktung seiner Erfindung. Birkelands Kanone war eine vielstufige Spulenkano, bei der ein Geschoss durch das Magnetfeld einer Reihe von Spulen durch den Lauf gezogen wurde. Gesteuert wurde die Anordnung durch eine Serie von automatischen Schaltern, welche durch das passierende Geschoss betätigt, die Spulen im richtigen Moment erregten.

Ein erstes Testmodell beschleunigte 500 g schwere Projektile auf 80 m/s und zeigte so die Wirksamkeit der Erfindung. Zwei weitere deutlich größere Modelle mit 4 Metern Länge, einem Kaliber von 6,5 cm Kaliber und Geschossgewicht von 10 kg folgten. Über die erzielten Reichweiten ist nichts bekannt. Aber die gegenüber dem König von Norwegen vorhergesagten 1000 km, etwa die Entfernung von Oslo bis ins feindliche Sankt Petersburg, war sicherlich viel zu hoch gegriffen. Die von Birkeland verwendeten Stromquellen, starke Dynamomaschinen, waren sicher nicht in der Lage, die erforderlichen Leistungen zu

erbringen. Selbst mit der heutigen Technologie ist es kaum möglich, mit einem Schuss diese Strecke zu überwinden.

Birkelands Versuche erreichten eine beachtliche Popularität und sogar deutsche Rüstungsbarone wie Krupp waren an einer Zusammenarbeit interessiert. Als aber Birkelands Modell bei einer öffentlichen Vorführung mit ohrenbetäubendem Knall zerbarst, fielen die Aktienkurse der Birkelands Waffenfabrik ins Bodenlose und jede weitere Entwicklung wurde eingestellt.



Abb. 2: Christian Birkeland

Die elektrische Kanone war allerdings nicht Birkelands einzige Erfindung. Unter anderem gründete er eine Fabrik zur Herstellung von Dünger aus dem Stickstoff der Luft. Diese Firma, die „Norsk Hydro“ ist heute einer der größten norwegischen Industriekonzerne. In Anbetracht seiner Verdienste ist Kristian Birkeland auf dem norwegischen 200-Kronen-Schein abgebildet.

Der französische Erfinder Fauchon-Villeplee war der nächste, der die Entwicklung elektrischer Waffen einen bedeutenden Schritt voranbrachte. Er entwickelte ab 1916 die erste Railgun, die er 1917 fertig stellte. Mit ihren zwei Meter langen Schienen und einem 50 g schweren Projektil durchschoss sie auf Antrieb einen 8 cm dicken Holzblock in 25 Meter Entfernung. Bei dieser Railgun wurde das beschleunigende Magnetfeld durch zwei Hilfswicklungen unterstützt und mit einer Eisenarmierung konzentriert. Der Stromfluss über das pfeilförmige Geschoss erfolgte über Gleitkontakte. Betrieben wurde die Maschine mit einem 600-A-/60-V-Dynamo. Beflügelt von diesem Erfolg konstruierte Fauchon-Villeplee weitere unterschiedliche Ausführungen, bis zu einer 30 m langen Riesenkanone, welche 100 kg schwere Projektile auf 1600 m/s beschleunigen und über 100 Kilometer weit schießen sollte. Allerdings wurde mangels potenter Geldgeber keine dieser Entwicklungen jemals gebaut.

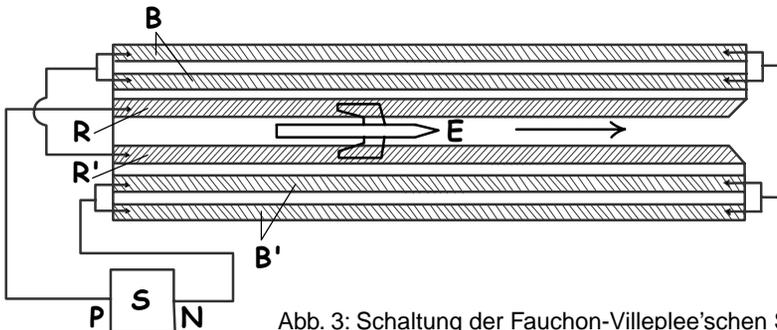


Abb. 3: Schaltung der Fauchon-Villeplee'schen Schienenkanone

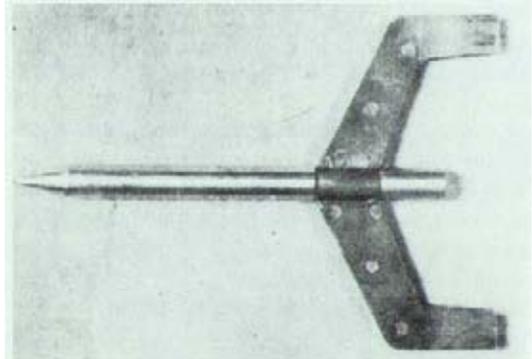


Abb. 4: Fauchon-Villeplee's Pfeilgeschoss

In Nordamerika war es Professor Edwin Northrup von der Princeton Universität, ein Spezialist für induktive Erwärmung, der um 1930 verschiedene Spulenkannonen baute. Seine Anordnungen bestanden aus einer Reihe von Einheiten mit jeweils sechs Spulen. Die Anregung der Spulen erfolgt mittels dreiphasigen Wechselstroms. Die entstehende magnetische Wanderwelle trieb das Geschoss durch Induktionswirkung an. Wie die Synchronisation des Geschosses mit dem Wechselfeld bewerkstelligt wurde, ist leider nicht bekannt, ebenso gibt es keine veröffentlichten Daten zu den erzielten Geschwindigkeiten. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern hatte Northrup keine militärische Anwendung im Sinn. Er wollte seine Entwicklung in der Raumfahrt einsetzen. Beflügelt von seiner Phantasie schrieb er unter dem Pseudonym „Pseudoman“ einen Science-Fiction-Roman „Zero to eighty“ [1.2.], der einen Flug zum Mond mit Hilfe seiner Spulenkano-ne zum Thema hat.

Auch deutsche Wissenschaftler versuchten sich ab 1943 an der Weiterentwicklung der Birkeland'schen und Fauchon-Villeplee'schen Patente. Eine Gruppe um Dr. Joachim Hänsl er arbeitete erst in Berlin und später im bayrischen Klais bei Mittenwald an einer Spulenkano-ne, die zur Flugabwehr eingesetzt werden sollte. Aber die hochgesteckten Vorgaben des Heereswaffenamtes mit einem Geschossgewicht von 6,5 kg, einer Mündungsgeschwindigkeit von 2000 m/s und einer Feuergeschwindigkeit von 65 Schuss pro Minute waren auf diesem Weg nicht zu realisieren.

So wechselten die Forscher nach 6 Monaten erfolgloser Arbeit zum mehr versprechenden Railgun-Prinzip. Der erste Prototyp, ganz ähnlich der Fauchon-Villeplee'schen Kanone, wurde Ende 1944 fertig gestellt und erreichte mit einer zwei Meter langen Beschleunigungsstrecke und 10 g schweren Projektilen eine Mündungsgeschwindigkeit von 800 m/s und dank weiterer Verbesserungen schließlich 1080 m/s. Erreicht wurde diese Geschwindigkeit mit einem Strom von nahezu 30000 A. Dieser Strom wurde von einer Batterie, bestehend aus über 1000 einzelnen Bleiakkus, erzeugt.

Daneben wurde auch ein kleines Demonstrationsmodell gebaut. Das 50 cm lange Gerät wurde mit nur zwei Autobatterien betrieben und erreichte damit immerhin eine Mündungsgeschwindigkeit von 60 m/s. Weitere technische Einzelheiten zu diesem auch für Bastler interessanten kleinen Modell sind dem Autor leider nicht bekannt.

Wie bei Fauchon-Villeplee's Railgun wurden bei den ersten Versuchen Eisenpolschuhe zur Verstärkung des Feldes verwendet. Die Magnetisierung im Luftspalt der Polschuhe betrug

0,4 Tesla. Um die für die Weiterentwicklung notwendigen 4 Tesla zu erreichen, musste auf die Eisenarmierung verzichtet werden, da Eisen eine Sättigungsinduktion von maximal 2 Tesla aufweist.

Zudem wurde klar, dass weder die Batterien noch eine auch vorhandene 50-kJoule-Kondensatorbank zur Erreichung der angestrebten Ziele ausreichten. Die parallel zu Hänsler arbeitende Gruppe unter Dr. Otto Muck suchte deshalb nach alternativen Energiequellen. Dabei wurden zwei Schwerpunkte gesetzt.

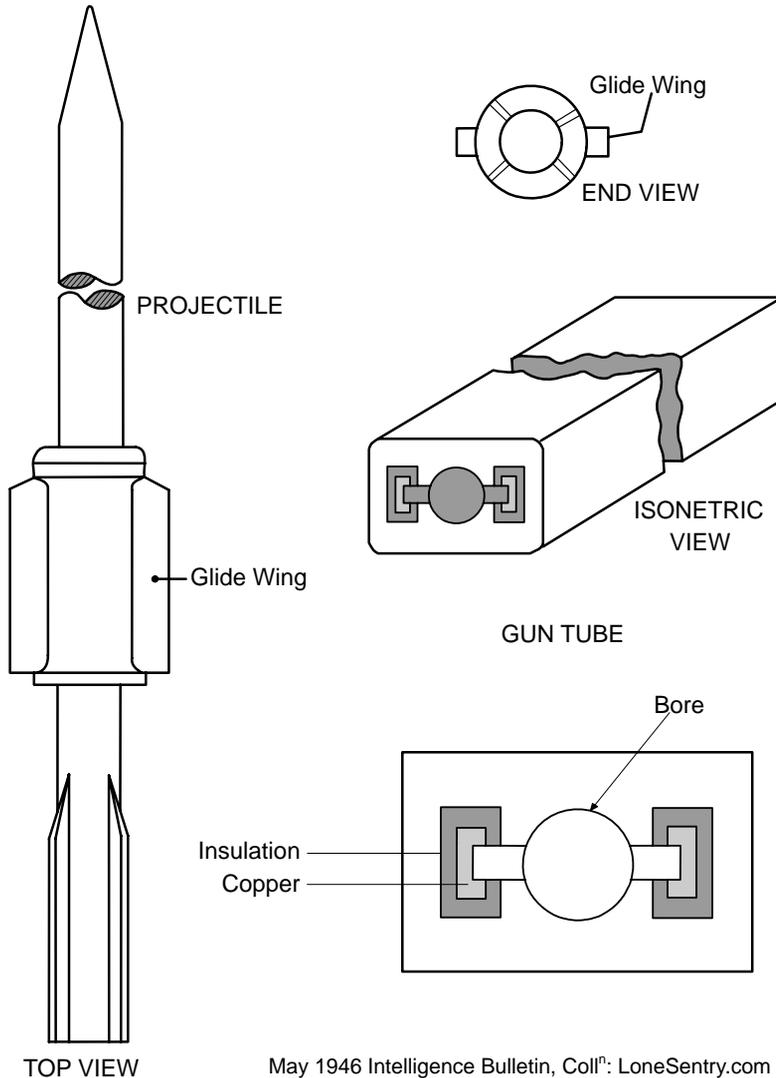


Abb. 5: Hänslers Railgun, nach einer amerik. Veröffentlichung [1.3.]

