

SPAM – Stand 22.12.2017

SP.A.M.
(„Spee Acceleration Machine“)

Ein Projekt der Physik AG

unterstützt vom

Förderverein des Friedrich Spee Kolleg

Lehrer:

Dr. Hagel Johannes (Leitung, Fächer Physik-Mathematik))
Ekkehard Fichtner (Fächer Physik-Mathematik))

Studierende:

Begier, David
Blöß, Sebastian
Juch, Benedikt
Knepper, Laura Tonia
Rausch, Johannes
vom Dorff, Falk

Externe technische Beratung:

Dipl. Ing. Ass. Prof.Dr. Klaus Krischan , TU-Graz,
Institut für elektrische Antriebstechnik

Kurzbeschreibung des Projektes SPAM

Im Sommersemester des Schuljahres 2015/16 wurde eine Arbeitsgemeinschaft der Fachschaft Physik am Friedrich Spee Kolleg unter Leitung von Herrn Dr. Hagel gegründet und mit dem Projekt der Planung und Konstruktion eines „Modellbeschleunigers“ betraut. Mit Hilfe dieses Gerätes soll

- die Funktionsweise eines modernen Teilchenbeschleunigers vom Synchrotron-Prinzip anschaulich dargestellt werden,
- ein real funktionierender Beschleuniger für Kugelmassen realisiert werden, der für konkrete Experimente verwendet werden kann und soll und schließlich
- Team- und Projektarbeit zur Verwirklichung eines anspruchsvollen technisch / wissenschaftlichen Zieles geübt und praktiziert werden.

Als Ziel wurde zu Beginn formuliert, mit dem zur Verfügung stehenden Budget aus der Unterstützung des Fördervereins innerhalb eines Jahres einen elektromagnetischen Kreisbeschleuniger nach dem Synchrotron-Prinzip zu bauen, der in der Lage ist, eine Stahlkugel mit einer Masse von 5g und einem Durchmesser von 1cm im Inneren eines Torus aus transparentem PVC von 3m Umfang auf eine Geschwindigkeit von 10m/s zu beschleunigen.

Dies ist ein relativ umfangreiches und anspruchsvolles Unterfangen, welches Fertigkeiten aus dem Gebiet der Physik, Elektrotechnik, Steuerungs- und Leistungselektronik sowie der Programmierung und Verschaltung von Mikroprozessoren (Controlern) erfordert. Daraus ergab sich für die Mitglieder der AG als auch für die Gruppenleitung die Notwendigkeit, hinzuzulernen bzw. sich entsprechende Fertigkeiten anzueignen. Außerdem muss eine Arbeitsatmosphäre geschaffen und gestaltet werden, die Teamarbeit stetig ermöglicht, den Austausch verschiedener Fähigkeiten gewährleistet und eine gewisse Begeisterung und den Ehrgeiz, das gesteckte Ziel zu erreichen, beinhaltet.

Die Gruppe traf und trifft sich immer noch regelmäßig einmal wöchentlich nach dem regulären Unterricht, dazwischen arbeiten wir zusammen und auch unabhängig voneinander an Teilaspekten des Projektes.

Der aktuelle Stand ist, dass wir von der erzielten Geschwindigkeit her 95% unseres Zieles erreicht haben, wobei Geschwindigkeiten über 8m/s zur Zeit nur kurzzeitig erreicht werden. Daran soll noch weiter gearbeitet werden und es steht zu erwarten, dass schon kurzfristig ein Dauerbetrieb mit 10m/s zur Verfügung stehen wird.

Funktionsweise des Modellbeschleunigers

Abbildung 1 und 2 zeigen die verwendete Methode der elektromagnetischen Beschleunigung:

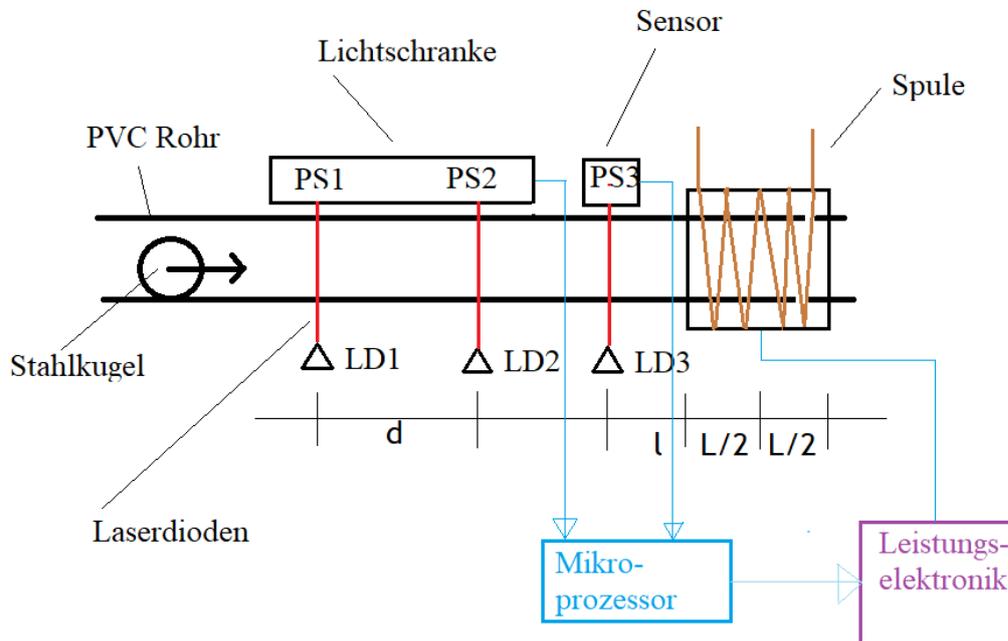


Abb1. Schema der Beschleunigungsmethode in SPAM

Die eigentliche Beschleunigung erfolgt mit einer Hohlspule von 300 Kupferdrahtwindungen und einer Länge von $L = 7\text{cm}$. Allerdings würde die Stahlkugel im Falle eines konstanten Einschaltens des Spulenstromes nur um die Mitte des Magneten hin und her schwingen (Oszillation) und keine Nettobeschleunigung aufweisen. Dies gelingt nur, wenn man den Strom beim Eintritt in die Spule einschaltet und ihn spätestens vor Erreichen der Spulenmitte wieder abschaltet, sodass der in der ersten Spulenhälfte erzielte Geschwindigkeitszuwachs erhalten bleibt. Im Idealfall muss also die Einschaltzeit der Spule mit der Umlaufgeschwindigkeit der Kugel synchronisiert werden, um eine andauernde Beschleunigung zu erhalten (Synchrotron-Prinzip). Dies wird durch die in Abb. 1 gezeigte Anordnung gewährleistet:

Die Kugel passiert zunächst die Lichtschranke, indem sie hintereinander die beiden Laserstrahlen aus den Laserdioden LD1 und LD2 unterbricht, welche sich in konstantem Abstand von $d = 10\text{cm}$ voneinander befinden. Diese Unterbrechungen werden von den Fotosensoren PS1 und PS2 in Digitalsignale verwandelt, die den Mikroprozessor erreichen. Dieser errechnet aus der zeitlichen Differenz t_d der Signale sowie der Distanz d die Geschwindigkeit der Kugel vor dem Spuleneintritt:

$$v = \frac{d}{t_d}$$

Mittels der so erfassten Geschwindigkeit berechnet nun der Prozessor unmittelbar, wie lange die Magnetspule an dem Moment eingeschaltet werden muss, an dem die Kugel den Sensor PS3 passiert, damit sie wieder abgeschaltet wird, bevor die Kugel die Spulenmitte erreicht. Bei Passage von PS3 wird der Spulenstrom über die Leistungselektronik dann vom Prozessor gesteuert genau für diese berechnete Zeit angeschaltet und die Kugel erfährt eine entsprechende Beschleunigung.

In Abb. 2 ist der entsprechende Aufbau zu sehen. Unten links die Lichtschrankenkombination für die Geschwindigkeitsmessung, direkt dahinter jene für den Sensor. Rechts des Beschleunigungsrohres sind die drei Laserdioden zu sehen. Rechts der Mitte befindet sich der Prozessor, ein Arduino Controller (16Bit), auf welchem das in C++ geschriebene Steuerprogramm läuft. Direkt darunter sieht man noch einen Teil der Starterelektronik, während sich direkt links der Spule die Leistungselektronik (MosFet) samt der entsprechenden Ansteuerungsschaltung befindet.

