

Teilchenfallen in der Antimaterieforschung - Modellexperiment zur Paulfalle

Ankatrin Kirchner

Matrikelnummer: 3303597

3. April 2017

Betreuer: Prof. Dr. Markus Schumacher
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Physikalische Grundlagen	7
2.1. Die dreidimensionale Paulfalle	7
2.1.1. Bewegungsgleichungen	10
2.1.2. Stabilität und Bewegung der Teilchen in der Falle	11
2.1.3. Die makroskopische Paulfalle	13
2.2. Paulfallen in der Gravitationsforschung mit Antimaterie	16
2.2.1. Das GBAR Experiment am CERN	18
3. Entwicklung einer 3D-gedruckten Paulfalle	23
3.1. Die Entwicklung der Falle	23
3.2. Vorstellung der Falle	26
3.2.1. Versuchsaufbau	26
3.2.2. Die Endversion der Falle	26
3.3. Fangen mit der Falle	30
3.4. Sicherheit	32
3.5. Verbesserungsvorschläge	33
4. Die Paulfalle als Experiment im S’Cool LAB	35
4.1. Ziele des Experiments	35
4.2. Zugrundeliegende lernpsychologische Theorie	36
4.3. Vorbereitung	37
4.4. Versuchsablauf	38
4.4.1. Einführung	38
4.4.2. Arbeitsblätter	39

4.4.3. Versuchsdurchführung	40
4.4.4. Ergebnissicherung	41
5. Auswertung der Fragebögen	43
5.1. Physikalisches Verständnis	45
5.1.1. Auswertung: Verständnis der Falle	46
5.1.2. Auswertung: Paulfallen in der Forschung	48
5.1.3. Auswertung: Unterschiede zwischen makroskopischen Paulfallen und Paulfallen für Elementarteilchen	50
5.2. Kognitive Belastung	54
5.3. Interesse der Schüler an Physik und dem Paulfallen-Experiment	57
6. Zusammenfassung und Ausblick	61
A. Anhang	63
A.1. Datenblätter und sonstige Onlinequellen	63
A.1.1. Geräte	63
A.1.2. Material zum Fallenbau	71
A.1.3. Erste Seiten der Onlinequellen	83
A.2. Bauanleitung	85
A.3. Materialien zum Schülerexperiment	88
A.3.1. Worksheet	88
A.3.2. Nachbesprechung	102
A.4. Fragebögen	103
A.5. Auswertung der Fragebögen	121
A.5.1. Diagramme physikalisches Verständnis	121
A.5.2. Diagramme Paulfallen in der Forschung	124
A.5.3. Diagramme Unterschiede makroskopische Fallen und Elementarteilchen-Fallen	125
Literatur	126

1. Einleitung

Schon in der Antike interessierten sich die griechischen Naturphilosophen dafür, die Natur zu verstehen und zu beschreiben. Dieses menschliche Interesse an der Natur hat uns dahin gebracht wo wir heute sind. Das Leben wie wir es kennen, basiert darauf, dass es immer Menschen gab, die wissen wollten, warum sich die Natur so verhält, wie wir es beobachten und versucht haben dies zu erklären. Aus dieser Perspektive stellt sich die Frage, warum es vielen Schülern so schwer fällt, einen Zugang zur Physik zu bekommen. Die Idee hinter dieser Arbeit ist es, dass Schüler selber tätig werden, um in einem Schülerexperiment einen Bezug zur Physik, insbesondere zur aktuellen Forschung herzustellen.

Dem oben beschriebenen Interesse, die Natur zu verstehen, gehen Forscher am CERN (franz.: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), dem europäischen Labor für Elementarteilchenphysik, nach. Sie beschäftigen sich mit grundlegenden Fragen über unser Universum und untersuchen dazu die kleinsten uns bekannten Teilchen aus denen sich dieses zusammensetzt. Ein wichtiges Instrument in der Forschung am CERN sind Teilchenfallen. Eine solche soll den Schülern im Rahmen dieser Arbeit näher gebracht werden. Hierzu wurde im S’Cool LAB, dem Schülerlabor des CERN, eine Experimentiereinheit für Schüler entwickelt und evaluiert.

Für das S’Cool LAB wurde eine Paulfalle entwickelt, die auf elektrischen Kräften beruht. In ihr können makroskopische, elektrisch geladene Teilchen gefangen werden. Dies kann man sich vorstellen als „*das Einsperren von geladenen [...] Teilchen in Käfigen ohne materielle Wände [23]*“. Die Paulfalle ist ein ideales Anwendungsbeispiel für elektrische Feldlinien, die in der Falle durch die Teilchenbewegung nachvollzogen werden können. Mit dem Bezug zur aktuellen Forschung und zur Teilchenphysik, kann damit eine wichtige Anwendungen der Elektrizitätslehre von Schülern im Experiment erprobt werden. Die Falle soll nicht nur von den Schülern im S’Cool LAB genutzt werden kön-

nen. Deshalb wurde sie so entwickelt, dass sie leicht und kostengünstig nachzubauen ist. Damit kann sie auch in Schulen zum Einsatz kommen, ohne dass ein großes Budget zur Verfügung steht. Durch die Idee für eine 3D-gedruckte Paulfalle, die Optimierung auf kostengünstige Bauteile und die integrierte Beleuchtung, setzt sich die Falle von anderen einfachen Modellen ab.

In der für den Einsatz im S’Cool LAB entworfenen Experimentiereinheit für Schüler, können diese ihr physikalisches Vorwissen im Bereich der Elektrizitätslehre anwenden um Experimentiererfahrung und neues Wissen zu erwerben. Gleichzeitig lernen die Schüler etwas über aktuelle physikalische Forschung. Konkret wird der Bezug zur aktuellen Forschung über das GBAR-Experiment am CERN hergestellt. Mit diesem Experiment soll das schwache Äquivalenzprinzip für Antimaterie überprüft werden. Hierzu soll die Erdbeschleunigung g für Antiwasserstoff gemessen werden. Im GBAR-Experiment kommen lineare Paulfallen zum Einsatz, die ein Teilchen in zwei Raumrichtungen einfangen. Das eine dreidimensionale Paulfalle entwickelt wurde, ist dadurch begründet, dass diese einfacher zu bauen ist.

Um den Mehrwert des Paulfallen-Experimentes zu überprüfen, wird die Experimentiereinheit mit Schülern im S’Cool LAB anhand von Fragebögen evaluiert. Der Schwerpunkt der Evaluation wird dabei auf das physikalische Verständnis, das Interesse und die kognitive Belastung der Schüler während des Versuchs gesetzt.

Die physikalischen Grundlagen der Paulfalle, sowie deren Anwendung im GBAR-Experimentes werden in Kapitel 2 beschrieben. Kapitel 3 gibt einen Einblick in die Entwicklung der Paulfalle und das fertige Modell der Falle wird vorgestellt. Die Experimentiereinheit für Schüler wird in Kapitel 4 beschrieben und Kapitel 5 widmet sich der Auswertung der Fragebögen. Kapitel 6 liefert eine Zusammenfassung und gibt einen Ausblick.

2. Physikalische Grundlagen

2.1. Die dreidimensionale Paulfalle

Eine Paulfalle¹ ist eine Teilchenfalle, die elektrisch geladene Teilchen, z.B Ionen, in einem elektrischen Quadrupolfeld gefangen hält. Sie ist nach W. Paul benannt, der für ihre Entwicklung im Jahr 1989 zusammen mit H. Dehmelt den Nobelpreis für Physik erhielt (s. [20]). Die Paulfalle ermöglicht „das Einsperren von geladenen [...] Teilchen in Käfigen ohne materielle Wände. Solche Käfige ermöglichen die Beobachtung von isolierten Teilchen - selbst von einem einzigen - über eine lange Zeitspanne [23].“

Da das Verständnis der zugrunde liegenden Physik für den erfolgreichen Betrieb einer Paulfalle unabdingbar ist, wird im Folgenden zunächst die Form der Elektroden und die Stabilitätsbedingungen für eine ideale Falle im Vakuum hergeleitet. Danach wird auf die zusätzlichen Einflüsse eingegangen, die bei Betrieb einer Falle unter atmosphärischem Druck mit makroskopischen Teilchen auftreten.

Es kann zwischen zwei Typen von Paulfallen unterschieden werden. Die lineare Paulfalle sperrt ein Teilchen in zwei Raumrichtungen ein und die dreidimensionale Paulfalle in drei Raumrichtungen. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der dreidimensionalen Falle, auf deren Theorie hier näher eingegangen wird. Aus dieser lässt sich die Form der Elektroden herleiten. Bei der dreidimensionalen Falle haben die Elektroden die Form eines einschaligen Hyperboloids und eines zweischaligen Hyperboloids. In der Realität wird diese Geometrie nicht exakt befolgt, da es zum Fangen von Teilchen genügt einen Ring (Ringelektrode), statt des einschaligen Hyperboloids, zu nutzen. Ein Querschnitt der Anordnung der Elektroden ist in Abb. 2.1 zu sehen.

Um ein Teilchen in der Falle gefangen zu halten, muss es bei Abweichen vom Mittel-

¹im englischen zum Teil auch quadrupole ion trap genannt

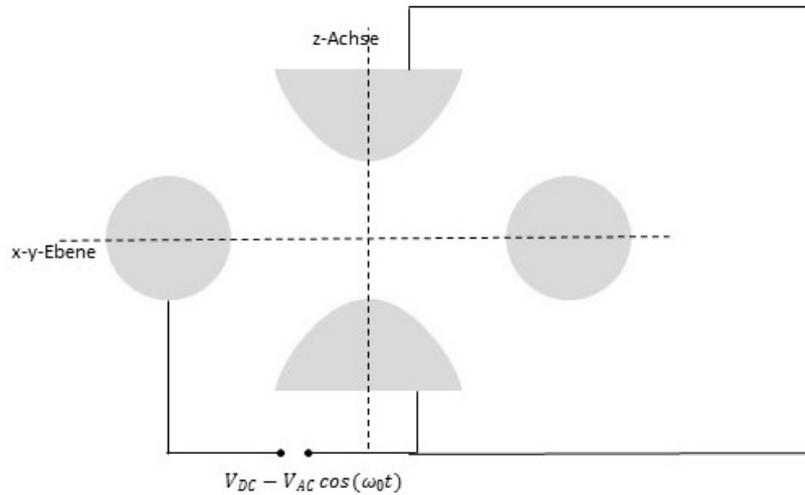


Abb. 2.1.: Schematische Darstellung des Querschnitts der Elektroden einer Paulfalle. Die Kreise stellen einen Querschnitt der Ringelektrode dar. Oben und unten ist das (angenäherte) einschalige Hyperboloid zu sehen.

punkt der Falle eine rücktreibende Kraft erfahren. In der folgenden mathematischen Beschreibung wird der Ursprung des Koordinatensystems in den Mittelpunkt der Falle gelegt. Für die rücktreibende Kraft wird der einfachste Fall angenommen: eine linear mit dem Abstand wachsende Kraft

$$F = -cr.$$

Das zugehörige Potential ist von der Form

$$\Phi(x,y,z) = \frac{\Phi_0}{2r_0^2}(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2), \quad (2.1)$$

wobei r_0 den Abstand der Elektroden zum Fallenmittelpunkt festlegt (in x - bzw. y -Richtung ist der Abstand r_0 und in z -Richtung $\frac{r_0}{\sqrt{2}}$). Φ_0 gibt die Potentialdifferenz zwischen der Ringelektrode und der oberen und unteren Elektrode an. Die obere und untere Elektrode liegen auf dem selben Potential (vgl. [23]).

Das elektrostatische Potential im ladungsfreien Raum erfüllt die Laplacegleichung ($\Delta\Phi = 0$, [11] (S. 49)). Daraus folgt:

$$\alpha + \beta + \gamma = 0.$$

Aus der Rotationssymmetrie der Elektroden bezüglich der z -Achse folgt $\alpha = \beta$. Mit $\alpha = 1$ und $x^2 + y^2 = r^2$ erhält man das Potential

$$\Phi(r,z) = \frac{\Phi_0}{2r_0^2}(r^2 - 2z^2) \quad (2.2)$$

(vgl. [23]).

Ein Potential dieser Form erhält man gerade dann, wenn man eine Spannung Φ_0 an Elektroden der Form eines einschaligen (Gl. (2.3)) und eines zweischaligen Hyperboloids (Gl. (2.4)) anlegt.

$$r^2 - 2z^2 = r_0^2 \quad (2.3)$$

$$r^2 - 2z^2 = -r_0^2 \quad (2.4)$$

Dies ergibt sich, indem man sich klar macht, dass die Äquipotentialflächen eines Feldes der Form (2.2) durch $r^2 - 2z^2 = \pm c$ gegeben sind und das Potential auf den Elektroden ($c = \frac{\Phi_0}{2}$) einsetzt [24] (S. 6).