Als erstes, der Ersatz der Akkubatterie durch einen von der Firma Siemens gefertigten Homopolargenerator. Allerdings waren die Eigeninduktivitäten der vorhandenen Generatoren zu hoch und konnten so die erforderlichen Pulsströme von einigen zehntausend Ampere nicht liefern.

Zweitens wurde nach einer Steigerung der Energiedichte von Kondensatoren durch den Einsatz spezieller Dielektrika gesucht. Vor allem wurde Titanoxid in Betracht gezogen, das eine extrem hohe Dielektrizitätskonstante aufweist und so den Bau von Kondensatoren mit hoher Speicherdichte ermöglichen würde. Aber diese Projekte und alle weiteren, wie der Bau einer riesigen Kanone, wurden nur noch geplant aber nicht ausgeführt. Bei Kriegsende wurden alle Unterlagen und Ausrüstungsgegenstände in die USA gebracht.

Die fernöstlichen Verbündeten des deutschen Reiches, die Japaner, forschten ebenfalls während des II. Weltkriegs von 1942 bis 1944 in diesem Bereich. Im Gegensatz zu der deutschen Gruppe arbeiteten die Japaner an einer Coilgun. Wie schon 1930 von Northrup wurde das Wanderwellenprinzip angewandt. Die 108 Spulen, die auf einem 10 m langen Rohr verteilt waren, wurden mit Dreiphasenwechselstrom von 1500 Hz erregt. Ein von einem 600-PS-Motor angetriebener 2-Megawatt-Generator, lieferte die nötige Leistung. Mit einem 2 kg schweren Projektil erreichte die Kanone eine Mündungsgeschwindigkeit von 335 m/s. Aufgrund der unzureichenden Leistung, geplant waren 10 kg mit 2000 m/s, wurde das Projekt 1944 eingestellt.

Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs wurden selbstverständlich die Entwicklungen von Seiten der Großmächte weitergeführt. Aber sowohl aufgrund der Geheimhaltung während der Zeit des Kalten Krieges, als auch durch die alles in den Schatten stellende militärische Bedeutung der inzwischen gebauten Atomwaffen, gerieten die elektrischen Kanonen in der Öffentlichkeit in Vergessenheit.

Mit der Einsicht der Militärs, dass der reale Einsatz taktischer Atomwaffen nicht zu rechtfertigen ist, und auch durch Präsident Reagan's SDI-Programm kam wieder Bewegung in die Forschung an elektrischen Kanonen. Sogar Diktatoren kleinerer Staaten, wie Saddam Hussein, waren offenbar sehr an diesen Waffen interessiert. So wurden im Irak von der UN-Aufsichtsbehörde bei Inspektionen die Bestandteile einer Railgun gefunden.

Im zivilen Bereich weckte die expandierende Weltraum- und Satellitentechnik das Interesse an der Hochgeschwindigkeitsforschung. Demzufolge wurde in vielen Laboratorien nach Möglichkeiten gesucht Mikrometeoriteneinschläge zu simulieren und die dazu notwendigen hohen Geschwindigkeiten mit Rail- oder Coilguns zu erreichen.

Gleichfalls bei der andauernden Entwicklung des Fusionsreaktors könnte die Railgun zum Einsatz kommen. So wurde versucht, den Kernbrennstoff, gefrorene Deuterimpellets, mittels einer Railgun mit hoher Geschwindigkeit in die Reaktionskammer zu schießen.

Eine detaillierte Übersicht der seit dem Zweiten Weltkrieg durchgeführten Forschungsvorhaben mit elektrischen Kanonen ist im Kapitel „Aktuelle wissenschaftliche und militärische Projekte“ aufgeführt.

## 3 Selbstbauprojekte

### 3.1 Spulenkannonne Einsteigermodell

Dieses kleine Versuchsmodell ist mit einfachsten Mitteln zu bauen und kann als Ausgangspunkt für weitere Versuche dienen.

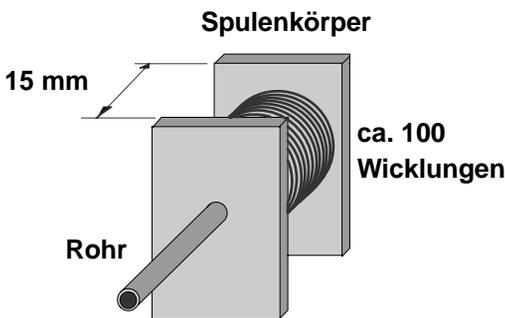


Abb. 30: Kleine Spulenkannonne

Zuerst braucht man ein möglichst dünnwandiges stabiles Röhrrchen aus isolierendem Material. Der Innendurchmesser sollte 3 bis 5 mm betragen, die Länge ist mit 5 bis 10 cm ausreichend. Danach werden zwei Kunststoff- oder Holzscheiben mit Bohrungen, die dem Rohrdurchmesser entsprechen, gefertigt. Diese beiden Scheiben, in 15 mm Abstand auf das Rohr geklebt, bilden den Spulenkörper. Der Zwischenraum zwischen den Scheiben wird mit etwa 100 Wicklungen Kupferlackdraht von 0,5 mm Stärke bewickelt. Die Wicklung braucht nicht Lage für Lage gewickelt werden, jedoch sollte man darauf achten, möglichst eng zu wickeln. Die fertige Spule kann mit Isolierband fixiert werden.

Das Projektil fertigt man aus einem dicken Eisennagel, dessen Dicke etwas kleiner als der Innendurchmesser des Rohres ist: Der Nagel ohne Kopf sollte leichtgängig im Rohr gleiten. Der Nagel wird in 15 mm lange Stücke zersägt, welche an einer Seite mittels Feile angespitzt werden.

Für die elektrische Schaltung braucht man einen Hochvoltelko mit 1000  $\mu\text{F}$  und 350 V oder eine entsprechende Anzahl kleinerer Typen, die, parallel geschaltet, diesen Wert ergeben. Das Ladeteil besteht aus einem Trafo, z. B. einem Trenntrafo kleiner Leistung für 220 V, einer passenden Gleichrichterdiode z. B. 1N4007 und einem Strombegrenzungswiderstand mit etwa 200 Ohm und 10 Watt. Als Schaltelement wird ein ausgedienter Sicherungsautomat verwendet.

Hat man alle Teile auf ein Brett montiert und die Schaltung korrekt verdrahtet, kann man sich an den ersten Schuss wagen. Das Geschoss wird soweit in den Lauf eingeführt, dass es

mit der Spitze gerade in die Spule eintaucht. Die Sicherung wird ausgeschaltet und der Kondensator durch Einschalten des Netzteils geladen. Der Ladezustand wird mit einem Multimeter an den Kondensatoranschlüssen kontrolliert. Ist die Schaltung korrekt verdrahtet, wird die Spannung auf ca. 300 V ansteigen. Nachdem der Kondensator so geladen wurde und das Netzteil wieder abgeschaltet ist, kann der Schuss durch die Betätigung des Sicherungsschalters ausgelöst werden.

Das kleine Geschoss wird aus einem Nagel oder einem sonstigen Eisenstab gefeilt. Wichtig ist, dass es wirklich aus ferromagnetischem Material besteht, was leicht mit einem Magnet nachzuprüfen ist.

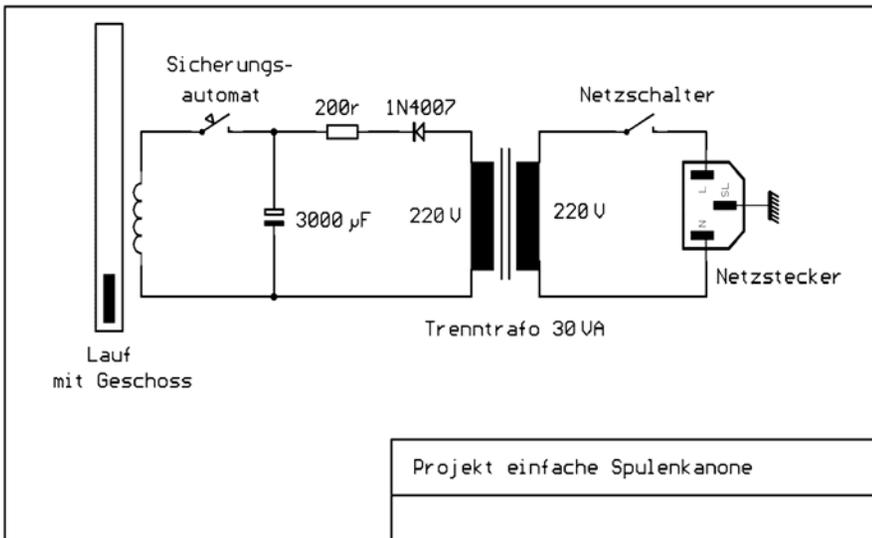


Abb. 31: Schaltplan Spulenkanone Einsteigermodell

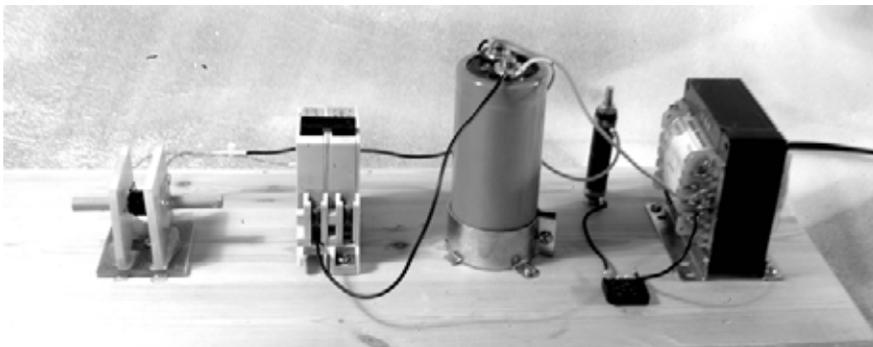


Abb. 32: Der Aufbau der einfachen Spulenkanone  
Von links nach rechts: das Röhren mit Spule, der Sicherungsautomat, der Kondensator, Gleichrichter mit Vorwiderstand und ganz rechts der Trafo.