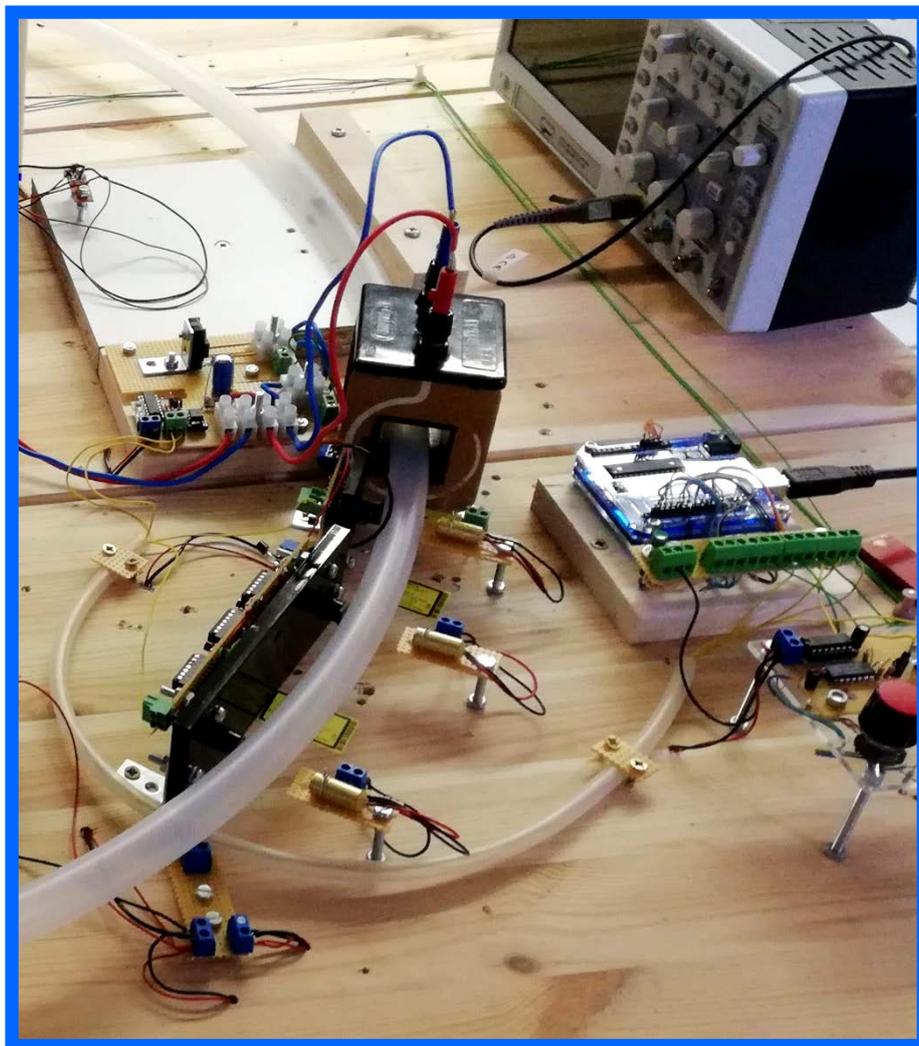


Abb. 2 Zentrale Beschleunigungseinheit

Abb. 3 zeigt die Gesamtansicht des Projektes, das entlang des gesamten Kreises von 3m Umfang zwei identische, gegenüberliegende Beschleunigungseinheiten enthält. An vier Positionen wird der Kreis von massiven Holzplatten fest zusammengehalten, da bei höheren Geschwindigkeiten gemäß der Beziehung

$$F_z = \frac{mv^2}{r} \quad \text{bzw.} \quad a_z = \frac{v^2}{r}$$

bereits erhebliche Zentrifugalkräfte auftreten, was dazu führt, dass die Kugel bei 10m/s bereits mit dem 20-fachen ihres Eigengewichtes nach Außen gedrückt wird ($a_z = 20g$).