Nach dem Earnshaw-Theorem [22] (S. 28) reicht ein solches statisches Feld nicht aus um elektrisch geladene Teilchen zu fangen. Es besagt, dass ein geladenes Teilchen, das ausschließlich von einem elektrostatischen Feld beeinflusst wird, nicht im stabilen Gleichgewicht sein kann. In [22] (S. 28 f) wird dies anschaulich anhand von Feldlinien begründet. Damit sich ein (positiv) geladenes Teilchen an einem Ort O (s. Abb. 2.2) im stabilen Gleichgewicht befindet, müssen die elektrischen Feldlinien alle zu O hin zeigen, damit die Kraft es immer wieder zu O zurück führt, egal wohin dieses Teilchen verschoben wird. Diese Feldlinienkonfiguration impliziert jedoch eine Ladung im Punkt O . Daraus folgt, dass es nicht möglich ist ein elektrisch geladenes Teilchen in einem elektrostatischen Feld zu fangen. Dies bedeutet, dass die in Gl. (2.2) enthaltene Spannung Φ_0 eine Wechselspannung sein muss, damit das Potential kein statisches Potential ist. Durch Einsetzen einer Wechselspannung $\Phi_0 = V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t)$ in Gl. (2.2) erhält man folgendes Potential:

$$\Phi(r,z) = \frac{V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t)}{2r_0^2}(r^2 - 2z^2). \quad (2.5)$$

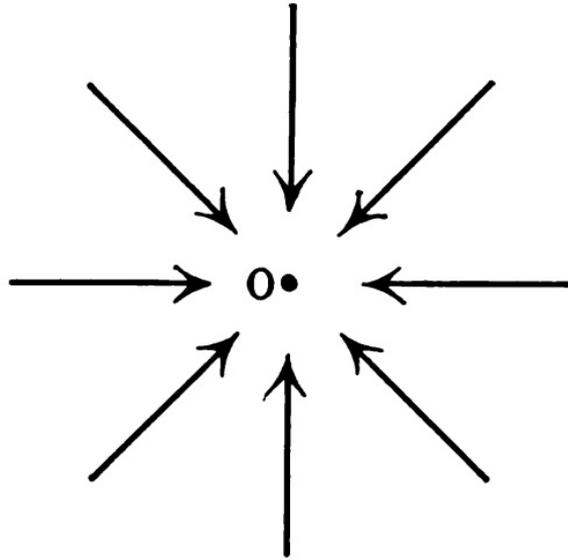


Abb. 2.2.: Elektrische Feldlinien die zum Punkt O zeigen aus [22] (S. 29).

2.1.1. Bewegungsgleichungen

Um das Verhalten elektrisch geladener Teilchen in der Falle zu untersuchen, müssen deren Bewegungsgleichungen im elektrischen Feld der Falle betrachtet werden. Mit dem Zusammenhang der elektrischen Kraft und dem Potential ($\vec{F} = -e\vec{\nabla}\Phi$) erhält man für die radiale (F_r) und axiale Kraftkomponente (F_z)

$$F_r = -\frac{e(V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t))}{r_0^2}r \quad (2.6)$$

$$F_z = \frac{2e(V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t))}{r_0^2}z. \quad (2.7)$$

Dabei ist e die Ladung des betrachteten Teilchens. Mit dem 1. Newtonschen Axiom erhält man die Bewegungsgleichungen in die beiden Richtungen für ein Teilchen der Masse m

$$\ddot{r} + \frac{e(V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t))}{mr_0^2}r = 0 \quad (2.8)$$

$$\ddot{z} - \frac{2e(V_{DC} + V_{AC}\cos(\omega_0 t))}{mr_0^2}z = 0. \quad (2.9)$$

In den Bewegungsgleichungen erkennt man die Mathieusche Differentialgleichung wieder:

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} + (a_r + 2q_r \cos(2\tau))r = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} - (a_z + 2q_z \cos(2\tau))z = 0. \quad (2.11)$$

Durch Koeffizientenvergleich ergibt sich (vgl. [23]):

$$\tau = \frac{\omega_0 t}{2}$$

$$a_r = \frac{4eV_{DC}}{mr_0^2\omega_0^2}; \quad q_r = \frac{2eV_{AC}}{mr_0^2\omega_0^2} \quad (2.12)$$

$$a_z = \frac{8eV_{DC}}{mr_0^2\omega_0^2}; \quad q_z = \frac{4eV_{AC}}{mr_0^2\omega_0^2}. \quad (2.13)$$

2.1.2. Stabilität und Bewegung der Teilchen in der Falle

Die Lösungen der Mathieuschschen Differentialgleichungen beschreiben Oszillationen um den Nullpunkt. Dies sind stabile Oszillationen mit beschränkter Amplitude oder instabile Oszillationen mit anwachsender Amplitude bei denen die Teilchen aus der Falle entkommen. Die Stabilität oder Instabilität der Lösung ist abhängig von den in Gl. (2.12) und (2.13) definierten Größen a und q . Die stabilen und instabilen Bereiche können dem a - q -Diagramm entnommen werden (vgl. Abb. 2.3). q kann dabei positive und negative Werte annehmen. Die negativen Werte sind aufgrund der Symmetrie zur a -Achse nicht extra im Diagramm eingezeichnet. Die Bewegung ist stabil, wenn der Arbeitspunkt (q, a) im stabilen Bereich liegt. Wenn $r(\tau)$ und $z(\tau)$ stabil sein sollen, muss in beide Richtungen auf Stabilität geachtet werden. Durch Vergleich von Gl. (2.12) und Gl. (2.13) geht hervor, dass sie sich um den Faktor 2 unterscheiden. Der Vergleich der Bewegungsgleichungen (2.10) und (2.11) für r und z ergibt, dass die Stabilitätsbereiche von z , im Vergleich zu denen von r , mit dem Faktor $\frac{1}{2}$ skaliert werden ($a_z = 2a_r$, $q_z = 2q_r$) und das Vorzeichen umgekehrt ist. Das Diagramm wird also an der q -Achse gespiegelt. Um in beide Richtungen Stabilität zu erreichen muss der Arbeitspunkt in einem der doppelt stabilen Bereiche liegen (s. Abb. 2.3 rechts, schraffierte Bereiche).

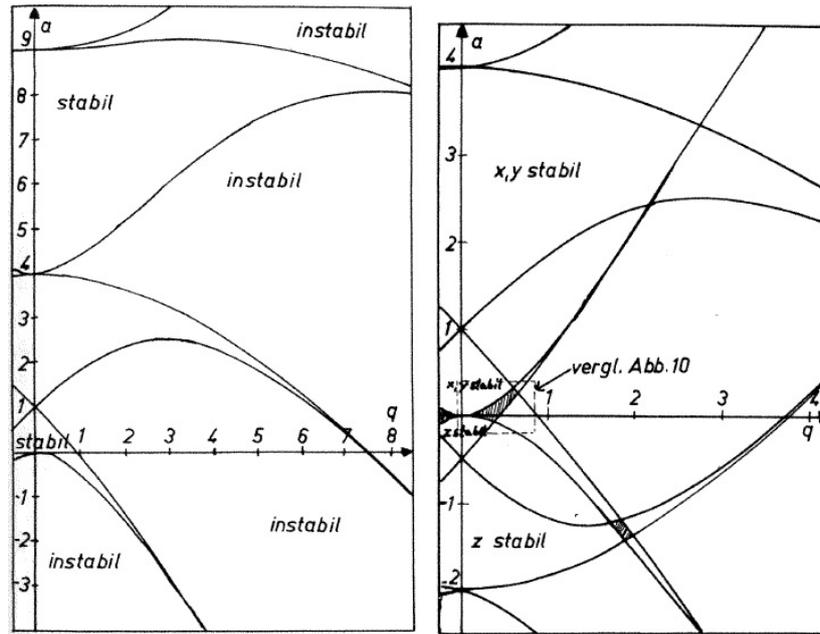


Abb. 2.3.: Stabilitätsdiagramme. Links: Stabilitätsbereiche in radialer Richtung. Rechts: Stabilitätsbereiche in radialer Richtung und in z-Richtung. Stabilität in beide Richtungen gilt für die schraffierten Bereiche (aus [24]).

Bei gegebener spezifischer Ladung $\frac{e}{m}$ eines zu fangenden Teilchens können mögliche Wertebereiche für die Gleichspannung V_{DC} , die Parameter der Wechselspannung V_{AC} und ω_0 und für r_0 berechnet werden. Dies geschieht anhand der Wertepaare für a und q bei denen ein stabiles Fangen der Teilchen möglich ist (vgl. [24]).

Auf dieser Grundlage kann man das Verhalten der gefangenen Teilchen in der Falle beschreiben. Die Teilchenposition (wir betrachten hier nur die z -Koordinate, die r -Richtung berechnet sich analog) lässt sich in eine Mikrobewegung δ und eine Makrobewegung Z zerlegen.

$$z = Z + \delta \quad (2.14)$$

Die Frequenz der Mikrobewegung entspricht der Frequenz der angelegten Wechselspannung und die Amplitude ist klein im Vergleich zur Amplitude der Makrobewegung. Die Makrobewegung hat eine wesentlich kleinere Frequenz als die angelegte Spannung. Sie beschreibt die resultierende Bewegung, die von den kleinen Schwingungen der Mikro-

wegung überlagert wird. Die Mikro- und Makrobewegung eines Aluminium Partikels in einer Paulfalle sind in Abb. 2.4 zu sehen. Für die weitere Vereinfachung lässt sich also annehmen, dass $\delta \ll Z$, und $\frac{d\delta}{d\tau} \gg \frac{dZ}{d\tau}$. Unter der Annahme, dass die Gleichspannung $V_{DC} = 0$ V beträgt und somit $a = 0$ gilt, lässt sich die Bewegung noch weiter vereinfachen. Dies ist auch die Konfiguration, in der die im Rahmen der Arbeit entworfene Falle betrieben wird. Mit Gl. (2.11) und Gl. (2.14) erhält man

$$\frac{d^2\delta}{d\tau^2} = 2q_z \cos 2\tau Z. \quad (2.15)$$

Bei Betrachtung eines kleinen Zeitintervalls, für das angenommen wird, dass sich Z kaum verändert ($Z = \text{const}$), folgt nach Integration

$$\delta = -\frac{q_z Z}{2} \cos(2\tau). \quad (2.16)$$

Daran sieht man, dass die Mikrobewegung eine Phasenverschiebung von 180° zu der angelegten Spannung hat, wenn das Teilchen stabil gebunden ist.

Durch Einsetzen von Gl. (2.16) in Gl. (2.14) und dieser in die Mathiesche Bewegungsgleichung (2.11) erhält man

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} = 2q_z Z \cos(2\tau) - q_z^2 Z \cos^2(2\tau). \quad (2.17)$$

Die resultierende Beschleunigung $\frac{d^2 Z}{d\tau^2}$ erhält man durch Mittelung der momentanen Beschleunigung über eine Periode der angelegten Spannung:

$$\frac{d^2 Z}{d\tau^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d^2 z}{d\tau^2} = -\frac{q_z^2}{2} Z. \quad (2.18)$$

Mit den obigen Annahmen wurde die stabile Bewegung auf eine harmonische Differentialgleichung reduziert (vgl. [44]).

2.1.3. Die makroskopische Paulfalle

Die bisherigen Überlegungen gelten unter der Annahme, dass sich im Inneren der Falle ein Vakuum befindet und keine weiteren Kräfte auf das Teilchen wirken. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Falle wird unter atmosphärischem Druck betrieben. Durch die Luftreibung wird die Teilchenbewegung stark gedämpft, was die Mikro-, aber vor

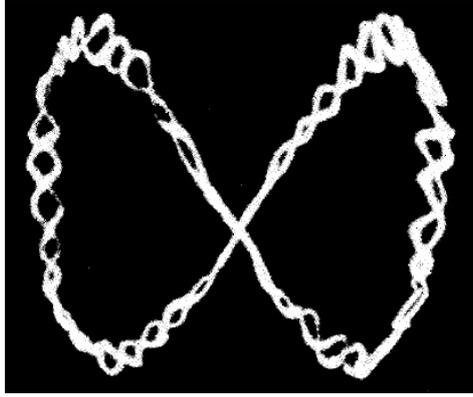


Abb. 2.4.: Retuschierte Aufnahme der Bewegung eines einzelnen Aluminium Partikels in der r-z-Ebene. Die Makrobewegung entspricht hier einer 2:1 Lissajousfigur und ist von der Mikrobewegung überlagert (aus [44]).

allein die Makrobewegung beeinflusst. Zudem sind die gefangenen Teilchen makroskopisch, wodurch der Einfluss der Gravitation eine sichtbare Auswirkung auf selbige hat. Diese beiden Faktoren werden mathematisch durch zusätzliche Terme für Gravitations- und Reibungskraft in der Bewegungsgleichung berücksichtigt und im Folgenden in Anlehnung an [42] genauer betrachtet.