Abb. 33: Das Eisengeschoss

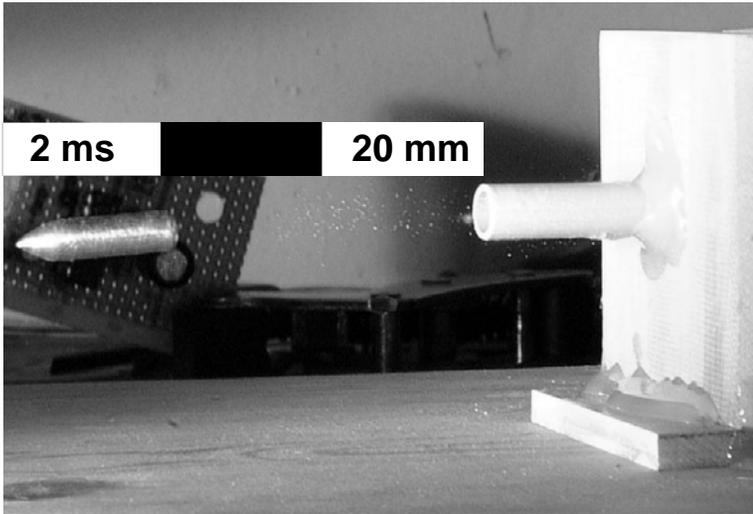


Abb. 34: Das Geschoss im Flug

Die Blitzaufnahme zeigt das Geschoss im Flug. Bei einer Verzögerungszeit von 2 ms errechnet sich die Geschwindigkeit zu 20 m/s, gar nicht so schlecht für diesen einfachen Aufbau.

Energie =  $0,5 \times \text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit im Quadrat}$

Bei einem Geschossgewicht von 3,3 g ist das eine Geschossenergie von 0,66 Joule. Das ergibt bei einer Kondensatorenergie von 55 Joule einen Wirkungsgrad von 1,2 %.

### 3.2 Einfache Spulenkano mit Hochspannungstreiber

Für weitere Experimente wird ein neuer, stärkerer Treiber aufgebaut. Er arbeitet mit einer Ladenspannung von 2500 V und wird aus Sicherheitsgründen ferngesteuert ausgelöst. Der offene Aufbau auf ein Holzbrett ist für diese Spannung eigentlich nicht mehr geeignet und sollte nur für kurze Versuche mit äußerster Vorsicht verwendet werden.

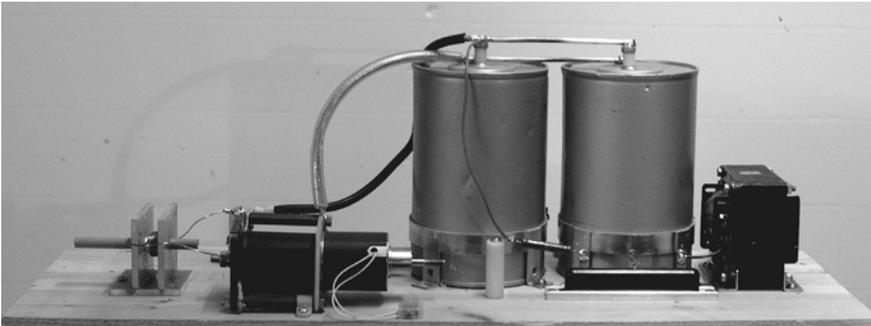


Abb. 35: Die Spulenkanone mit HV-Treiber

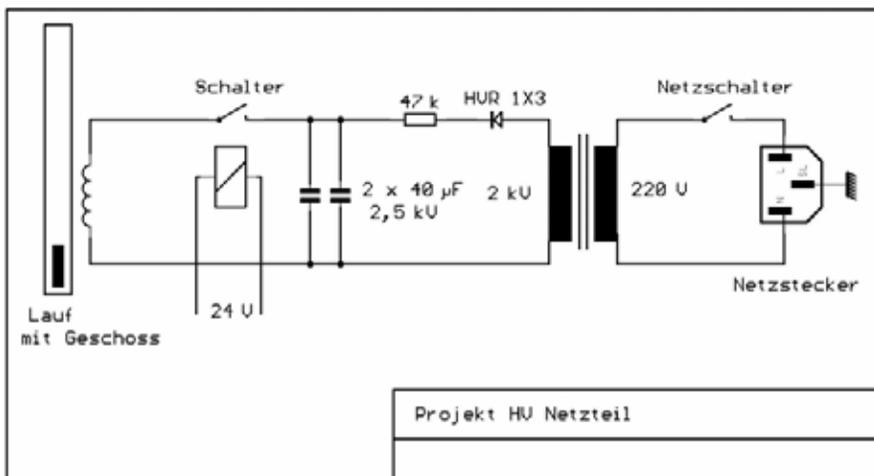


Abb. 36: Schaltschema des HV-Treibers

Besser und sicherer ist der Einbau der Schaltung in ein geerdetes Metallgehäuse. Die Schaltung ist äquivalent zur ersten. Ein Netzteil mit einem 2-kV-Trafo lädt die Kondensatorbank ( $2 \times 40 \mu\text{F}$  2,5 kV) über eine HV-Diode und einen Schutzwiderstand. Zum Schalten wird das Eigenbauteil (Kapitel 4) verwendet, das mit einer 24-V-Gleichspannung aus sicherer Entfernung ausgelöst wird. Der neue Treiber liefert dank der hohen Spannung und kleiner Kapazität stromstarke, kurze Pulse. Die erzielte Geschwindigkeit des Projektils beträgt etwa 40 m/s und die Energie 2,6 Joule. Bei einer Kondensatorenergie von 250 Joule errechnet sich der Wirkungsgrad zu 1 % somit etwas geringer als bei der Niederspannungsausführung.

### 3.3 Mehrstufige Spulenkanone mit Gleitkontakten

Durch die Hintereinanderreihung von Beschleunigungsstufen kann die Mündungsgeschwindigkeit beträchtlich erhöht werden. Bei dem folgenden Modell werden insgesamt sechs Stufen aufgebaut. Die Spulen der einzelnen Stufen sind mit einer Eisenkapselung versehen.

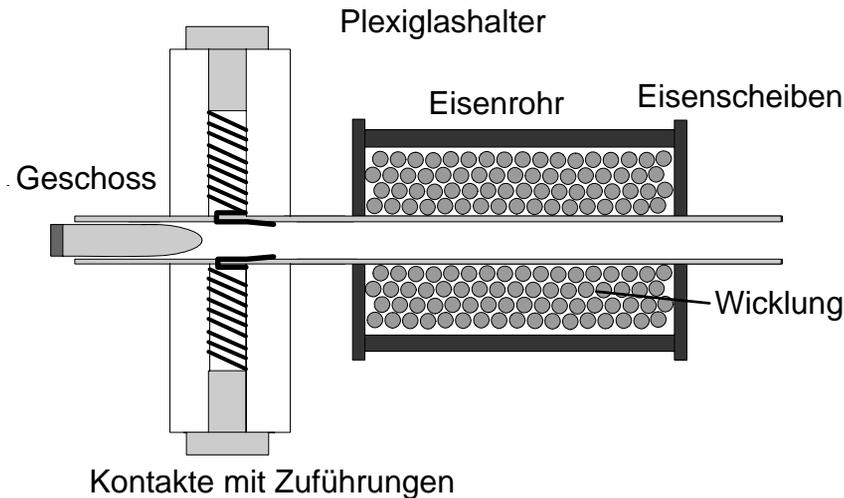


Abb. 37: Eine Stufe der sechsstufigen Kanone

Durch diese Kapselung werden die magnetischen Felder konzentriert und wirken stärker auf das Geschoss. Die Spulen werden direkt auf ein Kunststoffrohr mit 0,63 mm dicken CuL-Draht gewickelt. In vier Lagen sind 200 Windungen aufgebracht. Die Eisenarmierung besteht aus zwei Scheiben (sog. Karoseriescheiben) und einem Stück Eisenrohr. Die Synchronisation der Erregung der Spulen mit dem Flug des Geschosses übernehmen Gleitkontakte. Diese Kontakte schalten allerdings nicht den Spulenstrom, sondern triggern Triacs vom Typ TIC 263. Die Kontakte aus dünner Messingfolie wären nicht in der Lage, die hohen Ströme zu schalten. Die Triacs entladen im Triggerzeitpunkt die Speicherkondensatoren auf die Spulen. Trotz der vielen Stufen ist der Bauteileaufwand nicht groß. Pro Stufen werden nur ein Triac, ein Elko, zwei Widerstände und eine Gleichrichterdiode verwendet.