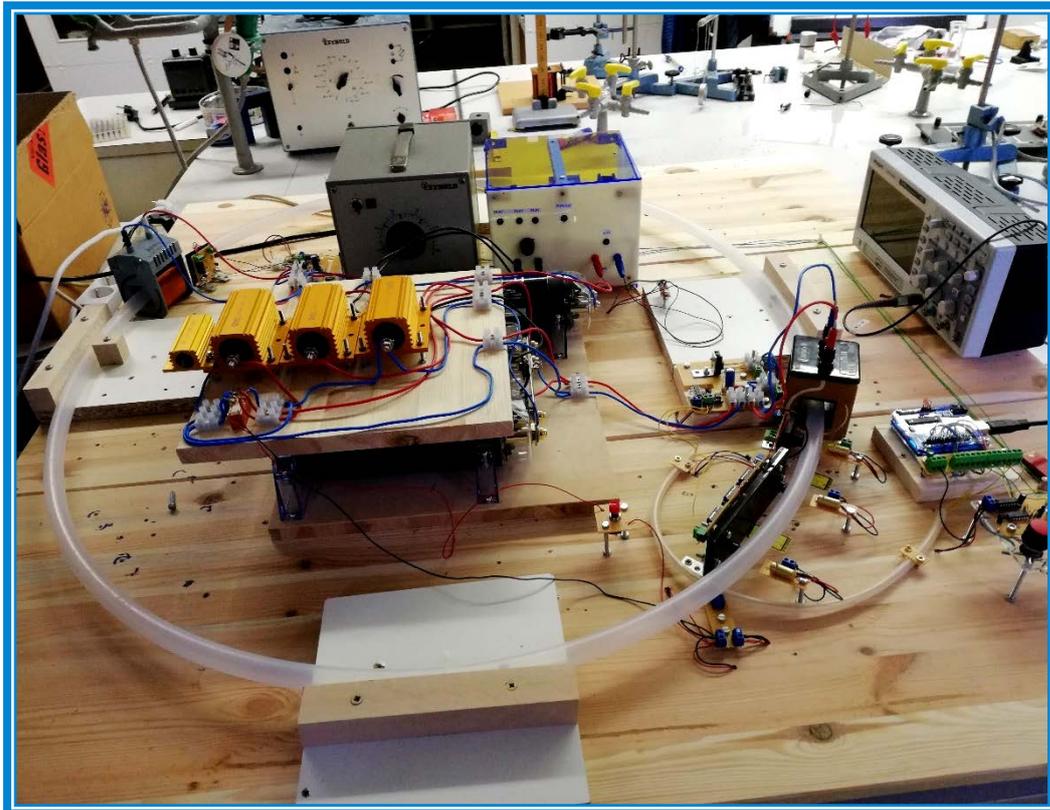


Abb. 3 Gesamtansicht des Beschleunigers

Zusammenfassung, und Ausblicke

Das Projekt SPAM wurde im Lauf des Sommersemesters 2016 und im Wintersemester 2017/18 über eine Zwischenstufe (eine „Machbarkeitsstudie“) in der oben beschriebenen Form realisiert und vollständig aufgebaut und nimmt etwa $4m^2$ der Fläche des Experimentiertisches der Physiksammlung des Friedrich Spee Kolleg ein. Der Beschleuniger liefert zur Zeit eine stabile Höchstgeschwindigkeit der beschleunigten Kugel von 7.5 m/s sowie eine kurzzeitig mögliche Höchstgeschwindigkeit von 9.5 m/s. Weitere Optimierung der Anlage wird uns in relativ kurzer Zeit ermöglichen, auch Geschwindigkeiten über 10 m/s stabil zu erreichen. Die Kugel wird stets rollend beschleunigt, das heißt, sie besitzt neben ihrer Translationsenergie auch noch einen Spin mit entsprechender Rotationsenergie, was bei einer homogenen Kugel der Masse m und der Geschwindigkeit v einer Gesamtenergie von

$$E_{ges} = \frac{7}{10}mv^2$$

entspricht. Damit ergibt sich für 10m/s und einer Kugelmasse von 5g eine Energie von 0.35Joule.