Unter Annahme eines laminaren Luftstroms erhält man einen Reibungsterm

$$F_{\text{Reibung}} = -b \frac{dz}{d\tau}, \quad (2.19)$$

der sich proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens verhält. (Dies gilt genauso in r-Richtung.) Der Parameter b ist abhängig von der Viskosität der Luft η , dem Radius R und der Dichte ρ des als kugelförmig angenommenen Teilchens in der Falle, sowie der Frequenz des Wechselfeldes ω_0 :

$$b = \frac{9\eta}{\rho R^2 \omega_0}. \quad (2.20)$$

In [42] werden die Stabilitätsbereiche für die Mathieschen Differentialgleichungen mit Reibungsterm für Anthracen² Partikel ($\rho = 128 \text{ kg/m}^3$, $R=15 \text{ }\mu\text{m}$, $\eta = 18 \text{ kg/ms}$, $\omega_0 = 2\pi 50 \text{ Hz}$) mit einer numerischen Runge-Kutta-Methode gelöst. Dabei wird der

² $C_{14}H_{10}$

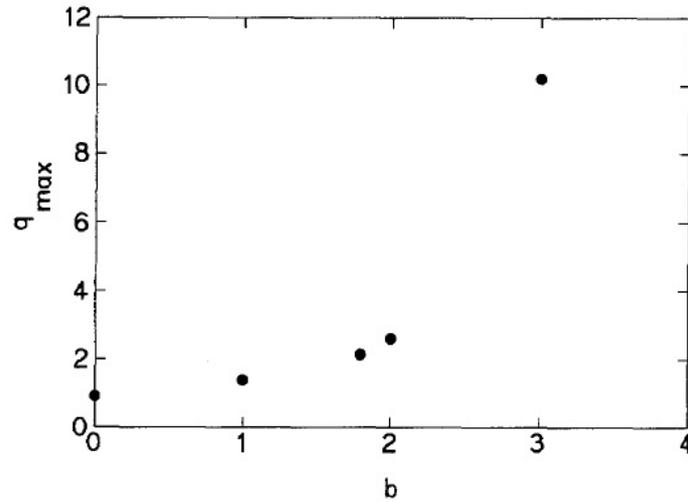


Abb. 2.5.: Maximale q -Werte für stabiles Fangen von Teilchen in Abhängigkeit des Reibungsterms b (aus [42]).

maximale q -Wert, für den ein langfristig stabiles Einfangen der Teilchen möglich ist, von $q_{max}=0,908$ auf $q_{max}=2,13$ mehr als verdoppelt.

Für die im S'Cool LAB verwendeten Bärlappsporen liegt der Radius der Mehrheit der Sporen zwischen $R=10-15 \mu\text{m}$ und die Dichte bei $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$. Die Ladung für diese Sporen liegt bei $13,5 \text{ mC/kg}$ (vgl. [3]). Mit $R = 15 \mu\text{m}$ ergibt sich ein Dämpfungsfaktor von $b=5,0$. In Abb. 2.5 sind die maximalen q -Werte für $b=0,1,2,3$ aufgetragen. Man sieht, dass der maximale q -Wert mit steigendem Dämpfungsterm b schnell anwächst. Hieraus ist zu entnehmen, dass der Stabilitätsbereich für die Bärlappsporen unter atmosphärischem Druck deutlich größer ist, als für die aus der Theorie berechneten Werte, für welche ein Vakuum in der Falle angenommen wird.

Die Dämpfung führt dazu, dass die Makrobewegung sehr schnell ausgedämpft wird und die Trajektorie durch die Mikrobewegung mit gedämpfter Amplitude beschrieben wird. Die Gravitation führt zu einer Verschiebung der Bewegung in negative z -Richtung (der Mittelpunkt der Falle wurde als Ursprung gesetzt).

2.2. Paulfallen in der Gravitationsforschung mit Antimaterie

Ein aktuelles Anwendungsgebiet für Paulfallen ist die Antimaterieforschung. In diesem Abschnitt wird auf die Forschung zur Gravitationskraft zwischen Materie und Antimaterie eingegangen. Dabei wird der Schwerpunkt auf das GBAR-Experiment, das am CERN entwickelt wird und die Paulfallen, die dort zum Einsatz kommen sollen, gesetzt. Das Ziel des Experimentes ist, herauszufinden, ob das schwache Äquivalenzprinzip für Antimaterie im Gravitationsfeld von Materie gilt.

Man unterscheidet zwischen der trägen Masse, die über das Newtonsche Gesetz $F = m_t a$ definiert ist und der schweren Masse. Die träge Masse ist verantwortlich dafür dass ein Körper seinen Bewegungszustand nicht ändert, solange keine Kraft wirkt. Die schwere Masse ist proportional zur Kraft die ein Körper in einem Gravitationsfeld erfährt. Das schwache Äquivalenzprinzip besagt, dass diese beiden Massen übereinstimmen. Dies wurde für Materie mit sehr hoher Präzision nachgewiesen. Bisher wurde die träge Masse des Antiprotons sehr genau bestimmt. Die relative Abweichung der trägen Masse des Protons von der des Antiprotons ist nach bisherigen Experimenten durch 10^{-9} nach oben beschränkt [6]. Um das schwache Äquivalenzprinzip zu überprüfen, soll nun die schwere Masse von Antiprotonen genau bestimmt werden. Zum Vorzeichen des Verhältnis der schweren Masse von Materieteilchen und zugehörigen Antimaterieteilchen gibt es gegensätzliche experimentelle und theoretische Argumente, die jedoch auf Annahmen beruhen, die nicht universell gültig sind. Deshalb soll das schwache Äquivalenzprinzip in einem Freifallexperiment mit Antiwasserstoffatomen direkt getestet werden. In der Vergangenheit wurden Freifallexperimente mit Positronen und Antiprotonen angestrebt. Da es schwer ist geladene Teilchen gegen elektromagnetische Einflüsse zu schützen und die Gravitationskraft nur sehr schwach ist, waren diese Messungen wenig erfolgreich (vgl. [26]). Mit dem ALPHA Experiment [1] am CERN wurden Grenzen für das Verhältnis zwischen schwerer Masse m_s und träger Masse m_t bei Antiwasserstoffatomen gesetzt, die jedoch keine eindeutigen Ergebnisse liefern. In einem 5 % Signifikanzniveau konnten Verhältnisse außerhalb $-65 < m_s/m_t < 75$ ausgeschlossen werden. Um mögliche kleine Abweichungen des schwachen Äquivalenzprinzips für Antimaterie zu messen, ist ein Verhältnis von $m_s/m_t \approx 1$, oder, falls es

Antigravitation gibt, $m_s/m_t \approx -1$, zu erreichen. Eines der Experimente am CERN, das die Messung in Zukunft durchführen wird, ist das GBAR-Experiment.

Nach einer kurzen Einführung in die für das Experiment relevanten Antiteilchen, wird dieses in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die verwendeten Paulfallen gesetzt.

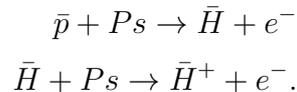
Im Jahr 1928 ging P. Dirac [9] zum ersten Mal darauf ein, dass die Wellengleichung der Quantenmechanik bei komplexer Konjugation das Gleiche ergibt, wie wenn man bei einem Elektron statt der Ladung $-e$ die Ladung e einsetzen würde. 1931 postulierte er auf dieser Grundlage Teilchen mit gleicher Masse wie die Elektronen, die uns wie Teilchen mit positiver Energie und positiver Ladung erscheinen, als Interpretation für die negativen Energieeigenwerte in der Schrödingergleichung. Er schlug vor, dass man sie Antielektronen nennen könnte [10]. Der erste experimentelle Hinweis wurde von C. Anderson 1933 veröffentlicht. In Nebelkammeraufnahmen konnte er die von P. Dirac postulierten „Antielektronen“ nachweisen [2]. Er prägte den heute üblichen Namen Positron. 1936 wurde ihm für diese Beobachtung der Nobelpreis verliehen ([5], S. 442). Heute weiß man: „Zu jedem Typ Fermion gibt es ein Antiteilchen. Teilchen und Antiteilchen haben die gleiche Masse, aber entgegengesetzte Ladungen. Sie erfahren daher alle Wechselwirkungen in gleicher Stärke, aber mit umgekehrtem Vorzeichen (ob einschließlich der Gravitation ist bis heute ungeklärt!) ([5], S. 390).“ Treffen ein Teilchen und ein Antiteilchen aufeinander, können sie annihilieren. Dabei dürfen die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls nicht verletzt werden. Bei der Annihilation wandelt sich Teilchen-Antiteilchen-Paar entweder in zwei Photonen um, oder über ein anderes Boson in ein neues Teilchen-Antiteilchen-Paar. Aufgrund der Erhaltung der Fermionenzahl, kann die Erzeugung und Vernichtung eines Fermions nur mit Erzeugung bzw. Vernichtung des zugehörigen Antiteilchens einhergehen (vgl. [5], S. 390).

Beim GBAR-Experiment spielen folgende Antiteilchen bzw. Antiatome eine Rolle. Das Antiproton ist das Antiteilchen zum Proton und wurde 1956 in hochenergetischen Stößen von Protonen mit Protonen ab 5 GeV zum ersten Mal von E. Segrè und O. Chamberlain nachgewiesen. Sie bekamen 1959 den Nobelpreis für ihre Entdeckung ([5], S. 524). Ein Positronium ist ein gebundener Zustand aus einem Elektron und

einem Positron. Die Lebenszeit ist nur sehr kurz (im angeregten Zustand 2^3S_1 etwa 10^{-6} s) bis Elektron und Positron annihilieren ([8], S. 209). Das Antiwasserstoffatom besteht aus einem Antiproton \bar{p} und einem Positron e^+ und wurde 1996 zum ersten Mal am CERN durch die Interaktion von Positronium mit Antiprotonen hergestellt [4].

2.2.1. Das GBAR Experiment am CERN

Mit dem GBAR Experiment (Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest) soll das schwache Äquivalenzprinzip für Antimaterie direkt getestet werden. Die oben genannten Probleme bei der Messung der Gravitation mit geladenen Teilchen sollen umgangen werden, indem die Beschleunigung von ultra-kalten neutralen Antiwasserstoffatomen, bestehend aus einem Antiproton und einem Positron, beim freien Fall im irdischen Gravitationsfeld gemessen wird. Dabei beträgt die Flugdistanz 10 cm. Unter der Annahme, dass die Erdbeschleunigung \bar{g} für Antiwasserstoff und die Erdbeschleunigung g für Wasserstoff dieselbe ist, beträgt die Flugzeit 143 ms. Ziel ist es, bei der Messung eine Genauigkeit von 1 % zu erreichen. Hierfür müssen die Antiwasserstoffatome auf eine Geschwindigkeit von weniger als 1 ms^{-1} abgebremst werden (vgl. [26]). Dies entspricht einer Kühlung auf unter $\approx 5 \text{ neV}$ ($60 \text{ } \mu\text{K}$). Da es nicht möglich ist neutrale Atome oder Teilchen auf diese Temperatur zu kühlen, werden positive Antiwasserstoffionen (\bar{H}^+) gekühlt. Diese werden bei sehr hohen Energien in zwei aufeinanderfolgenden Reaktionen erzeugt. Zuerst wechselwirken ein Antiproton und ein Positronium und werden zu einem Antiwasserstoffatom und einem Elektron. Durch Wechselwirkung eines Antiwasserstoffatoms mit einem Positronium kann ein positives Antiwasserstoffion und ein Elektron erzeugt werden:



Das für die Reaktionen notwendige Positronium wird durch Wechselwirkung von langsamen Antiprotonen mit Materie erzeugt. Diese werden durch die Interaktion eines 10 MeV Elektronenstrahls aus dem Linac (linear accelerator) mit einem Wolfram-Target erzeugt und anschließend abgebremst (lila Zweig, in Abb. 3.3). Auch hierbei

wird eine Teilchenfalle (Penning-Malmberg Falle) eingesetzt, die in dieser Arbeit nicht thematisiert wird. Die Antiprotonen werden vom AD (AntiprotonDecelerator) bereit gestellt und mit ELENA (Extra Low ENergy Antoproton ring) und einem weiteren Entschleuniger auf eine Energie von 1 keV abgekühlt ([26] und [25]).

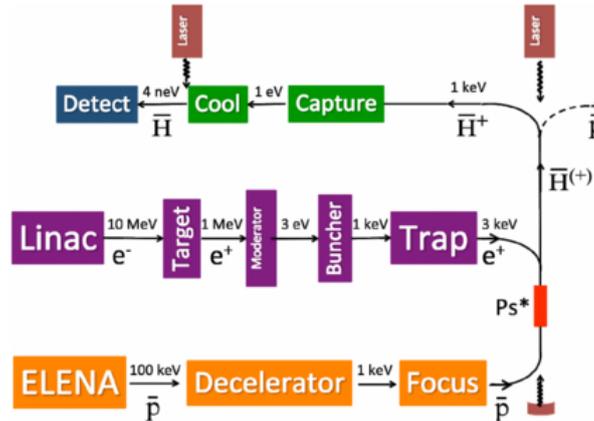


Abb. 2.6.: Aufbau des GBAR Experiments (aus [26]).

Nach ihrer Herstellung haben die Antiwasserstoffionen eine kinetische Energie von 1 keV. Um die für die Messung des freien Falls notwendige Geschwindigkeit von unter 1 ms^{-1} zu erreichen, werden die Antiwasserstoffionen in zwei aufeinander folgenden linearen Paulfallen gekühlt. Lineare Paulfallen (s. Abb. 2.7) sperren ein Teilchen nicht

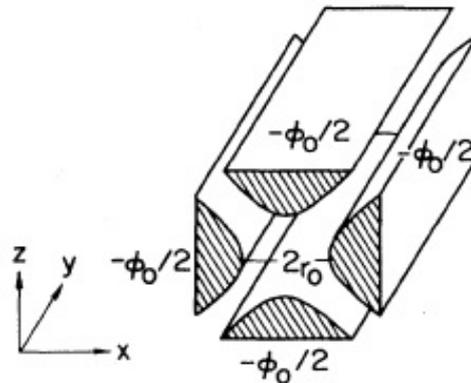


Abb. 2.7.: lineare Paulfalle (aus [23]).

in drei Raumrichtungen ein sondern nur in zwei Richtungen und erlauben damit das

Einspeisen und Weiterleiten vor und nach der Falle in gezielter Richtung. Das Ausgangspotential ist das Gleiche wie bei der dreidimensionalen Paulfalle (vgl. Gl. (2.1)). Da in y-Richtung nicht gefangen wird, kann man $\alpha = -\gamma$ und $\beta = 0$ wählen. Daraus ergibt sich ein Potential von der Form

$$\Phi(r,z) = \frac{\Phi_0}{2r_0^2}(x^2 - z^2).$$

Die stabilen und instabilen Bereiche ergeben sich analog zum dreidimensionalen Fall. Da Symmetrie zwischen x- und z-Richtung herrscht, ergibt sich nur ein Wert für a und einer für q. Die Werte entsprechen gerade a_r und q_r im dreidimensionalen Fall (s. Gl. (2.12)). Die Parameter für die stabile Bewegung können Abb. 2.3 entnommen werden (vgl. [23]).