Wegen der Konzentration der Spulenfelder durch die Eisenkapselung muss das Geschoss zum Zeitpunkt des Stromflusses etwa zur Hälfte in die Spule eintauchen, damit es eine große anziehende Kraft erfährt. Das bedeutet dass sich die Triggerkontakte in der Spule befinden müssten, was konstruktiv nur schwer zu realisieren ist. Eine Möglichkeit, trotz außen liegender Kontakte, die Spule zum richtigen Zeitpunkt einzuschalten, wäre eine Zeitverzögerung zwischen der Kontaktgabe durch das Geschoss und dem Zündzeitpunkt der Triacs. Eine andere, einfachere Möglichkeit liegt in der teilweisen Isolation des Projektils. Dazu wird das Projektil mit isolierendem Lack überzogen, wobei der hintere Abschnitt blank bleibt.



Abb. 38: Das teilweise isolierte Geschoss

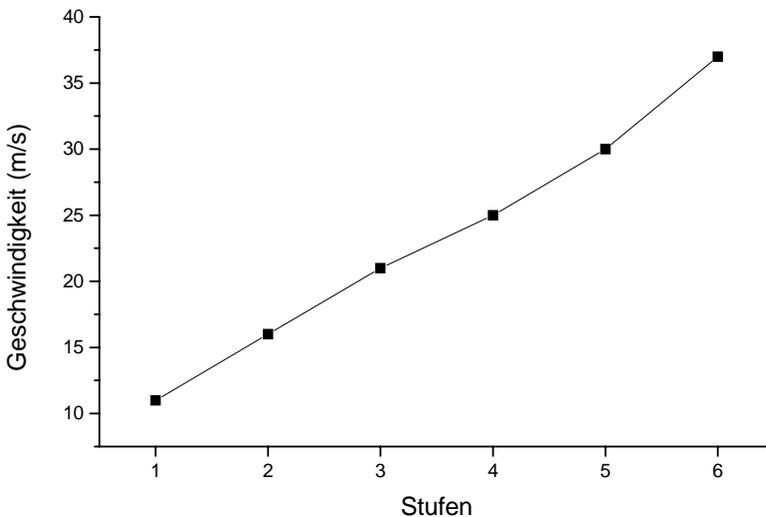


Abb. 39: Geschwindigkeitszuwachs pro Stufe

So wird die Spule erst eingeschaltet, wenn das hintere Ende des Geschosses über die Kontaktflächen gleitet.

Abgesehen von der ersten Stufe sind alle gleich aufgebaut. Die Speicherkapazität besteht aus zwei parallel geschalteten Elkos mit je  $470 \mu\text{F}$   $200 \text{ V}$ . Die Triacs TIC 263, welche die Kondensatoren auf die Spulen entladen werden durch die Gleitkontakte im Rohr getriggert. Die Speicherkapazität der ersten Stufe hat eine Kapazität von insgesamt  $1600 \mu\text{F}$ , hier wird der Triac durch einen Tastschalter getriggert.

Im obigen Diagramm wird die Geschwindigkeit mit der steigenden Stufenzahl dargestellt. Die Ladespannung der Kondensatoren beträgt hierbei  $180 \text{ V}$ . Nach der siebten Stufe wird eine Endgeschwindigkeit von  $37 \text{ m/s}$  erreicht. Das  $7 \text{ Gramm}$  schwere Geschoss hat eine Bewe-

gungsenergie von 4,7 Joule. Die Gesamtkapazität der Kondensatoren ist  $5 \times 940 \mu\text{F} + 1600 \mu\text{F}$ , die gespeicherte Energie bei 180 V beträgt 102 Joule, der Wirkungsgrad somit 4,7 % und ist damit deutlich höher als beim einstufigen Aufbau mit gleicher Endgeschwindigkeit.



Abb. 40: Die sechsstufige Spulenkanone

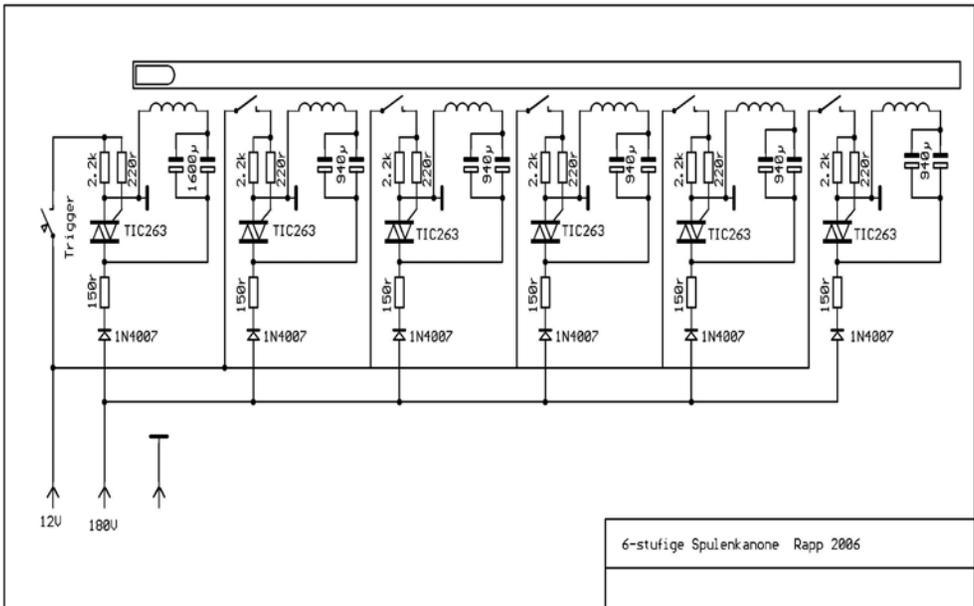


Abb. 41: Schema der sechsstufigen Coilgun

### 3.4 Mehrstufige Spulenkanone mit optischer Triggerung

Die nun folgende Coilgun ist etwas aufwendiger aufgebaut als ihre Vorgänger. Für den Lauf wird ein Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser von 5 mm und einer Wandstärke von 1 mm gewählt, genauso gut kann ein Glasrohr verwendet werden. Als Projektil wurden Passstifte aus Stahl, 1,1 g schwer und 4 x 12 mm groß verwendet. Da eine einfache Überlegung ergibt, dass es wenig Sinn hat, die Spulenlänge größer als die Geschosslänge zu machen, wurden 150 Wicklungen aus 0,6 mm CuL-Draht zu einer flachen Spule mit 12 mm Länge und 20 mm Durchmesser gewickelt. Begrenzt wird der Wickelraum durch Plastikscheiben, die auf das Rohr geklebt werden. Erregt wird die Spule durch den Strom von ca. 250 A aus einem 2000- $\mu$ F-Kondensator. Geschaltet wird hier mit einem kräftigen Thyristor. Erhöht man die Anzahl der Wicklungen und somit den Widerstand der Spule, kann man auch mit billigen Triacs vom Typ TIC 263 o. Ä. arbeiten.

Die erreichte Endgeschwindigkeit hängt sowohl von der Startposition des Projektils als auch von der Ladespannung des Kondensators ab. Folgende Diagramme zeigen diese Zusammenhänge.

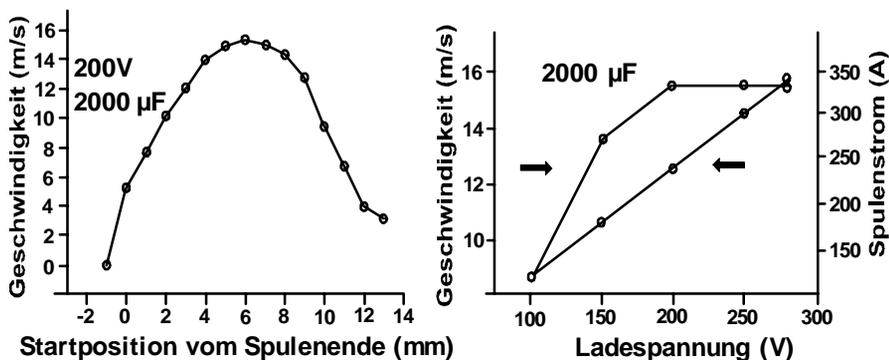


Abb. 42: Die Startparameter der Spulenkanone

Im rechten Diagramm ist zu sehen, dass die Geschwindigkeit trotz steigende Spulenstroms ab 330 A nicht mehr zunimmt, was wahrscheinlich auf die beginnende magnetische Sättigung des Eisenkerns zurückzuführen ist. Somit kann eine Steigerung der Geschwindigkeit nur mit weiteren Beschleunigungsstufen erzielt werden. Die weiteren Stufen sind identisch aufgebaut, nur dass hier die Triggerung mit Lichtschranken durch das fliegende Projektil selbst erfolgt. Die aus wenigen Bauteilen aufgebauten Lichtschranken sind in Plexiglasklötzchen direkt vor den Spulen angebracht.

Die zweite Stufe erhöht die Geschwindigkeit von 15 auf 25 m/s und die dritte Stufe verlässt das Projektil mit 36 m/s.



Abb. 43: Aufbau der Lichtschranke



Abb. 44: Dreistufige Spulenkanone

Abb. 44 zeigt die fertige dreistufige Coilgun, hinten die Kondensatoren, in der Mitte der Lauf mit den drei Spulen und Lichtschranken, darunter die Thyristoren.

Die Lichtschranke ganz rechts an der Mündung gibt einen Puls ab, wenn das Geschoss den Lauf verlässt. Dieser Puls kann zur Auslösung eines Fotoblitzes dienen.