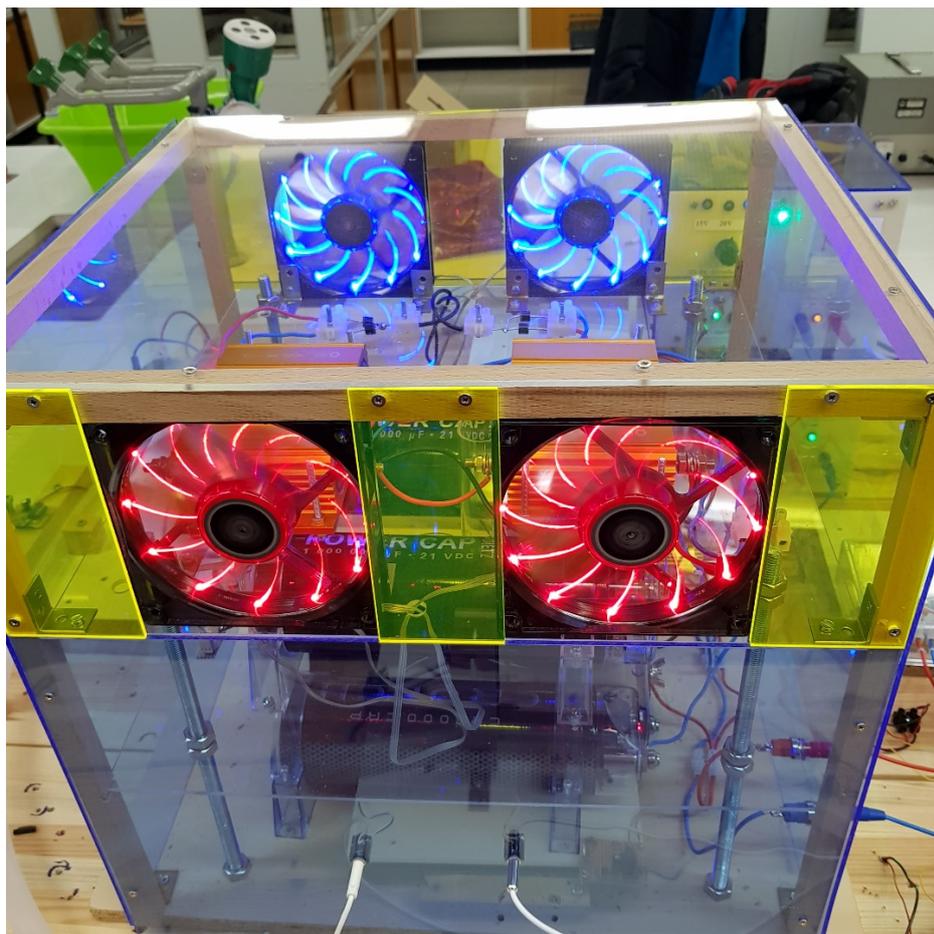
Die weitere Entwicklung des Projektes sollte in zwei Richtungen erfolgen.

- Eine weitere (moderate) Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit kann ins Auge gefasst werden. Moderat deswegen, weil die auftretenden Fliehkräfte auf das PVC Rohr quadratisch mit der Geschwindigkeit ansteigen und dies schnell an die mechanische Belastbarkeitsgrenze des Materials führen würde. Unsere rechnerischen Abschätzungen erlauben jedoch, die Geschwindigkeit ohne Sicherheitsbedenken bis auf etwa 15m/s zu erhöhen.
- Die AG plant zur Zeit ein Experiment, bei dem der PVC-Schlauch bei Erreichen der Höchstgeschwindigkeit geöffnet wird und die Kugel mit ihrer Geschwindigkeit von zwischen 30 und 40km/h unter einem bestimmten Winkel in ein Wasserbecken bestimmter Tiefe und Ausdehnung gelenkt wird. Der gesamte Aufprall und die Zeit danach soll dann von einer möglichst guten Videokamera in Zeitlupe verfolgt werden. Schon bessere Smartphones verfügen heute über Kameras mit 250 Bildern pro Sekunde für Videoaufnahmen). Sinn der Sache ist, den Studierenden mit diesem Experiment eine typische Simulationssituation zu demonstrieren. Ziel ist es, die Auswirkung eines ins Meer stürzenden Asteroiden zu studieren, wobei die Resultate des Experimentes dann auf die wirkliche Geschwindigkeit eines solchen Himmelskörpers (2000-5000 mal so hoch) und seine wirkliche Masse hochgerechnet werden und die Maßstäbe dementsprechend normiert werden. Daraus sollte sich eine Animation des wirklichen (so Gott will, niemals eintretenden) Falles einer solchen Katastrophe ergeben. Sollte dieses Experiment gelingen, so stünde auch einer Veröffentlichung des Versuches (z.B. auf einem Youtube Kanal) prinzipiell nichts im Wege.