Die erste Falle kühlt die Antiwasserstoffionen von 1 keV (≈ 100 MK) auf $\approx 60 \mu\text{eV}$ (≈ 1 mK). Die geschieht durch sympathetische Kühlung mit Doppler gekühlten Be^+ -Ionen, die sich zu einem Kristall aus über 10000 Be^+ -Ionen zusammensetzen (vgl. [25]). Damit sowohl die Be^+ -Ionen als auch die \bar{H}^+ -Ionen in der Falle gefangen werden, muss $q = 0,05$ für Be^+ und $q = 0,45$ für \bar{H}^+ gelten. Dies erhält man mit einer Wechselspannung von $V = 356$ V, einem Fallenradius von $r_0 = 3,5$ mm und einer Frequenz der Wechselspannung von $\omega_0 = 2\pi \times 17,7$ MHz. Im zweiten Kühlungsschritt werden die \bar{H}^+ -Ionen vom Beryllium-Kristall separiert und einzeln in eine Präzisionsfalle mit einer Wechselspannung von $V = 88$ V bei einer Frequenz von $\omega_0 = 2\pi \times 56$ MHz (damit q die oben geforderten Werte erfüllt) eingespeist [17]. In dieser Falle befindet sich ein einzelnes Be^+ -Ion. Es wird ein Be^+ / \bar{H}^+ -Ionen Paar gebildet. Durch Raman-Seitenbandkühlung wird den Vibrationsmoden des Paares Energie entzogen, bis sich das Ionenpaar in der Vibrations-Grundmode in vertikaler Richtung befindet. Mit diesem quantenmechanischen harmonischen Oszillator kann die erforderliche Geschwindigkeitsdispersion unter 1 ms^{-1} erreicht werden (vgl. [26]).

Nach der Kühlprozedur wird das extra Positron durch Photoionisation mit einem Laser entfernt. Dies muss direkt über der Ionisationsschwelle stattfinden, damit nicht wieder Energie aufgenommen wird. Abb. 2.8 zeigt den schematischen Aufbau des Kühl- und Freifallmechanismus (vgl. [26] und [25]). Der Schuss des Lasers zur Photoionisation gibt die Startzeit des freien Falls an. Das Ende der Flugzeit wird durch Registrierung der Annihilationsprodukte bestimmt. Bei der Elektron-Positron-Annihilation entstehen

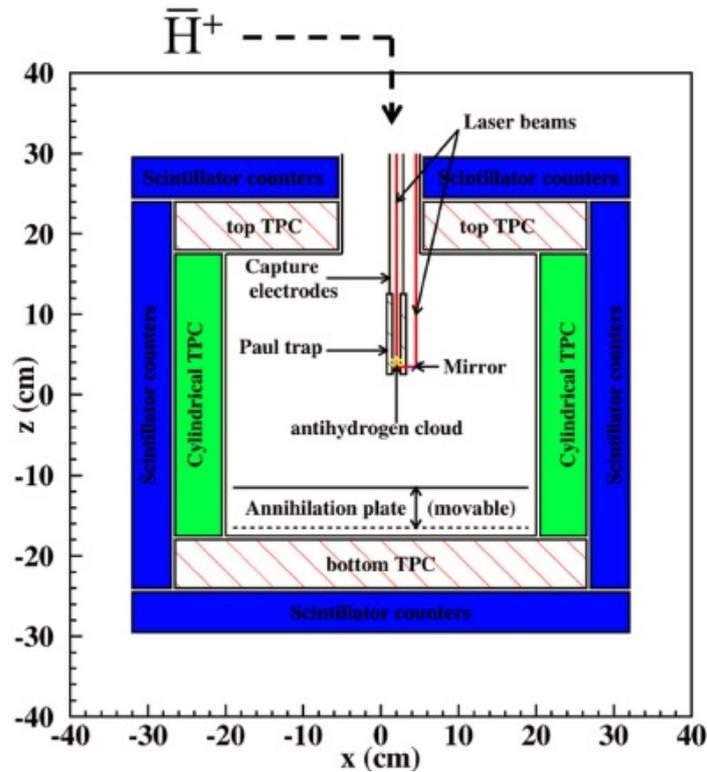


Abb. 2.8.: Seitliche Ansicht des Aufbaus zur Detektion des freien Falls (aus [35]).

zwei Photonen mit einer Energie von 511 keV. Bei der Antiproton-Proton-Annihilation entstehen in 95% der Fälle ein Pion-Antipionpaar oder zwei neutrale Pionen. Die geladenen Pionen können von den Plastik-Szintillationszählern, die die Vakuumkammer umgeben, detektiert werden. Dies gibt das Ende der Zeit des freien Falls an. Durch die Spurendriftkammern (TPC, engl.: *Time Projection Chamber*) am Rande der Vakuumkammern kann der Annihilations-Vertex der im Szintillationszähler detektierten Pionen rekonstruiert und die Detektion von Hintergrundstrahlung erkannt werden (vgl. [26]).

3. Entwicklung einer 3D-gedruckten Paulfalle

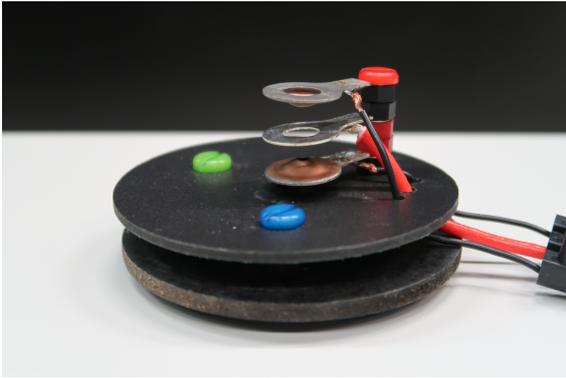
Das Ziel bei der Entwicklung der Paulfalle für das S’Cool LAB war es, ein günstiges und einfach nachzubauendes Modell zur Verfügung zu stellen. Dies soll ermöglichen, dass Lehrer die Falle selber bauen und im Unterricht einsetzen können. Im Folgenden wird die Entwicklung der Falle beschrieben und das fertige Modell vorgestellt.

3.1. Die Entwicklung der Falle

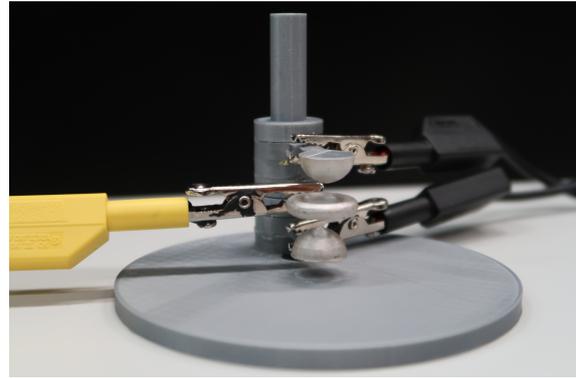
Die Idee makroskopische Paulfallen als Schülerexperimente einzusetzen, ist keine neue Idee. Es wurden bereits Ideen für lineare und dreidimensionale Fallen entwickelt. Die bisher, von einer Firma die Schulversuche entwickelt, angebotene dreidimensionalen Paulfalle, ist im Vergleich zu der in der Arbeit entwickelten Falle sehr teuer. Zudem weist sie einige weitere Nachteile auf: die Falle ist schwierig zu reinigen, die Beleuchtung schwer zu installieren und die dem Komplett-Set zugehörigen Kabel tragen der Sicherheit bei angelegter Hochspannung keine Rechnung (vgl. Diskussion zur Sicherheit der Hochspannung in Abschnitt 3.4).

Es gibt Konzepte zum Bau makroskopischer linearer Paulfallen [38], die als Demonstrationsexperimente für Schule und Hochschule entwickelt wurden und nicht als Schülerexperimente gedacht sind. A. Schmitt, N. Coberger und K. Wendt beschreiben in [37] den Bau einer dreidimensionalen Paulfalle, die mit Teilen aus dem Baumarkt gebaut werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein erstes sehr einfaches 3D-Modell, das sich an die Paulfalle aus [37] anlehnt (s. Abb. 3.1), aufgegriffen und iterativ weiter entwickelt. Unter anderem wurden Elektrodenform, Abstände der Elektroden, Beleuchtung der Sporen



(a) An der Uni Mainz weiterentwickelte Version der Paulfalle aus [37].



(b) Erstes Modell der 3D-gedruckten Falle, entstanden vor Beginn dieser Arbeit.

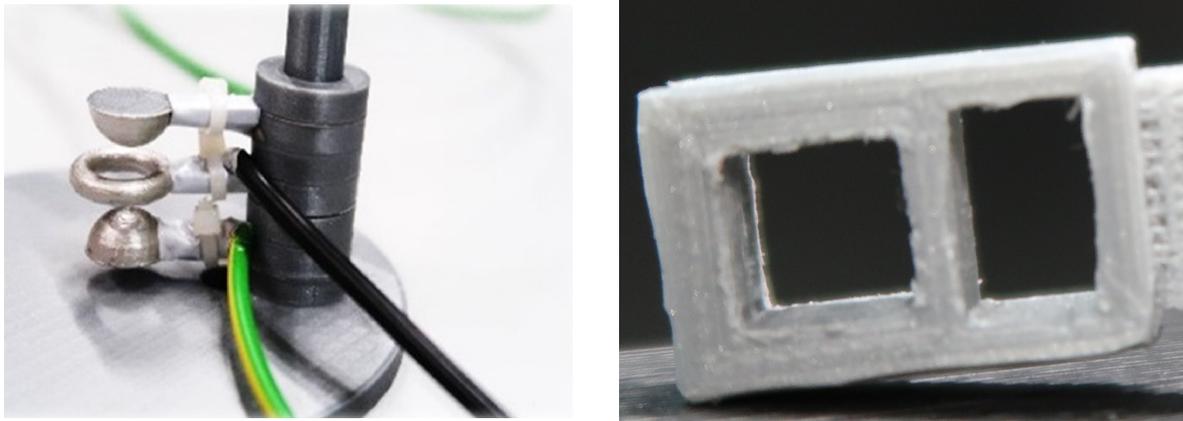
Abb. 3.1.: Ausgangsmodelle für die Entwicklung der Falle.

in der Falle, Verkabelung und Sicherheit optimiert. Zusätzlich wurde die Handhabung der Falle im Test mit Jugendlichen evaluiert und verbessert.

Die 3D-Modelle wurden mit der Software FreeCAD 0.16 erstellt. Der verwendete Drucker ist der Ultimaker2⁺ (Details s. A.1).

Um an den aus Plastik gedruckten Elektroden ein elektrisches Feld anzulegen zu können, werden diese mit elektrisch leitender Farbe bestrichen. Hier wurde zunächst Silberleitlack genutzt, der im Laufe der Entwicklung durch eine schwarze, elektrisch leitende Farbe (Details s. A.8) ersetzt wurde. Der Grund hierfür war, dass der Silberleitlack bei Bestrahlung mit dem grünen Laser/ LED-Licht zur Beobachtung der Teilchen stark reflektierte. Dadurch konnten die Sporen in der Falle weniger gut beobachtet werden (insbesondere bei der Aufnahme von Fotos oder Videos). Die Elektroden haben eine Halterung, mit der sie auf eine Stativstange gesteckt werden. Zwischen die Elektroden werden Platzhalter gesteckt, sodass die Elektroden den gewünschten Abstand haben. Für Details zu den Abständen s. Kapitel 3.2.2. In dieser ersten Version wurden die Elektroden mit Krokodilklemmen an die Spannungsversorgung angeschlossen. Der offensichtlichste Nachteil dieses Modells war die Rotationsfreiheit der Elektroden um die Stativstange mit kreisförmigem Querschnitt. Dieses Problem konnte durch Änderung in eine Stativstange mit quadratischem Querschnitt leicht gelöst werden.

Im gleichen Entwicklungsschritt wurden erste Ideen für einen Anschluss der Elektroden



(a) Befestigung der Spannungsversorgung mit Kabelbindern. (b) Kabelschacht in der Elektrodenhalterung.

Abb. 3.2.

an den Stromkreis entwickelt. Hierzu wurde ein Kabelschacht in die Elektrodenhalterung mit eingebaut (s. Abb. 3.2b) und die Kabel mit Kabelbindern (s. Abb. 3.2a) und Isolierband an den Elektroden angebracht. Diese Befestigungsmethode war jedoch nicht sehr robust.