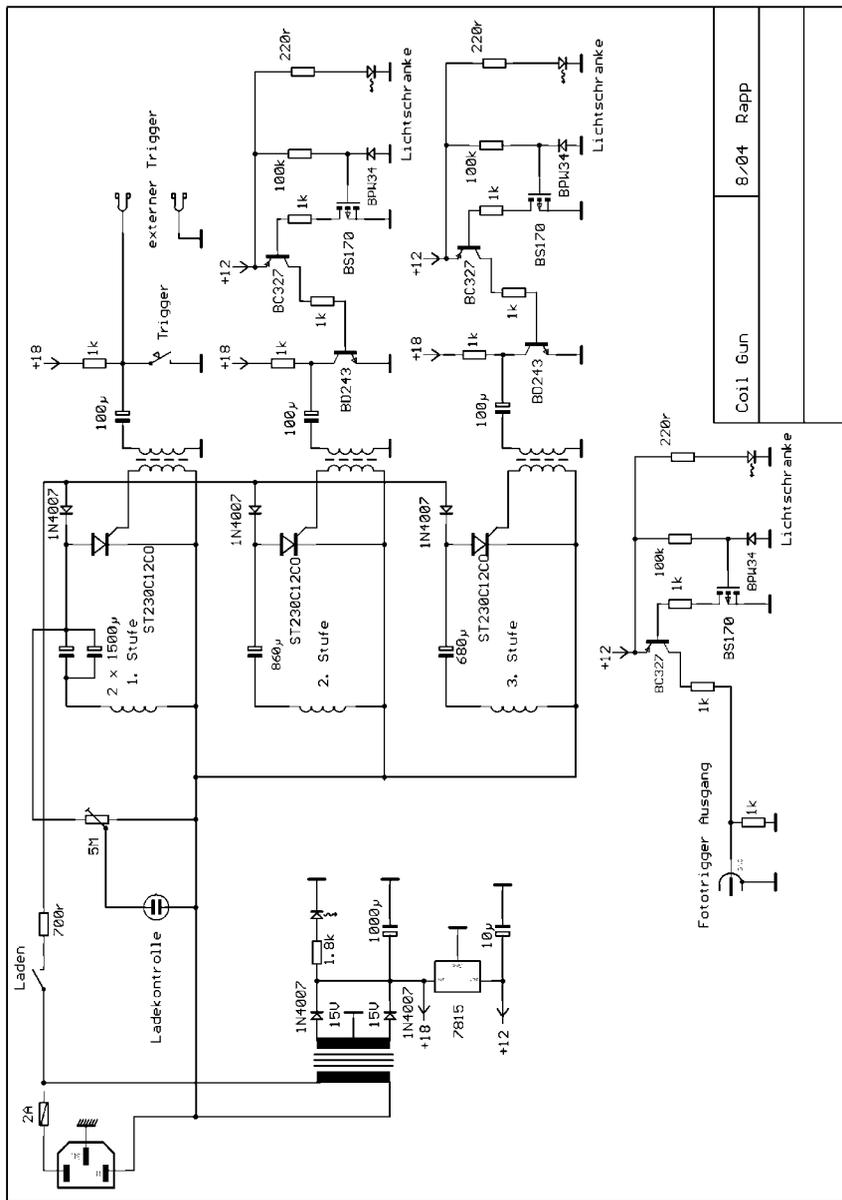


Abb. 45: Schaltschema der dreistufigen Spulenkanone

Der Schaltplan weist keine Besonderheiten auf. Die Kondensatoren werden direkt aus dem Netz über Einweggleichrichter geladen. Der Ladezustand wird mit einer Glimmlampe angezeigt. Ein Niederspannungsnetzteil versorgt die Triggerstufen. Diese Triggerstufen sind über Impulstransformatoren an die Thyristoren gekoppelt und haben somit keine galvanische Verbindung zu diesen. Deshalb kann an diesen Stufen gefahrlos gemessen werden. Noch besser wäre der Einsatz eines Trenntrafos auch für das Ladeteil.

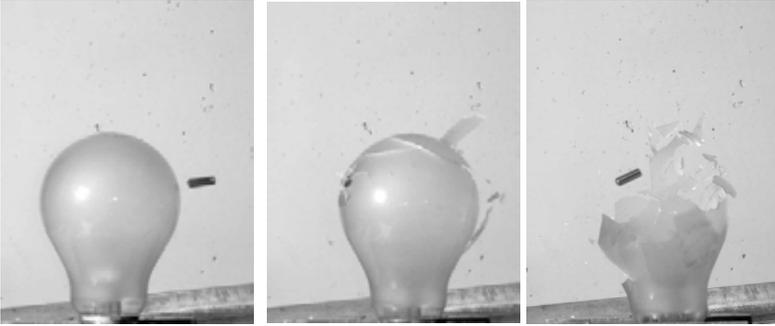


Abb. 46: Phasen des Schusses auf eine Glühlampe

### 3.5 Vierstufige Induktionsspulenkanone

Bei der Induktionsspulenkanone treten die Beschränkungen der Reluktanzkanone nicht auf, sodass der Energiezuwachs pro Stufe vergrößert werden kann. Das Projektil muss aus gut leitendem Material bestehen, damit die induzierten Wirbelströme möglichst groß werden. Am besten eignet sich ein Projektil aus Aluminium, das leicht ist und eine gute Leitfähigkeit besitzt. Allerdings ist die Ankopplung des Feldes der Spule an das Geschoss nicht so gut wie beim Eisenkerngeschoss und somit der Wirkungsgrad, zumindest bei kleineren Aufbauten geringer.

Um den Bauteileaufwand pro Stufe klein zu halten, wird das Prinzip der Serientriggerung angewandt. Das erlaubt die Verwendung einer Funkenstrecke mit nur zwei Elektroden. Außerdem kann die Beschleunigungsspule auch die Funktion des Triggertrafos übernehmen.

Die durch das passierende Geschoss zündende Trigger-Funkenstrecke entlädt den auf 6 kV geladenen Triggerkondensator über eine Hilfswicklung auf der Beschleunigungsspule. Der in der Beschleunigungsspule durch Induktion entstehende Spannungsstoß von 30 kV zündet die Hauptfunkenstrecke, die dann den 40- $\mu$ F-Hauptspeicher-Kondensator über die Beschleunigungsspule entlädt und damit das gepulste Magnetfeld zur weiteren Beschleunigung des Projektils erzeugt.

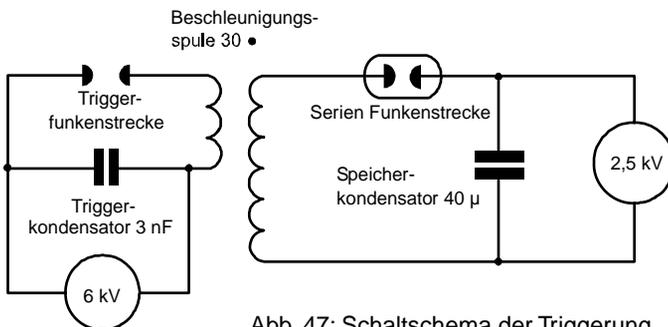


Abb. 47: Schaltschema der Triggerung

### 3.8 Fliegende Scheibe

Dank seiner kurzen, starken Pulse eignet sich der Hochspannungstreiber (siehe einfache Coilgun) gut für den folgenden Flachspulenversuch. Mit dem Magnetfeld der Flachspule können durch Wirbelströme gut leitende Platten beschleunigt werden.

Die Spule ist aus kunststoffisoliertem Installationsdraht gewickelt und mit der Heißklebepistole auf dem Holzbrett fixiert. Als Geschosse dienen flache Scheiben aus Alublech, die auf die Spule gelegt werden.

Das Bild zeigt zwei Schüsse mit der Flachspule bei einer Ladespannung von 2,3 kV.

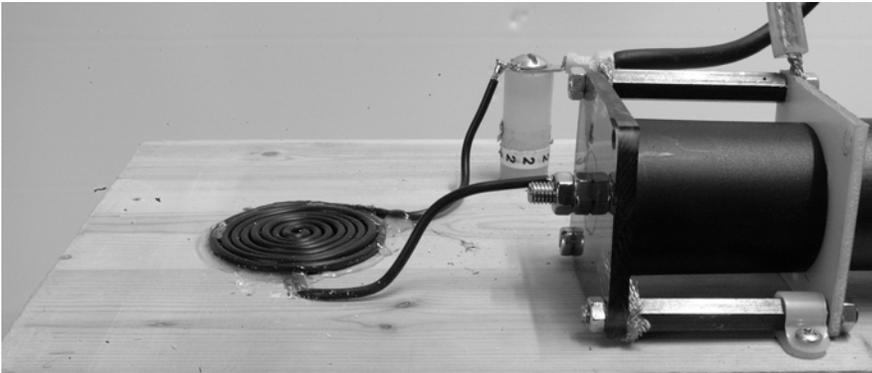


Abb. 63: Die Treiberspule der fliegenden Scheibe

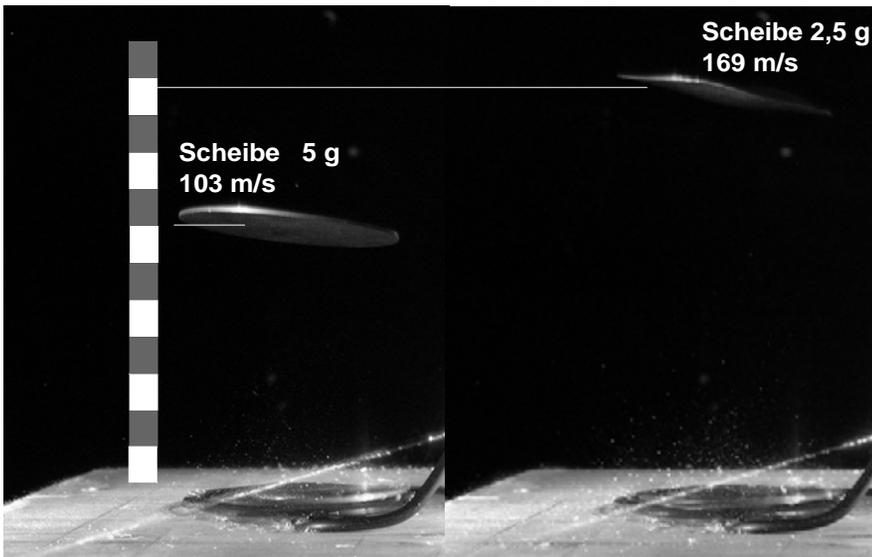


Abb. 64: Die Scheiben im Flug

Tab. 4: Flugdaten für Aluscheiben

	<b>Scheibe 1</b>	<b>Scheibe 2</b>
Gewicht	5 g	2,5 g
Geschwindigkeit	103 m/s	169 m/s
Kinetische Energie	26 J	35 J
Ladespannung	2,3 kV	2,3 kV
Kondensatorenergie	211 J	211 J
Wirkungsgrad	12 %	17 %

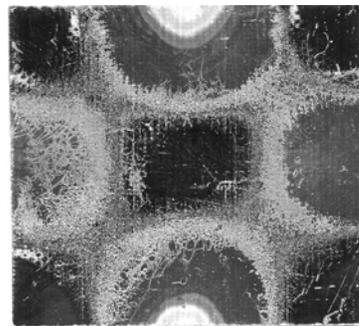


Abb. 65: Visualisierter Stromfluss in einer Kupferfolie

Der Wirkungsgrad ist mit 12 % bzw. 17 % recht hoch, was an der guten magnetischen Ankopplung der Scheiben an die Spule liegt. Interessant ist das Bild der Stromverteilung, das man erhält, wenn man eine dünne Kupferfolie auf die Spule legt. Die Anlauffarben des durch Ströme erhitzten Kupfers zeigen die Verteilung der Wirbelströme.