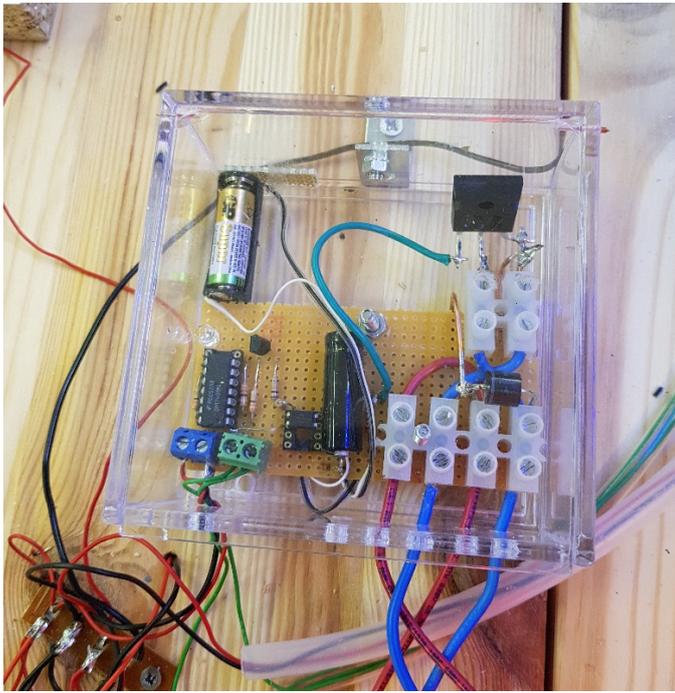
Updates im Schuljahr 2018-19

Im Laufe des aktuellen Schuljahres 2018-19 hat die Physik AG die Arbeit an SPAM fortgesetzt, wobei in zwei Richtungen entwickelt wurde:

1. Alle Komponenten, die mehr als 30V an elektrischer Spannung führen (maximal 80V), wurden in stabile Acrylboxen eingebaut, was einerseits die nötige Sicherheit der Anlage im eingeschalteten Zustand gewährleistet und andererseits, wegen der Durchsichtigkeit des Materials, den einfachen Einblick in die Funktionsweise der Komponenten ermöglicht.



Kondensatorbox zur Bereitstellung von maximal 80V Betriebsspannung mit Kondensatoren, Ladewiderständen und Kühlung.



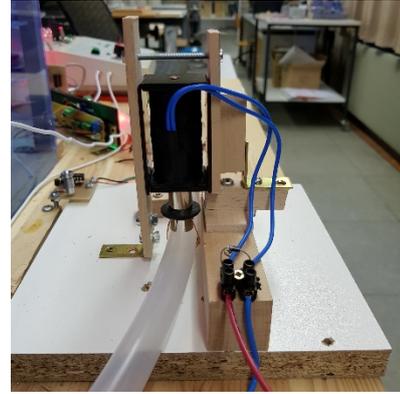
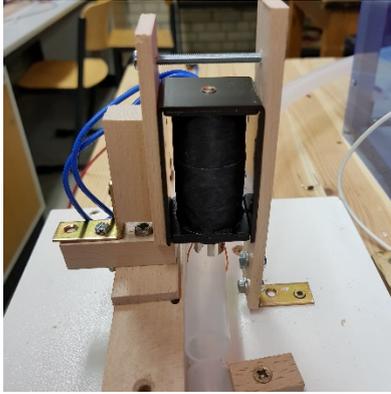
Einheit zur Steuerung des Hochstromimpulses für die Beschleunigungsspulen mittels MOSFET Technik.

2. Die Geschwindigkeit konnte durch mehrere Optimierungsbemühungen stabil auf 11m/s erhöht werden, was durch eine zentrale Steuereinheit, in der alle möglichen Betriebsarten zusammengefasst sind, ermöglicht wurde.
- 3.