Mit dem ersten funktionstüchtigen Fallenmodell stellte sich ein neues Problem. Der vorhandene Laser zum Beleuchten der Sporen hatte eine Wellenlänge von 532 nm und eine Laserleistung von max. 1 mW (s. A.2). Mit diesem ließ sich nur ein kleiner Bereich der Falle beleuchten und nur die dort befindlichen Sporen konnten beobachtet werden. Im Schülerversuch wurde klar, dass die Schüler, die im Voraus nicht wissen, wie sich die Sporen in der Falle verhalten, deren Anordnung nicht erkennen können. Genauer zum Einfluss der Probleme der Schüler auf die Gestaltung des Versuchs findet sich im Abschnitt zum Arbeitsblatt 4.4.2.

Die erste Idee war es, ein einfaches Teleskop zu bauen, um den Laserstrahl aufzuweiten. Die Bedenken gegen diese Idee waren die zusätzlichen Bauteile auf dem Tisch. Durch die Transformation der Hochspannung werden einige Kabel benötigt. Wenn die Schüler, zusätzlich zum Verständnis der Verkabelung noch einen weiteren Aufbau vor sich auf dem Tisch stehen hätten, würde das vom eigentlichen Thema, der Falle, ablenken. Zu diesem Zeitpunkt wurden die obere und untere Elektrode noch geerdet, was ein

zusätzliches Kabel erforderte. Beim Durchführen des Versuchs mit den Schülern stellte sich heraus, dass viele Schüler das Konzept der Erdung einer Schaltung nicht kannten. Die zweite Idee war, einen Laser mit größerem Strahldurchmesser zu verwenden. Hier sprach dagegen, dass bei einer Onlinebestellung nicht klar ist, ob der Strahldurchmesser wirklich groß genug ist. Zudem dauert es einige Tage bis der Laser nach einer Bestellung eintrifft und diese Lösung wäre wieder relativ teuer. Keine der beiden Optionen entsprach somit einer optimalen Lösung.

Da nur die Streuung des Lichts an den Sporen für die Sichtbarkeit sorgt, ist es nicht wichtig die Falle mit einem Laser zu beleuchten. Wichtig ist nur, dass die Leuchtkraft groß genug ist. Dies kann auch mit LEDs erreicht werden. Im Versuch wird eine LED mit 6000 mcd eingesetzt. Genaue Daten sind in [A.9](#) zu finden. Nach der Auswahl der LED für die Beleuchtung wurde das finale Falldesign entwickelt, das im Folgenden vorgestellt wird.

3.2. Vorstellung der Falle

3.2.1. Versuchsaufbau

Die Falle wird mit einer Wechselspannungsquelle der Firma LD Didactic ([A.3](#)), die bis zu 20 V liefert, betrieben. Um die erforderliche Hochspannung zu erhalten, wird ein Transformator mit einem Spulenpaar mit Primärwicklungszahl $N_1 = 50$ Windungen und einer Sekundärwicklungszahl $N_2 = 10000$ Windungen verwendet, sodass ein Verstärkungsfaktor von 200 erzielt wird. Die Spulen und der zugehörige Eisenkern sind ebenfalls von LD Didactic (Details s. [A.4](#), [A.5](#) und [A.6](#)). Bei einer Primärspannung von 10 V ist ein (nur kurzfristig getestet) stabiles Fangen der Bärlappsporen möglich.

3.2.2. Die Endversion der Falle

Im nachfolgende Abschnitt wird das aktuelle Modell der Falle beschrieben. Dieses besteht aus einer Box, in der sich die Elektronik befindet, sowie einem Deckel zum Aufstecken auf die Box. Auf diesem steht das Stativ für die Elektroden und ein Stativ auf das die Halterung für die LED gesteckt werden kann. Zudem beinhaltet der Deckel eine

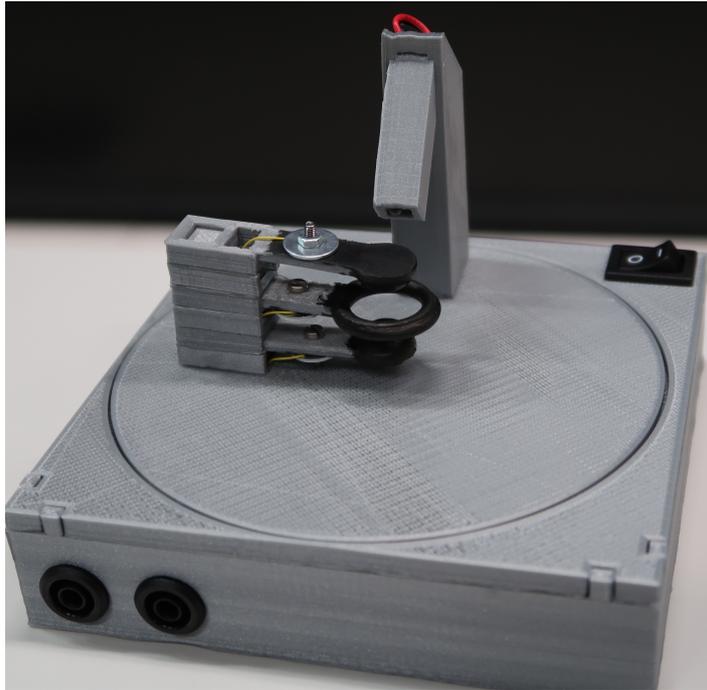
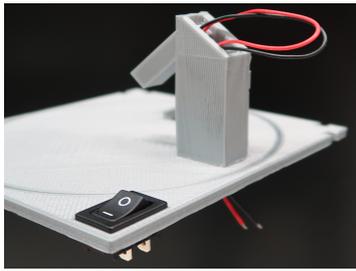


Abb. 3.3.: Das finale Modell der 3D gedruckten Paul Falle.

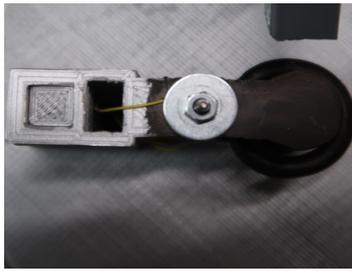
Öffnung zum Einsetzen eines An-Aus-Schalters für die LED (s. Abb. 3.4a, Datenblatt s. A.10).

Die obere und untere Elektrode haben die Form einer Halbkugel mit einem Radius von 7 mm. Der minimale Abstand dieser zum Mittelpunkt der Ringelektrode beträgt jeweils $z_0 = 7,5$ mm. Die Ringelektrode besteht aus einem Torus, dessen kleiner Radius 2 mm und dessen großer Radius 7,5 mm beträgt. Die betragsmäßige Differenz zwischen den beiden Radien entspricht r_0 aus dem Theorieteil. Um die Elektroden anzuschließen, wird ein massiver isolierter Kupferleiter mit $\varnothing = 0,5$ mm verwendet. Dieser ist offiziell nicht für Hochspannung gedacht, sondern nur für Effektivwerte bis zu 150 V. Aufgrund des geringen Stromes stellt dies jedoch kein Problem dar. Der Leiter wird mittels einer Schraube unter einer Beilagscheibe eingeklemmt, um einen Kontakt zur elektrisch leitenden Farbe auf der Elektrode herzustellen (s. Abb. 3.4b, Details s. A.12). Die Kabel werden durch einen Schacht in den Elektrodenhalterungen und ein Loch in der Deckelplatte in die Box geführt. In der Box werden die Kabel der oberen und unteren Elektrode an den selben $10\text{ M}\Omega$ Widerstand (Details s. A.11) gelötet. Das Kabel der

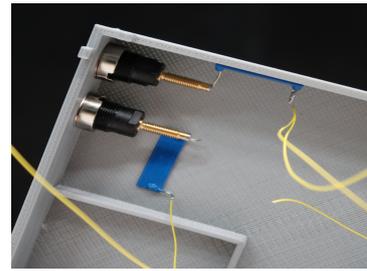
3. Entwicklung einer 3D-gedruckten Paulfalle



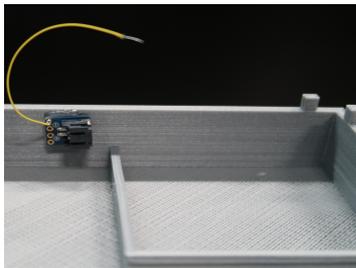
(a) Beleuchtungskomponenten in der Deckelplatte.



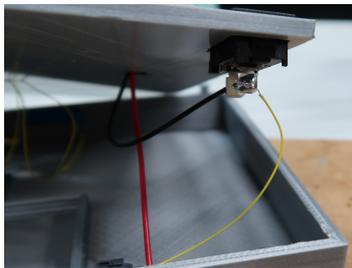
(b) Befestigung der Kabel an der Elektrode.



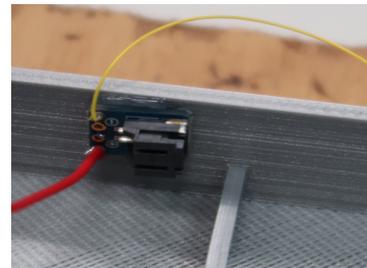
(c) Anschluss der Elektroden an Widerstände und Bananenstecker.



(d) Befestigung des Akkumulators und *Breakout Board* mit Kabel.



(e) Anschluss der Beleuchtungskabel an den Schalter.



(f) Anschluss der Beleuchtungskabel an das *Breakout Board*.

Abb. 3.4.: Das Zusammenbauen der Falle.

Ringelektrode wird an einem weiteren 10 M Ω Widerstand angebracht. Zur Begründung der zwei Widerstände s. Diskussion zur Sicherheit in Abschnitt 3.4. Die Widerstände sind wiederum jeweils an einen Laborsteckerverbinder (Details s. A.12) gelötet (s. Abb. 3.4c.). Über diese Steckerverbinder kann die Falle mit Bananensteckern an den Wechselstromkreis angeschlossen werden.

Für den Betrieb der LED wird ein Polymer-Lithium-Ionen-Akku genutzt (Details s. A.14). Dieser wird mit doppelseitigem Klebeband in die dafür vorgesehene Begrenzung in der Box geklebt und mit dem *JST-PH-2-Pin*-Stecker an ein *Breakout Boards* (Details s. A.13) angeschlossen, das mit Heißkleber an die Innenwand der Box geklebt wird (s. Abb. 3.4d). An den Minuspol des *Breakout Boards* wird ein kurzes Stück des Kupferleiters angeschlossen, das mit der einen Seite des An-Aus-Schalters für die LED verlötet

wird. Die andere Seite des Schalters wird mit dem schwarzen Ende des Kabels für den Verbindungsstecker des *JST-XH2.54*-Anschlusses für die LED verlötet (s. Abb. 3.4e).

Das rote Kabel wird an den Pluspol des *Breakout Board* gelötet (s. Abb. 3.4f).

Um die Sporen in der Falle gegen Luftströmungen zu schützen, die z.B durch Atmen, schnelle Körperbewegungen und Reden verursacht werden, kann eine Tageslichtprojektor-Folie in die auf dem Deckel eingelassene Rille gesteckt und mit Büroklammern zusammen gehalten werden. Ein Nachteil an dieser Konstruktion ist, dass man nicht mehr so gut sieht, sobald die Folie doppelt aufeinander liegt. Zudem wird die Folie durch fettige Finger schnell verschmutzt, was ebenfalls die Sicht auf die Sporen in der Falle trübt.

Damit die Falle nachgebaut werden kann, werden die 3D-Modelle und eine Bauanleitung [A.2](#) veröffentlicht.



Abb. 3.5.: Die Falle mit Strömungsschutz aus Tageslichtprojektor-Folie.

3.3. Fangen mit der Falle

Die Falle wurde mit verschiedenen Ringrößen und verschiedenen „Teilchen“ getestet. Im Versuch mit den Schülern werden Bärlappsporen gefangen. Sie haben eine Dichte von 460 kg/m^3 und fast 90 % haben einen Durchmesser zwischen 20 und $30 \mu\text{m}$. Die Bärlappsporen haben durch Reibung eine spezifische Ladung von $13,5 \text{ mC/kg}$ (vgl. [3]). Neben Bärlappsporen wurde versucht Kakao und Zimt in der Falle zu fangen. Diese sind durch Reibung untereinander, oder mit dem Gefäß zumindest teilweise elektrisch geladen. Zuerst wurde das Fangen von Kakaopulver in der Falle ausprobiert. Bei Kakao stellte sich das Problem, dass das Pulver durch den hohen Fettanteil sehr klebrig ist und es kaum möglich war einzelne Kakaopartikel in die Falle zu bekommen. Das Problem des Zusammenklebens konnte mit Zimtpulver vermieden werden. Jedoch fiel auf, dass auch hier nur wenige Partikel in der Falle gefangen wurden und die Mehrheit hindurch fiel. Dies ist wahrscheinlich auf unregelmäßige Massen der einzelnen Zimt-Partikel, die durch Mahlen entstehen, zurückzuführen. Um Zimt-Partikel zu fangen, muss die Spannung etwas kleiner sein als für Bärlappsporen (ca. 8 V Primärspannung). Dies lässt auf ein größeres Ladungs- zu Masseverhältnis schließen. Die Vorteile der Zimt-Partikel gegenüber den Bärlappsporen sind die einfachere Beschaffung von Zimt und dass man die größeren und braunen Partikel besser sieht als die weißen Bärlappsporen (s. Abb. 3.6d). Um ein effektiveres Fangen von Zimtpulver zu erreichen, könnte man versuchen, dieses durch ein sehr feines Sieb zu filtern.