Man sieht, dass im Zentrum des Quadrats kein Strom fließt, also könnte man die Scheibe auch durch einen flachen Ring ersetzen.

### 3.9 Prallplattenbeschleuniger

Wie bei den vorhergegangenen Experimenten arbeitet der Prallplattenbeschleuniger mit Wirbelströmen. Die beschleunigte Platte dient aber nur als Träger für das eigentliche Projektil. Die Platte wird nach einem kurzen Weg gestoppt, während das Projektil ungehindert weiter fliegt. Auch hier ist es von Vorteil, Reinaluminium (99,5 %) wegen der hohen Leitfähigkeit für die Trägerplatte zu verwenden.

Auf der Trägerplatte liegt das eigentliche Projektil, eine Stahlkugel mit 3 mm Durchmesser. Während die Trägerplatte nach wenigen Zentimeter von einer massiven Scheibe gestoppt wird fliegt das Projektil ungehindert durch ein Loch in der Stopperplatte weiter.

Die Kondensatorbatterie besteht aus zwei HV-Kondensatoren mit zusammen 80  $\mu\text{F}$  und 3,5 kV Ladespannung. Als Schalter dient die Funkenstreckeneinheit, welche ausführlich im Kapitel 4 beschrieben ist.

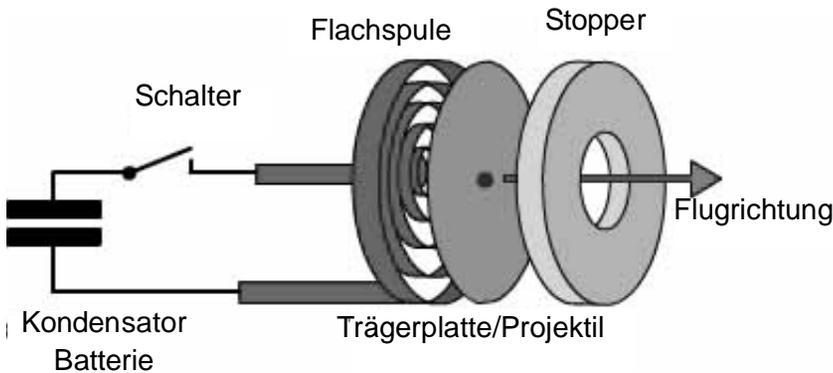


Abb. 66: Schema des Prallplattenbeschleunigers

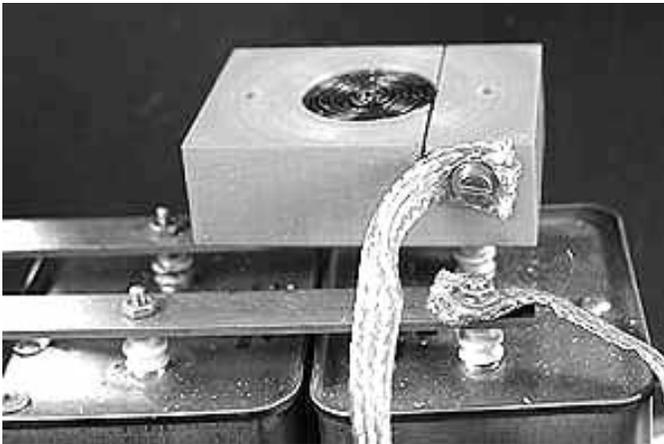


Abb. 67: Die gekapselte Treiberspule auf der Kondensatorbank

Für die Spule wird ein 1 cm breiter 0,5 mm dicker Streifen aus weichem Kupferblech verwendet. Der Streifen wird mit Isolierband mehrfach umwickelt, dann zu einer Flachspule mit ca. 20 Wicklungen gerollt und in eine Vertiefung in einer PVC-Platte gepresst. Diese Umhüllung ist sehr wichtig, da die expandierenden Kräfte in der Spule sehr groß werden und die Spule ohne Umhüllung bersten könnte. Zusätzlich wurde die Spule mit einem Kunststoffplättchen abgedeckt, um Überschlüge von der Spule auf die Aluscheibe zu vermeiden. Die vorhergehende Abbildung zeigt wie die Spule direkt über den Kondensatoren montiert wird, um kurze Leitungen zu erhalten. Die beiden Kupfergeflechtstreifen führen zur Funkenstrecke.

Mit steigender Ladespannung der Kondensatorbatterie steigt auch die Geschwindigkeit der Scheibe. Alle Aufnahmen in obiger Abbildung wurden mit 300  $\mu$ s Verzögerung des Blitzes gemacht, so lässt sich aus der zurückgelegten Strecke die Geschwindigkeit berechnen.

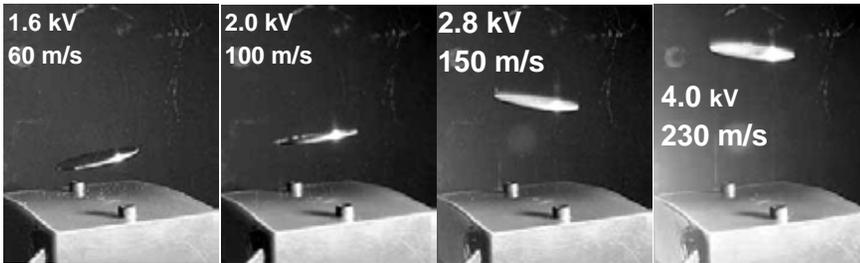


Abb. 68: Der Flug der Scheibe bei verschiedenen Ladespannungen

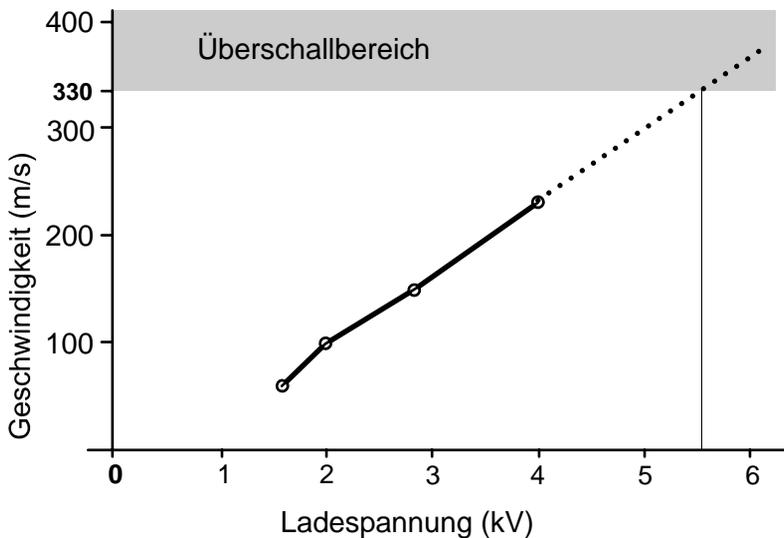


Abb. 69: Spannungs-/Geschwindigkeitsdiagramm

Das Diagramm in der Abbildung zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Ladespannung und Geschwindigkeit. Eine Extrapolation zeigt, dass bei ca. 5,5 kV die Schallmauer erreicht würde, was allerdings mit den vorhandenen Kondensatoren nicht möglich war, die bei 4 kV schon gefährlich überladen wurden.

Für weitere Versuche wurde nun in 2 cm Abstand über der Spule die massive Stopperscheibe aus Aluminium angebracht.

Die Momentaufnahme in obiger Abbildung zeigt den Ablauf eines Schusses 300  $\mu$ s nach der Auslösung. Die Trägerscheibe wurde gestoppt und prallt gerade zurück, während sich die kleine Stahlkugel im freien Flug mit ca. 100 m/s Geschwindigkeit befindet.