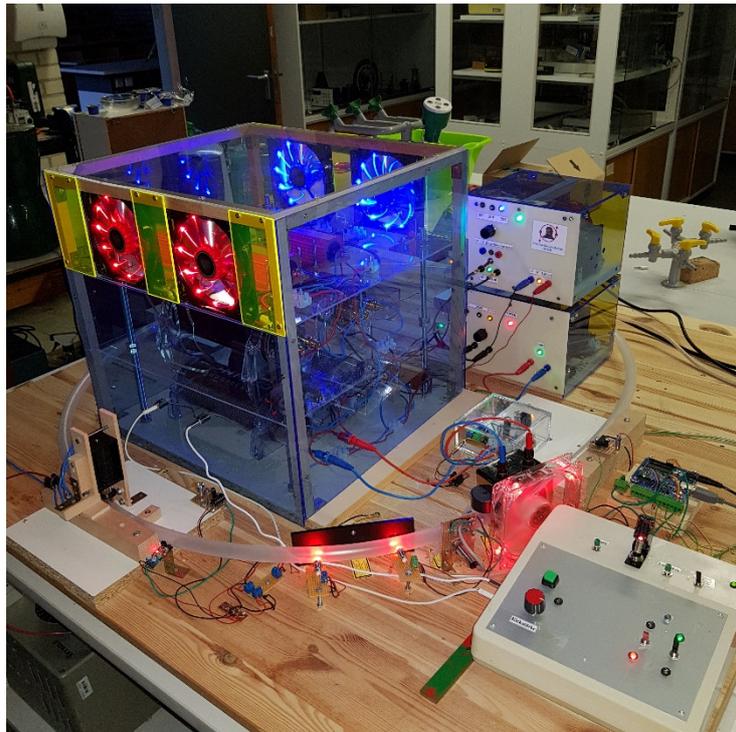


Zentrale Steuereinheit mit Startknopf (grün), Lade und Entladefunktion der Kondensatoren sowie separate Schaltung der beiden Beschleunigungsspulen.

4. Gegenwärtig läuft gerade der Aufbau einer Extraktionseinrichtung, die es ermöglichen wird, die beschleunigte Kugel aus der Anlage zu leiten und auf ein Target zu lenken. Dazu wird das Beschleunigungsrohr durch einen Zugmagneten geöffnet und die etwa 40km/h schnelle Kugel verlässt die Anordnung in Richtung auf das nachgeschaltete Experiment.



Zugmagnet zur Extraktion der beschleunigten Kugel



Gesamte SPAM Anlage mit Stand vom 12.12.2018

Danksagungen

Unser aller Dank geht an den *Förderverein des Friedrich Spee Kolleg* für die vollständige Finanzierung der Beschaffungskosten, die die Durchführung dieses anspruchsvollen Projektes erst ermöglicht hatte.

Weiters bedanken wir uns bei Herrn *Ekkehard Fichtner* für seine ständige Hilfe vor allem bei der Lösung schwieriger theoretischer Probleme im physikalisch mathematischen Bereich der Dynamik, die mit zunehmender Geschwindigkeit zunehmend komplex wird.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich als Leiter der AG bei *allen teilnehmenden Studierenden* für ihr stetes Interesse, für die hohe Rate der Anwesenheit bei den Nachmittagsveranstaltungen und der aktiven Teilnahme sowohl bei allgemeinen Fragen wie auch bei konkreten Messarbeiten und der Realisierung der elektronischen Schaltkreise. Auch wurden von Studierenden in selbständiger Arbeit Messverfahren für die magnetische Kraft der Spulen entwickelt und erfolgreich durchgeführt.

Ich bedanke mich auch für viele praktische Tipps und Hinweise aus den Kreisen beteiligter und auch außenstehender Studierender und Kollegen bezüglich handwerklicher Fähigkeiten, die ich mir (als eigentlich theoretischer Physiker) selbst erst im Laufe der Zeit aneignen musste.

Schließlich möchte ich mich noch herzlich bei *Herrn Prof. Dr. Klaus Krischan* vom Institut für elektrische Antriebstechnik der TU Graz für seine äußerst wertvollen Ratschläge im Bereich der modernen Leistungselektronik (Theorie und praktische Verwendung von MosFet Schaltungen) bedanken. Obwohl mit den Grundlagen der Elektronik vertraut, war dies auch für mich weitgehend Neuland, in das ich mich durch seine Hilfe schnell und effektiv einarbeiten konnte.

Neuss, am 12.12.2018

Dr. Johannes Hagel