Um die ideale Ringgröße herauszufinden, wurde der Radius anhand der Theorie zu gegebenem $z_0 = 7,25 \text{ mm}$ mit Gl. (2.3) zu $r_0 = 10,25 \text{ mm}$ berechnet. Daneben wurde die Falle mit kleineren Ringrößen bis zu einem Radius von $r_0 = 4 \text{ mm}$ getestet. Mit all diesen Ringen konnten Bärlappsporen gefangen werden. Da der Versuch nicht darauf ausgelegt ist, die Teilchen möglichst lange (über Stunden oder Monate zu fangen), hat ein Abweichen von der Theorie keine Auswirkungen auf die beobachtete Stabilität im Zeitraum von einigen Minuten. Deshalb wurde die Größe der Ringelektrode nach der Anordnung der Sporen in der Falle gewählt. Da die Schüler im Versuch aus der Anordnung der Teilchen in der Falle auf die Feldlinien schließen sollen, ist das Ziel die Teilchen deutlich in der Falle zu erkennen. Bei dem kleinen Ring mit $r_0 = 4 \text{ mm}$ befinden sich die Sporen sehr nahe der horizontalen Mittellinie der Falle. Bei dem be-



(a) Bälappsporen in der Falle bei einer Primärspannung von etwa 10 V.



(b) Vergrößerte Ansicht der Bälappsporen.



(c) Zimt in der Falle bei einer Primärspannung von etwa 8 V.



(d) Vergrößerte Ansicht der Zimt Teilchen.

Abb. 3.6.: Bälappsporen und Zimt in der Falle

rechneten $r_0 = 10,25$ mm können sehr viele Sporen gleichzeitig gefangen werden. Wenn man nicht genau hin schaut, kann man den Eindruck haben, dass sie sich in einer kugelförmigen Wolke anordnen. Diese Überlegungen führten zu dem Ringdurchmesser von $r_0 = 7,5$ mm.

3.4. Sicherheit

Da zum Fangen makroskopischer Teilchen ohne Vakuum Hochspannung benötigt wird¹, ist eine Auseinandersetzung mit den Sicherheitsnormen für Hochspannung erforderlich. Mit dem bereits erwähnten 10 M Ω Widerstand im Sekundärkreis, ist die Falle gemäß IEC 61010-1 ([12], S. 39 f) berührungssicher. Dies bedeutet, dass bei Wechselspannungen mit Effektivwert $U_{\text{eff}} = 70 \text{ V}$ (in nassen Umgebungen $U_{\text{eff}} = 16 \text{ V}$) der Effektivwert des Stroms kleiner als $I_{\text{eff}} = 0,5 \text{ mA}$ sein muss. Zudem ist die kapazitive Ladung von Bedeutung. Diese darf bei Spannungen bis zu $U_{\text{eff}} = 10,6 \text{ kV}$ (die entsprechende Scheitelspannung $U_{\text{Scheitel}} = 15 \text{ kV}$) nicht größer sein als $Q = 45 \mu\text{C}$.

Anhand dieser Vorgaben kann die Paulfalle auf Berührungssicherheit überprüft werden: Der Kleinspannungsstelltrafo der für das Paulfallen-Experiment verwendet wird, kann maximal $U_{\text{eff,prim}} = 20 \text{ V}$ zur Verfügung stellen. Mit dem Verstärkungsfaktor des Transformators von 200 ist die maximal erreichbare Effektivspannung im Sekundärkreis $U_{\text{eff,sec}} = 4 \text{ kV}$. Die Kapazität der Falle liegt unter dem Bereich der mit dem Multimeter messbaren Genauigkeit. Die Kapazität der insgesamt genutzten Kabel mit einer Gesamtlänge von 2x2 Metern, liegt unter 100 pF. Somit liegt die kapazitive Ladung mit $Q = 0,4 \mu\text{C}$ ² auf jeden Fall deutlich unter der Grenze von 45 μC . Mit dem 10 M Ω Widerstand im Sekundärkreis ist der Strom durch $U = RI$ auf $I_{\text{eff}} = 0,4 \text{ mA}$ beschränkt. und liegt damit unter der angegebenen Grenze. Somit gilt die Falle als berührungssicher. In Deutschland weichen die Spannungsgrenzwerte für die Schule teilweise ab. Sie sind in den *KMK-Sicherheitsrichtlinien zur Sicherheit im Unterricht* aufgeführt. J. Meyn empfiehlt in [18] (S.13), dass man mit den EU-Werten für nasse Umgebungen immer richtig liegt. Da die Sicherheit der Falle maßgeblich von dem 10 M Ω Widerstand im Sekundärkreis abhängt, ist dieser im finalen Modell der Falle in die Box mit eingebaut. Somit kann er auf keinen Fall heraus genommen oder vergessen werden, wie es im ursprünglichen Schaltkreis möglich war. Um Bedienungsfehler auszuschließen wurden noch weitere Überlegungen angestellt. In der ersten Testphase wurde die Schaltung geerdet betrieben. Dies wurde im Laufe der Entwicklung der Falle geändert und soll hier detailliert erläutert werden. Der Vorteil der nicht geerdeten Schaltung ist, dass man,

¹Im Vakuum beträgt die nötige Spannung nur wenige Volt (vgl. Gl. 2.12).

²berechnet mit $C = Q/V$

wenn man aus versehen nur eine Elektrode berührt, die Schaltung erdet und kein Strom fließt. Berührt man bei der nicht geerdeten Schaltung beide Elektroden mit einem Finger, so fließt nur ein Strom durch das Stück Finger, das sich zwischen den Elektroden befindet. Dies ist also bei jeder Stromgröße nicht lebensgefährlich. Auch hier ist es vorteilhaft, die Schaltung nicht zu erden. Das einzige Szenario in dem die fehlende Erdung die Situation „gefährlicher“ macht, ist mit jeder Hand eine unterschiedliche Elektrode anzufasst. Hierbei fließt der Strom dann direkt durch das Herz, anstatt, wie bei der geerdeten Schaltung, in den Boden abzuffießen. Das Berühren unterschiedlicher Elektroden mit beiden Händen ist sehr unwahrscheinlich und man darf an dieser Stelle nicht vergessen, dass der Strom ohnehin so klein ist, dass er ungefährlich ist.

Eine weitere Vorsichtsmaßnahme sind die zwei Widerstände vor den Elektroden. Bei der geerdeten Schaltung ist es wichtig, dass der Widerstand vor der nicht geerdeten Elektrode eingebaut ist. Da es in der Schule üblich ist, Versuche zu erden, soll mit den beiden Widerständen das Risiko, die Falle falsch anzuschließen verhindert werden.

3.5. Verbesserungsvorschläge

Die in Abschnitt 3.2.2 erläuterte Tageslichtprojektor-Folie zum Schutz gegen Luftströmungen, könnte noch gegen einen robusteren Schutz ausgetauscht werden. Hier wurden Überlegungen angestellt, eine Plexiglas Rohr zu zerschneiden und mit einem Deckel zu versehen.

Ein weiteres Problem im Versuchsaufbau ist, dass im Primärkreis ein relativ großer Strom fließt, der bei Übersteigen von 6 A dazu führt, dass die Stromsicherung in der Spannungsversorgung das Gerät abschaltet. Um dies zu vermeiden, kann ein Widerstand in den Primärkreis eingebaut werden. Wichtig ist, dass dieser nicht zu groß ist. Mit dem 10 M Ω Widerstand funktionierte die Falle nicht mehr. Hier sollte noch ein passender Widerstand gefunden werden.

Der letzte Feinschliff der Falle wird noch ein S'Cool LAB Logo sein, das auf die Falle mit aufgedruckt wird.

4. Die Paulfalle als Experiment im S’Cool LAB

Im Folgenden wird das Konzept des Paulfallen-Experimentes im S’Cool LAB vorgestellt. Dazu werden zunächst im Abschnitt 4.1 die Ziele, die mit dem Experiment verfolgt werden, dargestellt. Im darauffolgenden Abschnitt 4.3 wird auf die notwendige Vorbereitung der Schüler, bevor sie ans CERN kommen, eingegangen und danach im Abschnitt 4.4 die Experimentiereinheit im S’Cool LAB und die zugrundeliegenden lernpsychologischen Theorien beschrieben.

4.1. Ziele des Experiments

Die Theorie der Paulfalle ist komplex und mit Schülern nur stark vereinfacht thematisierbar. Hinzu kommt, dass der Aufbau durch den Transformator ein weiteres physikalisches Thema mit einbezieht. Diese Komplexität lässt die Frage aufkommen, ob es in 75 Minuten möglich ist, dass die Schüler das Experiment verstehen können, ohne überfordert zu werden.

Die Ziele des Experimentes werden in zwei verschiedene Kategorien unterteilt: physikalisches Verständnis und Interesse. Das physikalische Verständnis lässt sich wiederum in drei Grobziele aufteilen:

- Die Schüler lernen in vereinfachter Form, wie die makroskopischen Paulfalle funktioniert.
- Die Schüler lernen, dass Teilchenfallen ein wichtiges Instrument der aktuellen Forschung darstellen.

- Die Schüler lernen, dass es einen Unterschied zwischen der im S’Cool LAB genutzten Falle für makroskopische Teilchen und einer Falle für Elementarteilchen gibt.

Mit konkreten Feinzielen, die sich in den Fragen des Fragebogens widerspiegeln, können diese physikalischen Ziele überprüft werden (s. Abschnitt 5).

4.2. Zugrundeliegende lernpsychologische Theorie

Durch den Versuch werden die Schüler von einem Arbeitsblatt geleitet. Dieses stützt sich auf die POE-Methode (engl.: Predict, Observe, Explain, deutsch: Vorhersagen, Beobachten, Erklären), die von R. White und R. Gunstone 1992 erstmals veröffentlicht wurde [41]. Diese Methode besteht aus drei Schritten. Zuerst wird das Ergebnis eines Ereignisses vorhergesagt und die Vorhersage begründet. Im zweiten Schritt wird beobachtet und beschrieben was passiert und im letzten Schritt werden die Unterschiede zwischen Vorhersage und Beobachtung erklärt. Die Idee hinter der Methode ist, dass Schüler lernen sollen, wie man Informationen nutzt, um Ereignisse und Erfahrungen zu interpretieren. Nach White und Gunstone wird in Unterricht und Prüfungen bei der Frage nach Erklärungen das Ergebnis oft schon impliziert. Mit der POE-Methode soll erreicht werden, dass die Schüler lernen, ihr Wissen auf reale Situationen anzuwenden. K. Miller, N. Lasry, K. Chu, und E. Mazur zeigten 2013 (vgl. [19]), dass Studenten wenn mit der POE-Methode gearbeitet wird, mit 20 % höherer Wahrscheinlichkeit die richtige Beobachtung machen, als ohne vorherige Vorhersage des Ergebnisses.

4.3. Vorbereitung

Damit die Schüler maximal von dem Versuch profitieren können, ist ein entsprechendes Maß an Vorbereitung erforderlich. Im Austausch mit Schülern und Lehrern zeigte sich, dass sowohl zu viel als auch zu wenig Vorbereitung negative Auswirkung haben können. Es ist wichtig, dass die Schüler das zur Durchführung und zum Verständnis des Versuchs notwendige Vorwissen mitbringen. Wissen die Schüler jedoch schon sehr viel über Paulfallen und über das, was sie erwartet, sinkt die Motivation. Um die gleiche Vorbereitung für alle Schüler zu ermöglichen, wurde ein *Moodle*-Kurs entwickelt. Die Inhalte des Kurses sollen die wichtigen Grundlagen für das Paulfallen-Experiment wiederholen. Anschließend können die Schüler ihr Wissen in kleinen Quiz testen. Die behandelten Inhalte sind:

- Gefahrenhinweis Hochspannung: Hohe Spannungen verbunden mit hohen Strömen sind Lebensgefährlich. Deshalb wird im Versuch ein 10 M Ω Widerstand eingebaut, der nach der Formel $U = RI$ einen kleinen Strom garantiert und die Falle somit Berührungssicher macht.
- Schaltzeichen: die Schüler lernen die Bedeutung der Schaltzeichen, die im Arbeitsblatt und im weiteren *Moodle*-Kurs vorkommen. Dies sind die Schaltzeichen für Erdung, Wechselspannung, Widerstand, Glühlampe, Voltmeter, Amperemeter und Transformator.
- Transformator: Die Funktionsweise eines Transformators wird kurz wiederholt. Im Wesentlichen sollen die Schüler die Formel $N_1/N_2 = V_1/V_2$ verstehen und anwenden können.
- Elektrischer Stromkreis: Die Schüler müssen für Versuchsdurchführung wissen, wie man eine Spannung misst. Hierzu werden die Grundlagen zu Parallel- und Reihenschaltungen thematisiert und dass man zur Spannungsmessung eine Parallelschaltung braucht.
- Elektrische Feldlinien: Die Schüler lernen, dass elektrische Feldlinien die Richtung der elektrischen Kraft die auf eine positive Probeladung in einem elektrischen Feld wirkt, angeben. Ziel ist es, dass sie die Feldlinien für zwei kugelförmige Ladungen

die einmal beide positiv, einmal beide negativ und einmal eine positiv und eine negativ geladen sind verstehen und zuordnen können.