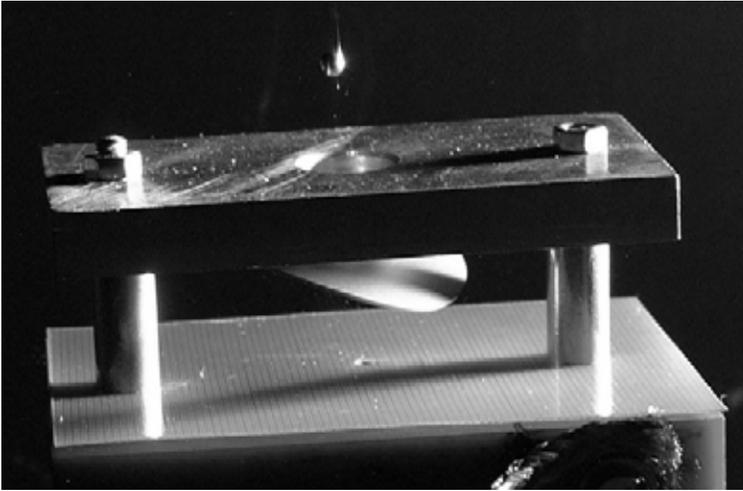


Abb. 70: Die beschleunigte Stahlkugel im Flug

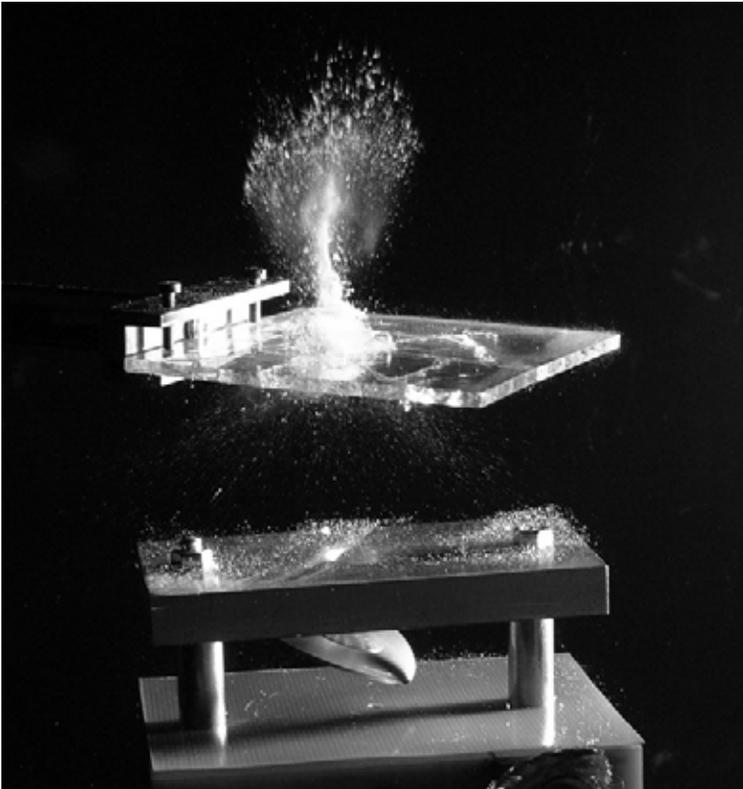


Abb. 71: Die Stahlkugel zerstäubt eine Glasplatte

Eine zeitgemäßere Art den Pendelausschlag zu messen, wäre die Verwendung einer Videokamera oder einer Digitalkamera mit Videofunktion. Durch die Auswertung der Einzelbilder lässt sich die Ausschlaghöhe leicht ermitteln.

## 5.7 Die Wurfparabel

Eine noch einfachere Methode als das ballistische Pendel ist die Vermessung der Wurfparabel. Dabei wird der Höhenunterschied zwischen Abschussort und Einschlagsort des Projektils in einer gemessenen Entfernung bestimmt.

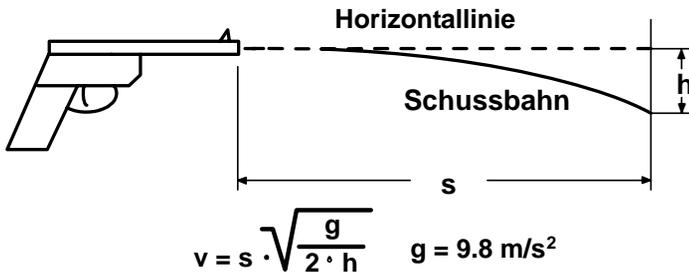


Abb. 136: Geschwindigkeitsmessung mit Wurfparabel

Allerdings ist diese Methode mit großen Messfehlern behaftet. Bei leichten Geschossen und größeren Geschwindigkeiten spielt der Luftwiderstand oder eventueller Auftrieb des Geschosses eine große Rolle und es ist auch nicht ganz einfach, die Kanone exakt wagrecht auszurichten. So wurde bei der Messung mit der Luftpistole trotz Laserjustierung nur ein Wert von 44 m/s gemessen. Die wahre Mündungsgeschwindigkeit liegt bei 94 m/s. Der niedrige Wert resultiert wahrscheinlich aus dem Luftwiderstand der Diabolokugel, der sich auf die Messstrecke von 370 cm stark auswirkt.

### Messung der Geschwindigkeit durch die Eindringtiefe

Nach Poncelet, einem französischen Ingenieur und Mathematiker, kann die Eindringtiefe eines Geschosses berechnet werden. Und umgekehrt kann aus der Eindringtiefe die Geschwindigkeit ermittelt werden. Man schießt z. B. auf ein Holzbrett und misst wie weit das Projektil eingedrungen ist. Dabei darf das Brett natürlich nicht durchschossen werden, sondern das Geschoss muss stecken bleiben.

$v = \sqrt{\frac{K \left( \frac{x}{M} \right)^2}{D \left( e^{(2 \cdot D \cdot A)} - 1 \right)}}$	<b>v</b> Geschwindigkeit
	<b>x</b> Eindringtiefe
	<b>M</b> Geschossmasse
	<b>A</b> Geschossquerschnitt
	<b>D</b> Dichte (Holz)
	<b>K</b> Schermodul (Holz)

Abb. 137: Formel nach Poncelet

Da verschiedene Parameter des Bretts wie Dichte und Schermodul nicht bekannt sind, wird zuerst mit der Luftpistole bekannter Mündungsgeschwindigkeit auf das gleiche Stück Holz geschossen. Damit können die Konstanten für das Holz bestimmt werden und anschließend die Geschwindigkeit des Testprojektils berechnet werden.

Obwohl man von dieser Messmethode keine allzu große Genauigkeit erwarten darf, ist sie in manchen Fällen gut zu gebrauchen, wenn andere Methoden nicht anwendbar sind.

## 5.8 Elektronische Geschwindigkeitsmessung

Den mechanischen Methoden an Genauigkeit weit überlegen sind die elektronischen Messungen. Am einfachsten ist die Geschwindigkeit des Geschosses mit einer oder mehreren Lichtschranken zu messen. Aus der Zeit zwischen den von den Lichtschranken abgegebenen Pulsen und dem Abstand der Lichtschranken wird sofort die Geschwindigkeit des Projektils erhalten. Am einfachsten erfolgt diese Zeitmessung mit einem Speicheroszilloskop. Da die in Frage kommenden Zeiten nicht sehr kurz sind, sie bewegen sich im Bereich von  $100 \mu\text{s}$  bis  $10 \text{ ms}$ , sind die Ansprüche an das Oszilloskop nicht sehr hoch und es genügen die bereits erwähnten billigen Einsteckkarten für einen PC oder ein USB ADC mit passender Software. Man könnte die Zeiten auch mit einem elektronischen Zähler messen, aber das Oszillogramm bietet den Vorteil, dass man den Einfluss etwaiger Störpulse sofort erkennt.

Die Lichtschranken kann man einfach selber bauen. Für die erforderlichen Lichtquellen verwendet man am besten Halbleiterlaser in Form billiger Laserpointer. Der auch ohne aufwendige Optik gut definierte Strahl gestattet eine einfache Justierung der Lichtschranke.

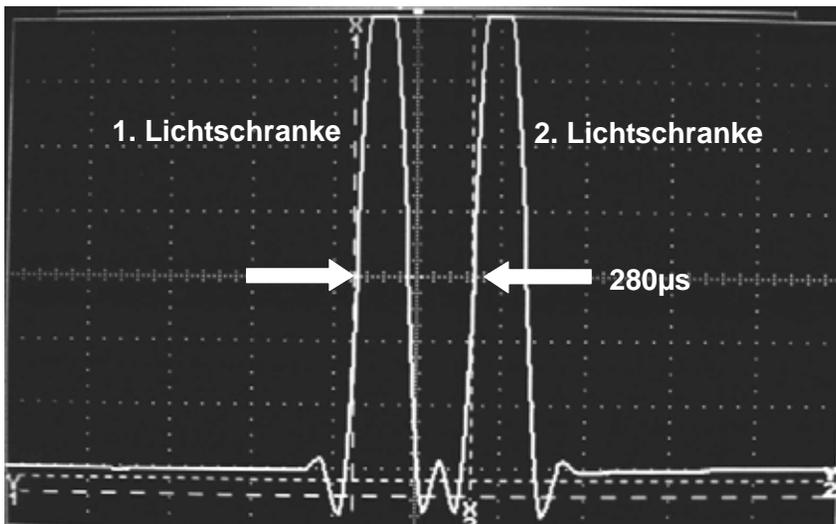


Abb. 138: Die kombinierten Impulse beider Lichtschranken

Für die Empfängerseite werden leicht erhältliche Photodioden vom Typ BPW 34 verwendet. Diese Photodiode hat eine große empfindliche Fläche von 1,5 x 1,5 mm, was ebenfalls zur Einfachheit der Ausrichtung beiträgt. Beide Lichtschranken werden in einem geringen Abstand von etwa 10 cm angeordnet. Um auch Messungen mit einem Einkanal-Oszilloskop zuzulassen, werden die Signale beider Lichtschranken über ein NAND-Gatter zusammengefügt. Auf dem Oszillogramm sieht man die kombinierten Pulse der beiden Lichtschranken.