Der Kurs kann die Behandlung der Themen im Unterricht nicht ersetzen, sondern ist vielmehr als Erinnerungshilfe gedacht, damit die Schüler ihr Wissen wieder aktivieren können. Mit diesen Grundlagen sind die Schüler so auf den Versuch vorbereitet, dass sie den Anweisungen im Arbeitsblatt folgen können und das vereinfachte Modell der physikalischen Grundlagen der Paulfalle verstehen können.

Der *Moodle*-Kurs wurde bisher noch nicht von Schülern getestet, soll aber langfristig als Vorbereitung zum Paulfallen-Versuch im S’Cool LAB eingesetzt werden.

4.4. Versuchsablauf

4.4.1. Einführung

Zu Beginn bekommen die Schüler eine kurze Einführung in den Versuch. Es wird vorgestellt, was sie erwartet. Sie werden lernen, wie man Teilchen mit einer Paulfalle fängt und sie erfahren, dass sie Bärlappsporen fangen werden, die durch Reibung elektrisch geladen sind. Danach werden die Schüler gefragt, ob sie wissen, wofür Teilchenfallen benötigt werden und daraufhin wird ihnen erzählt, dass am CERN Paulfallen in der Antimaterieforschung zum Einsatz kommen. Die Schüler werden gefragt, was sie über Antiteilchen wissen. Die mit den Schülern besprochenen Eigenschaften sind, dass es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt, dass die gleiche Masse besitzt und dessen Ladung entgegengesetzt ist. Wenn ein Teilchen und sein Antiteilchen-Partner aufeinander treffen annihilieren sie. Daraufhin wird das GBAR-Experiment vorgestellt, mit dem herausgefunden werden soll, wie Gravitation auf Antimaterie wirkt. Die Schüler werden gefragt, was passiert, wenn man einen Apfel aus normaler Materie von einem Meter über der Erde fallen lässt. Hier sind sie sich bei ihrer Antwort einig. Danach werden sie gefragt was sie glauben was passiert, wenn man sich einen Apfel aus Antimaterie vorstellt und ihn auf unsere Erde aus Materie fallen lässt. Genau das soll beim GBAR-Experiment mit Antiwasserstoffatomen getestet werden. Bisher wurde noch kein Freifallexperiment durchgeführt, dass diese Frage mit Sicherheit klären könnte. (Für genauere Ausführungen zum aktuellen Stand Gravitationsforschung mit

Antimaterie und das GBAR-Experiment s. Abschnitt 2.2.) Nachdem das GBAR-Experiment angesprochen wurde, werden die Schüler gefragt, was sie meinen, wozu in diesem Experiment Paulfallen benötigt werden. Die Schüler, mit denen der Versuch durchgeführt wurde, gaben als Antworten, dass man damit das Antiteilchen an einem gewünschten Ort festhalten kann. Eine weitere Begründung der Schüler war, dass die Antiteilchen nicht annihilieren können, wenn sie im Vakuum eingesperrt werden. Anschließend wird noch diskutiert, mit welcher Kraft Teilchen in Paulfallen gefangen werden und es wird thematisiert, dass die Teilchen geladen sein müssen, um gefangen werden zu können. Für das GBAR-Experiment heißt das, dass in den Paulfallen nur Antiwasserstoffionen gefangen werden können. Zudem wird noch abgeklärt, ob die Schüler das Konzept von elektrischen Feldlinien kennen, das zur Erklärung des Versuches genutzt wird.

In der Regel besuchen die Gruppen vor den Experimentieren im S’Cool LAB ein Experiment am CERN. Im Idealfall findet der Besuch bei GBAR-Experiment statt, sodass die Schüler schon von der Antimaterieforschung und dem GBAR-Experiment am CERN gehört und es gesehen haben.

4.4.2. Arbeitsblätter

Die Entwicklung des Arbeitsblattes wurde anhand von Videoanalysen der Schüler überprüft. Der erste Entwurf wurde mit einer britischen Schülergruppe ausprobiert. Aus den Videoaufzeichnungen von den Schülern während des Experimentierens, konnte entnommen werden, an welchen Stellen diese Probleme hatten, die Anweisungen im Arbeitsblatt zu verstehen und wo es einer feineren Anleitung bedurfte, um ein Verständnis für die Physik der Falle zu erlangen. Aus dem Videomaterial ging hervor, dass das größte Problem war, dass die Schüler Schwierigkeiten hatten, die Bärlappsporen in der Falle zu beobachten. Dadurch, dass sie den Laser frei in der Hand hielten, war die Beleuchtung unruhig und es konnten durch den kleinen Durchmesser des Laserstrahls nicht alle Bärlappsporen auf einmal beobachtet werden. Dies führte dazu, dass die Schüler Probleme hatten, das Funktionsprinzip der Falle zu verstehen. Im Rahmen der Videoanalyse entstand die Idee, die Schüler im Arbeitsblatt nicht nur die Feldlinien in der

Falle, sondern auch die Bewegung der Teilchen diskutieren zu lassen. Mit einer deutschen Schülergruppe wurde das weiterentwickelte Arbeitsblatt erneut getestet. Durch weitere Videoaufnahmen und deren Analyse konnte die aktuelle Version des Arbeitsblattes [A.3.1](#) erstellt werden. Diese bewährte sich bei zwei weiteren Schülergruppen.

4.4.3. Versuchsdurchführung

In den ersten beiden Schritten, sollen die Schüler den Versuchsaufbau vervollständigen und verstehen. Dazu wird der Primärkreis aufgebaut, der Verstärkungsfaktor des Transformators nach der POE-Methode untersucht und die Verkabelung der Falle, die schon im Sekundärkreis angeschlossen ist, in einer „Multiple-Choice“-Aufgabe nachvollzogen. Ziel der letzten Aufgabe ist es, dass die Schüler verstehen, wie die Spannung an den Elektroden angelegt ist und wie das elektrische Feld in der Falle aussieht.

Das erste Experiment besteht darin, dass die Schüler Bärlappsporen fangen und genau beobachten, wie diese sich in der Falle verhalten. Jeder Schüler wählt die Form in der sich die Sporen anordnen aus vier Möglichkeiten aus und zeichnet sie in einem Bild vom Querschnitt der Falle an den Ort an dem er die Teilchen erwartet. Dies wird, wie oben beschrieben, zuerst vorhergesagt und danach beobachtet. Für die Erklärung bekommen die Schüler drei Fragen an die Hand:

- Warum sind die Sporen nicht alle im Zentrum der Falle, sondern haben einen gewissen Abstand zueinander?
- Warum seht ihr Linien und keine kleinen Punkte?
- Warum ordnen sich die Sporen in der Form an, die ihr gesehen habt?

Im zweiten Experiment beschäftigen sich die Schüler mit den Spannungsgrenzen bis zu denen die Falle die Bärlappsporen fängt. Sie sollen herausfinden in welchem Spannungsbereich Sporen gefangen werden können und ab welcher oberen bzw. unteren Spannung die Sporen aus der Falle heraus fallen. Je nach Größe der Ringelektrode, die in der Testphase bei den Gruppen zum Teil unterschiedlich war, liegt die obere Spannungsgrenze, bei der die Sporen noch gefangen werden, über den mit der Spannungsquelle und dem Transformator maximal erreichbaren 4 kV.



Abb. 4.1.: Ladungszustände der Elektroden

Ein Video von den Sporen in der Falle aufzunehmen, stellt das letzte Experiment dar. Dies geschieht mit einem USB-Mikroskop (Details s. A.7). Während der Videoaufzeichnung sollen die Schüler die angelegte Spannung verändern und anschließend die Veränderungen in der Bewegung der Teilchen analysieren.

Nach diesem Experiment erfolgt eine Diskussion der elektrischen Feldlinien in der Falle, sowie der Bewegung der Teilchen, die anschließend in der Nachbesprechung aufgegriffen wird.

Für besonders schnelle Gruppen gibt es noch ein Zusatzexperiment. Sie können mit einer überlagerten Gleichspannung, die zwischen der oberen und unteren Elektrode angelegt wird, die Gravitation kompensieren. Bei genauer Beobachtung kann man sehen, dass die Sporen im bisher genutzten Aufbau etwas unterhalb des Fallenmittelpunktes schweben, was auf den Einfluss der Gravitation auf die makroskopischen Teilchen zurückzuführen ist. Durch die fehlende Zeit, die durch das Ausfüllen der Fragebögen von der Versuchszeit abgezogen wurde, war es selbst für sehr schnelle Schüler zeitlich nicht möglich, diesen Versuchsteil durchzuführen. Mit der Endversion der Falle, ist das Anlegen einer Gleichspannung zwischen der oberen und unteren Kugel-Elektrode nicht mehr möglich.

4.4.4. Ergebnissicherung

Am Ende des Versuchs, wird gemeinsam über die wichtigen Erkenntnisse des Versuchs gesprochen. Dazu wird mit den Schülern das elektrische Feld in der Falle und die Bewegung der Teilchen diskutiert. Hierzu wird die Erklärung der Falle auf den Schülern bekannte Prinzipien reduziert. Anhand der zwei in Abb. 4.1 dargestellten Ladungszustände der Falle werden die elektrischen Feldlinien und die Beeinflussung eines positiv geladenen Teilchens von einer Kraft entlang dieser Feldlinien besprochen. Durch einen

schnellen Wechsel zwischen diesen beiden Ladungszuständen, kann die Bewegung der Bärlappsporen in der Falle plausibilisiert werden.

Zudem werden noch einmal die Unterschiede zwischen dem Fangen von makroskopischen Teilchen und von Elementarteilchen bzw. Antiteilchen thematisiert. Ein Fragenkatalog für Tutoren ist in [A.3.2](#) zu finden.

5. Auswertung der Fragebögen

Das Paulfallen Experiment ist von der zugrundeliegenden Physik für Schüler anspruchsvoll und setzt einiges an Vorwissen voraus. Deshalb stellt sich die Frage, ob der Versuch zu kompliziert ist, oder ob er auf das Niveau der Schüler reduziert werden kann. Ziel ist es, dass die Schüler bei diesem Versuch einen Lernerfolg erzielen und dabei nicht überfordert werden. Um dieses Ziel zu überprüfen, wurde ein Fragebogen entwickelt, der das Verständnis der Schüler erfasst, nach ihrem Interesse fragt und ihre kognitive Belastung misst. Zur Erhebung der Daten wurde von Schülern direkt vor dem Versuch ein *Pre-Test* ausgefüllt und direkt nach dem Versuch ein *Post-Test*. Die Tests sind im Anhang A.4 zu finden. Ein *Follow-up-Test* war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Fragebögen wurden von einer niederländischen und einer norwegischen Schulklasse ausgefüllt, die im S’Cool LAB den Paulfallen-Versuch durchführten. Das Durchschnittsalter der Schüler betrug 17 Jahre und neun Monate. Das minimale Alter lag bei 16 und das maximale Alter bei 19 Jahren. Von den insgesamt 42 Schülern waren 31 männlich und elf weiblich. Da nicht alle Schüler jede Frage beantworteten, konnten in manchen Teilen der Auswertung nicht die Gesamtzahl von 42 Schülern berücksichtigt werden. Die Fragebögen wurden in englischer Sprache erstellt. Da dies nicht die Muttersprache der Schüler war, ist anzunehmen, dass das Beherrschen der englischen Sprache einen Einfluss auf die Antworten der Schüler hat, der in diesem Rahmen jedoch weder untersucht noch berücksichtigt wird. In den Fragebögen wurden drei verschiedene Konzepte erfasst: (1) Physikalisches Verständnis/Wissen, (2) Interesse und (3) kognitive Belastung. Diese drei Bereiche wurden separat ausgewertet und bei unbeantworteten Fragen innerhalb jedes Bereiches ein listenweiser Fallausschluss durchgeführt. D.h. sobald ein Schüler in einem Block eine Frage nicht beantwortete, wurden alle vorhandenen Daten dieses Schülers in der Auswertung dieses Blockes nicht berücksichtigt. Daher unterscheiden sich die angegebenen Stichprobengrößen in den verschiedenen Bereichen. Zur

Auswertung der Fragebögen wurde das Programm Wolfram Mathematica 10.4 [43] genutzt.

In dem Bereich über das physikalische Verständnis und Wissen der Schüler werden die Antworten auf die *Multiple-Choice*-Fragen und wie sicher sich die Schüler mit ihrer Antwort sind, angegeben und in Balkendiagrammen dargestellt. Die Ergebnisse werden qualitativ diskutiert.

Bei der Auswertung zur kognitiven Belastung werden die Mittelwerte der Zustimmung zu gegebenen Aussagen ebenfalls in einem Balkendiagramm dargestellt. Dieses beinhaltet zusätzlich die Standardabweichung der angegebenen Mittelwerte.