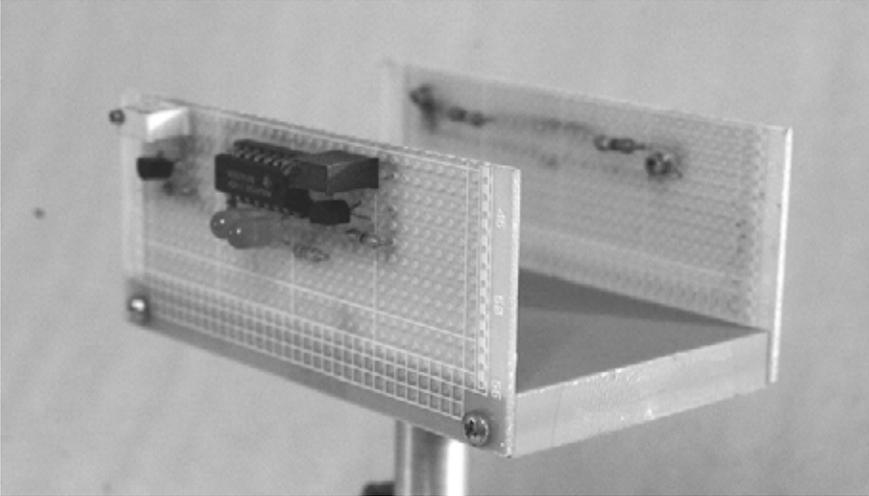


Abb. 139: Aufbau der Doppellichtschranke

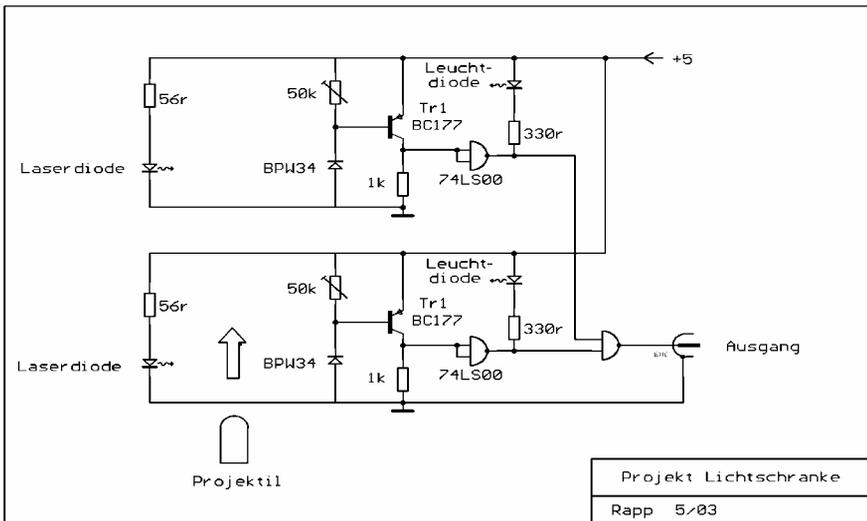


Abb. 140: Auswertelektronik der Lichtschranken

## 5.9 Hochgeschwindigkeitsfotografie

Eine andere Möglichkeit der Geschwindigkeitsmessung nimmt die Fotografie zu Hilfe. Nach dem Durchflug des Geschosses durch eine Lichtschranke wird eine Verzögerungsschaltung getriggert und nach Ablauf der Verzögerungszeit löst diese Schaltung den Blitz aus. So kann aus dem Weg des Projektils von der Lichtschranke bis zur Stelle, an der es geblitzt wird und der Verzögerungszeit die Geschwindigkeit gemessen werden. Zusätzlich erhält man noch beeindruckende Bilder vom Geschoss im Flug. Verwenden kann man jede Kamera die eine lange Verschlusszeit von 0,5 Sekunden und größer erlaubt. Natürlich ist eine Digitalkamera die bessere Wahl, da man die Aufnahmen sofort betrachten und gegebenenfalls korrigieren kann. Die Verzögerungseinheit und den Blitz baut man am besten selbst. Die Blitzzeit sollte kleiner als  $100 \mu\text{s}$  sein, um auch von schnellen Geschossen scharfe Bilder zu erhalten und nur wenige käufliche Blitzgeräte erlauben eine direkte Einstellung der Blitzzeit.

Zur Aufnahme eines Fotos wird zuerst an der Kamera eine lange Belichtungszeit eingestellt und dann der Verschluss im abgedunkelten Raum geöffnet. Während der Aufnahmezeit wird der Schuss abgegeben, der dann über die Lichtschranke den Blitz auslöst. So wird die Aufnahmezeit nicht mehr durch den Kameraverschluss bestimmt, sondern nur durch die Dauer des Blitzes.

## 5.10 Kurzzeitblitzgerät

Da das Blitzgerät aus dem Netz betrieben wird, ist die Schaltung sehr einfach. Für eine kurze Blitzzeit muss der Blitzkondensator eine kleine Kapazität haben, Werte wie in käuflichen Blitzgeräten von einigen hundert Mikروفarad sind hier viel zu groß. Der Wert sollte bei einem Mikروفarad liegen. Ein kleiner Kondensator speichert weniger Energie und somit sinkt die Leuchtstärke des Blitzes. Um die Verringerung der Leuchtstärke auszugleichen, wird die Blitzspannung von den üblichen 300 V auf einige tausend Volt erhöht, muss aber deutlich unter der Selbstzündungsspannung der verwendeten Blitzröhre liegen. So muss je nach Blitzröhre eventuell mit verschiedenen Ladespannungen experimentiert werden.

Bei der vom Verfasser verwendeten Röhre (Blitzröhre UB1, Sander Elektronik) liegt die Selbstzündungsspannung bei 4 kV, sodass das Netzgerät für eine Kondensatorladespannung von 3 kV ausgelegt wurde.

Ein Netztrafo liefert über einen Einweggleichrichter diese Spannung. Der erforderliche Zündpuls wird mit einer Thyristor-Kondensatorschaltung über einen Zündtrafo (Zündtrafo ZTR 200, Sander Elektronik) erzeugt. Die Hilfsspannung von 300 V für den Thyristor wird mit einem Spannungsteiler aus der Hochspannung erzeugt. Der Thyristor erhält den Triggerpuls über einen kleinen Triggertrafo, der aus zwei Wicklungen mit je 20 Windungen auf einem Ringkern besteht. Die gesamte Blitzelektronik wird in ein passendes Gehäuse eingebaut und die Blitzlampe in den Reflektor eines Fahrradlichts eingeklebt, um eine bessere Ausleuchtung der Szene zu erhalten. Beim Einkleben ist darauf zu achten, dass die Spannung führenden Anschlüsse der Lampe, besonders der Triggeranschluss, genügend Abstand

# Sachverzeichnis

## A

Akkumulatoren 28  
augmented Railgun 22

## B

Ballistische Pendel 99  
Batterie 28, 82  
Birkeland 9, 10

## C

Center of Electromechanics 116  
Coilgun 14  
Compulsator 30

## D

Darlington Transistoren 85  
Diabolokugel 101  
Dielektrische Schalter 93

## E

Elektrische Armbrust 74  
Elektrische Schleuder 72  
Elektrolytkondensatoren 80  
Elektronische Geschwindigkeitsmessung  
102  
Elektrothermische Kanone 76  
Elko 28, 80  
EMA1 122  
Energiedichte 27  
Energieversorgung 26  
ETH Gun 25

## F

Fauchon-Villeplee 10  
Fliegende Scheibe 54  
Fliegender Ring 16, 52  
Fluxkompressor 31

Funkenstrecken 89

Funkenstreckeneinheit 91

## G

Gasgun 123  
Geschwindigkeitsmessung 99  
Green Farm 116

## H

Hänsler 12  
HARP 123  
Hochgeschwindigkeitsfotographie 104  
Hochleistungsrailgun 65  
Hochleistungsschalter 83  
Hochspannungskondensator 80  
Hochspannungstreiber 36  
Hochvoltelko 81  
Homopolargeneratoren 29

## I

IGBTs 85  
Ignitron 87  
Induktionskanone 20  
Induktionsspulenkanone 43  
Inverse Spulenkanone 31

## K

Kirkcudbright 120  
Kondensatoren 82  
Kurzzeitblitzgerät 104

## L

Lawrence Livermore National Laboratory  
115  
Leidener Flaschen 9  
Lichtschranke 102  
Lichtvorhang 111

**M**

Marshall 115  
Mechanische Schalter 83  
Mehrstufige Reconnection Gun 61  
Mehrstufige Spulenanone 19, 38, 41  
MHD-Generator 32  
Monoflop 106  
Mosfets 85  
MP-Kondensatoren 28  
Mustang 122

**N**

Northrup 11, 13

**O**

Optokoppler 107  
Oszillogramm 83  
Oszilloskop 96

**P**

Pegasus 122  
Permanentmagnet 18  
Photodiode 103  
PIC Prozessor 107  
Plasma Railgun 62  
Plasmaarmatur 24, 68  
Plasmabeschleuniger 26  
Poncelet 101  
Prallplattenbeschleuniger 55

**R**

Railgun 20, 61  
Reconnection Coilgun 17, 59  
Reluktanz 20  
Reluktanzkanone 15

Reluktanzstufe 46  
Rogowskispule 97

**S**

Schienenkanone 61  
Schienenkanonen 20  
Scope Card 220 96  
Sensoren 110  
Sicherungsautomat 83  
Spannungsmessung 96  
Speicheroszilloskop 95  
Spule 28, 82  
Spulenanone 14, 34  
Statorspule 20  
Strommessung 96  
Supraleiter 18

**T**

Thermoelektrische Kanonen 25  
Thyratron 87  
Thyristor 85  
Transistor 85  
Triac 85

**V**

Verzögerungseinheit 106  
Verzögerungsgenerator 107

**W**

Wanderwellenerregung 20  
Wasserstoffthyatron 87  
Wechselstromgenerator 30  
Wirbelstrom Spulenanone 16  
Wurfparabel 101

Thomas Rapp



# Experimente mit Electric Guns

Geschichte, Grundlagen und Selbstbau elektronischer Kanonen

Seit dem amerikanischen SDI-Projekt, besser bekannt unter dem Namen „Krieg der Sterne“, und der weiten Verbreitung von Computer-Ballerspielen sind futuristische Waffensysteme wie Coil- und Railguns einem breiten Publikum zwar bekannt, wurden aber noch nicht zusammenfassend beschrieben. Dieses Buch bietet eine Übersicht über die historische Entwicklung und erläutert die zu Grunde liegenden technischen und physikalischen Prinzipien dieser Waffen.

Ausführlich beschriebene, einfache bis anspruchsvolle Selbstbauprojekte ermöglichen eigene interessante Experimente. Dazu gehören Coil- und Railguns, Wirbelstromschleudern, fliegende Ringe und Plasmakanonen. Darüber hinaus werden die erforderlichen speziellen Bauelemente wie Thyatron, Ignitron und Funkenstrecken in ihrer Funktion erklärt.

Ein eigenes Kapitel ist der zur Charakterisierung notwendigen Messtechnik gewidmet. Abschließend werden aktuelle Projekte aus wissenschaftlichen und militärischen Forschungslabors beschrieben, die der breiten Öffentlichkeit im Allgemeinen nur schwer zugänglich sind.

## **Aus dem Inhalt:**

Geschichtliche Entwicklung • Prinzipien der elektrischen Beschleunigung • Selbstbauprojekte • Spezielle Bauteile • Messtechnik • Aktuelle wissenschaftliche und militärische Projekte

ISBN 3-7723-4394-5



9 783772 343940

EUR 19,95 [D]