Zur Auswertung der Fragen zum Interesse werden, wie bei der kognitiven Belastung, die Mittelwerte der Daten qualitativ diskutiert und in Balkendiagrammen mit Standardabweichung angegeben. Zusätzlich wurde ein Wilcoxon-Test zur Überprüfung der Signifikanz der Veränderung der Mittelwerten zwischen *Pre*- und *Post*-Test durchgeführt, da die Normalverteilungsvoraussetzung des t-Tests in den Daten nicht haltbar war. Der Wilcoxon-Test ist nicht an eine parametrische Verteilung der Daten geknüpft und kann wie der t-Test zum Vergleich der Ergebnisse bei Messwiederholungen genutzt werden. Dazu werden die empirische Differenzen der Mittelwerte der ersten und zweiten Messung für jede Versuchsperson (VP) betrachtet. Damit gibt er nur Auskunft über die Veränderung der Mittelwerte einer VP und liefert keinen Vergleich zwischen den VPs. Nach der Differenzenbildung werden diese Betragsmäßig sortiert. Die Differenzen die Null ergeben werden in der Auswertung nicht beachtet. Danach wird den Beträgen der Differenzen ein Rang R zugewiesen. Dem niedrigsten Wert kommt der Rang $R=1$ zu, dem nächsten der Rang $R=2$, usw. Anschließend werden die Ränge mit dem Vorzeichen der Differenz vor Betragsbildung versehen (gerichtete Ränge). Bei Annahme der Nullhypothese sollten gleich viele positive wie negative Ränge auftreten, deren Werte ungefähr gleich groß sind. Der Testwert ist $W = \min(|\sum R_{positiv}, \sum R_{negativ}|)$. Zu jedem Signifikanzniveau gibt es einen maximalen W -Wert, der von der Anzahl der einfließenden Mittelwerte abhängig ist. Um die Nullhypothese ablehnen zu können, muss der in einem Wilcoxon-Test berechnete W -Wert kleiner sein, als dieser maximale W -Wert. In der folgenden Auswertung wird auf ein 5 %-Signifikanzniveau getestet (vgl. [29]).

5.1. Physikalisches Verständnis

In diesem Abschnitt werden die Fragen zum physikalischen Verständnis, des genutzten Fragebogens, beschrieben und ausgewertet. Die Fragen dienen der Überprüfung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Lernziele. Dazu beantworteten Schüler in einem *Pre-* und einem *Post-Test Multiple-Choice-Fragen*, die jeweils eine richtige Antwort haben. Es existieren sowohl Fragen mit vier Antwortmöglichkeiten als auch Ja-Nein-Fragen. Zur Entwicklung der Fragen wurden Feinziele aufgestellt, die anschließend in Fragen umformuliert wurden. Als Distraktoren wurde versucht mögliche Fehlvorstellungen der Schüler als Antwortmöglichkeiten anzugeben, um zu sehen, ob selbige durch den Versuch unterstützt werden oder nicht. Eine genauere Untersuchung von möglichen Fehlvorstellungen zu den einzelnen Fragen war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Daher existieren nicht für alle Fragen ideale Distraktoren.

Um einen Einblick zu bekommen, bei welchen Fragen die Schüler die Antwort raten und bei welchen sie die Antwort wissen, sollten sie zu jeder Frage angeben, wie sicher sie sich bei ihrer Antwort sind. Dies geschah auf einer fünfstufigen Skala zwischen „*Not confident at all*“ und „*Very confident*“. Die Sicherheit wurde für die Auswertung in eine Prozentskala umgerechnet. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass die Abstände der Skala äquidistant sind. Mit dieser Methode lassen sich Fehlvorstellungen (falsche Antworten mit hoher Sicherheit) identifizieren.

Obwohl im *Pre-* und im *Post-Test* Fragen zur Physik von Paulfallen bzw. Teilchenfallen im Allgemeinen gestellt werden, wurde kein Test zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Dies liegt daran, dass die Fragen im *Post-Test* zu stark von denen im *Pre-Test* abweichen. Die ursprüngliche Idee, den Lernzuwachs zu überprüfen, musste aufgegeben werden. Da sich die Lernziele direkt auf die Paulfalle beziehen, war es bei vielen Fragen nicht möglich sie vor dem Versuch zu stellen, da die Schüler die Fragestellungen ohne den Versuch durchgeführt zu haben, nicht verstehen hätten können.

Der Fragenblock zum physikalischen Verständnis teilt sich in drei Bereiche: *Verständnis der Falle, Paulfallen/Teilchenfallen in der Forschung* und *Unterschiede zwischen makroskopischen Paulfalle und Paulfallen für Elementarteilchen*. Im Folgenden wird die Auswertung vorgestellt. Dabei gehen nach listenweisem Fallausschluss die Antworten von 36 Schülern ein. Dies wird in den Diagrammunterschriften mit $N=36$ angegeben.

Dort werden die Schülerantworten und die durchschnittlichen Sicherheiten zu den Antworten dargestellt. Bei Fragen bei denen weniger als 80 % der Schüler die richtige Antwort gegeben haben, wird genauer auf die Sicherheiten bei den Antworten und mögliche Gründe für die Antworten der Schüler eingegangen. Bei Fragen bei denen über 80 % die richtige Antwort angegeben haben, wird in Tabelle 5.1 die Frage mit der richtige Antwort angegeben. Zudem wird dort die Prozentzahl der Schüler mit der richtigen Antwort und der Mittelwert über die Sicherheit der Schüler mit der richtigen Antwort angeführt. Die zugehörigen Diagramme in denen alle Antworten dargestellt sind, befinden sich im Anhang (A.5).

5.1.1. Auswertung: Verständnis der Falle

Dieser Abschnitt widmet sich der Auswertung der Fragen zu der Funktionsweise der Paulfalle. Im Folgenden werden alle Fragen vorgestellt und schwerpunktmäßig auf die Fragen mit negativ auffälliger Antwortstatistik eingegangen.

Darüber, dass ein Teilchen elektrisch geladen sein muss, um von einem elektrischen Feld beeinflusst zu werden, sind sich die meisten Schüler einig und sowohl im *Pre*- als auch im *Post*-Test in ihrer Antwort sicher (s. Tabelle 5.1, Pre1.1, Post1.1 und A.18a und A.18b). Die zweite Frage im *Pre*-Test fragt nach den Kräften, mit denen Ionen gefangen werden können. In der allgemeinen Frage sind dies elektrische und magnetische Kraft. Die Antworten der Schüler und die zugehörigen Sicherheiten sind in Abb. 5.1a dargestellt. Die Antworten, dass mit elektrischer oder magnetischer Kraft gefangen werden kann, sind an sich nicht falsch, geben jedoch nicht die komplette Antwort auf diese allgemeine Frage. Dies erklärt auch die relativ hohe Sicherheit, bei diesen Distraktoren. Die korrespondierende Frage im *Post*-Test fragt danach mit welcher Kraft Ionen in einer Paulfalle gefangen werden. Hier haben die meisten Schüler (88,89 %) richtig geantwortet und waren sich mit ihrer Antwort auch sicher (83,59 %) (s. Tabelle 5.1, Post1.2 und A.18c).

Dem *Post*-Test zu folge haben die Schüler die physikalischen Grundlagen des Versuches verstanden. Von den 36 Schülern wissen 88,89 %, dass an die Falle eine Wechselspannung angelegt wird. Insgesamt 91,67 % der Schüler wissen, wie sich ein Teilchen in der Falle verhält und ebenfalls aus welchem Grund (94,44 %). Probleme hatten sie bei den

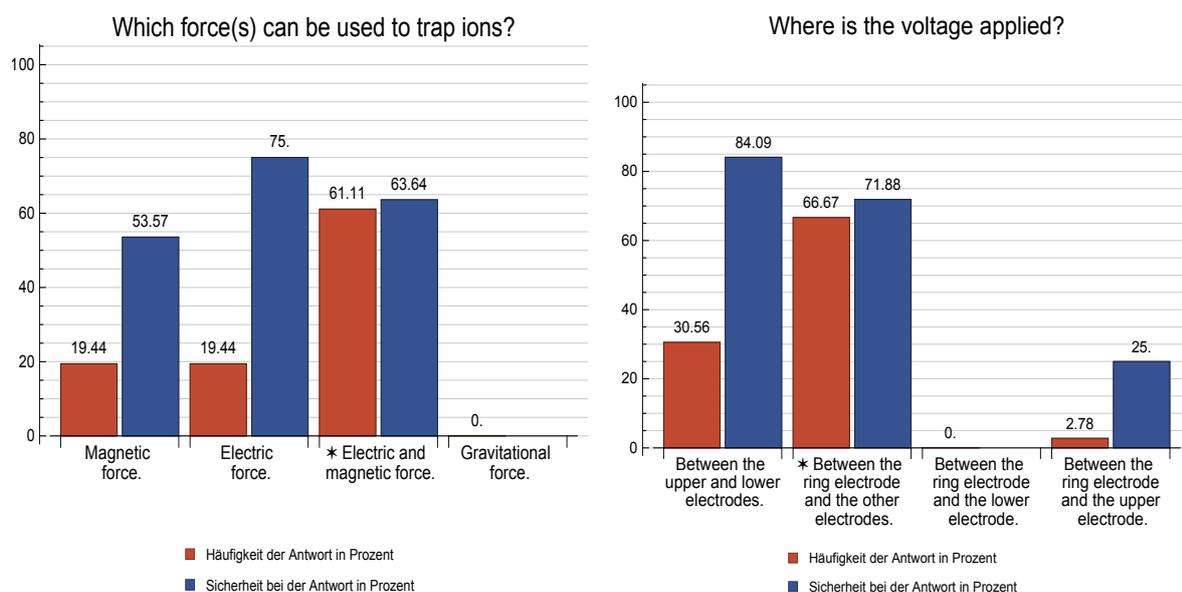
Nummer	Frage	richtige Antwort	Häufigkeit d. richtigen Antwort	Mittlere Sicherheit d. richtigen Antwort
Pre1.1	Which property of a particle determines whether or not it is affected by an electric field?	It has to be electrically charged.	94,44 %	82,35 %
Pre1.2	Which force(s) can be used to trap ions?	Electric and magnetic force.	61,11 %	63,64 %
Post1.1	Which property of a particle determines whether or not it is affected by an electric field?	It has to be electrically charged.	97,22 %	92,86 %
Post1.2	Which force(s) hold the particles in the quadrupole ion trap?	Electric force.	88,89 %	83,59 %
Post1.3	Which voltage is essential to trap particles in a quadrupole ion trap?	AC voltage.	88,89 %	91,41 %
Post1.4	Where is the voltage applied?	Between the ring electrode and the other electrodes.	66,67 %	71,88 %
Post1.5	How does a particle behave in the quadrupole ion trap?	It moves back and forth very fast.	91,67 %	93,94 %
Post1.6	Why does the particle behave like that?	Due to the electric force which operates along the field lines.	94,44 %	84,56 %
Post1.7	In which range is the voltage we need to trap microscopic particles such as the lycopodium spores in our quadrupole ion trap?	400-4000 V	25,00 %	77,78 %
Pre2.1	What are particle traps used for?	To investigate the properties of particles.	91,67 %	71,21 %
Pre2.2	If you want to trap an antihydrogen ions, what is a very important for the trap?	You need vacuum inside the trap.	66,67 %	61,46 %
Pre2.3	How can you determine the position of an antihydrogen in a particle trap?	Not at all. You can register it if it leaves the trap and annihilates.	69,44 %	63,00 %
Post2.1	What are particle traps used for?	To investigate the properties of particles.	94,44 %	84,57 %
Post2.2	2 If you want to trap an antihydrogen ion, which important difference will you need in the experimental setup compared to our setup?	You need vacuum inside the trap.	91,67 %	89,39 %
Post2.3	How can you determine the position of an antihydrogen ion in a quadrupole ion trap?	Not at all. You can register it if it leaves the trap and annihilates.	52,78 %	69,74 %
Pre3.1	Do you trap the particles in a real particle trap with the same physical principle as we will do?	Yes.	77,78 %	60,71 %
Pre3.2	Are elementary particles in fundamental research trap influenced by the same forces as microscopic particles in the trap we will use?	No.	22,22 %	43,75 %
Post3.1	Do you trap the particles in a real quadrupole ion trap with the same physical principle as we did?	Yes.	91,67 %	71,97 %
Post3.2	Are elementary particles in a fundamental research trap influenced by the same forces as particles in our trap are?	No.	19,44 %	67,85 %
Post3.3	It is possible to trap elementary particles with our trap?	No.	41,67 %	78,33 %
Post3.4	Is it possible to trap antihydrogen ions with our trap?	No.	66,67 %	71,88 %

Tabelle 5.1.: Übersicht über die Verständnisfragen jeweils mit der richtigen Antwort auf diese Frage, wie häufig diese angegeben wurde und wie sicher die Schüler sich dabei waren.

Fragen, die sich auf den Versuchsaufbau beziehen (s. Abb. 5.1b und 5.1c). Offensichtlich haben weniger als 70 % der Schüler wirklich verstanden, wie die Spannung an der Falle anliegt. Zudem sind sich die Schüler, die angeben dass die Spannung zwischen der oberen und unteren Elektrode anliegt (30,56 %), bei ihrer falschen Antwort sehr sicher richtig geantwortet zu haben (84,10 %). Dies ist ein unerwartetes Ergebnis, da im Arbeitsblatt eine *Multiple-Choice*-Aufgabe zur Verkabelung der Falle gestellt und von allen Gruppen richtig beantwortet wurde. Dies zeigt deutlich, dass man sich nicht darauf verlassen kann, dass die Schüler so zusammen arbeiten, dass am Ende alle auf dem gleichen Wissensstand sind und jeden Schritt verstanden haben. Weitere Probleme die darauf hin weisen, dass die einzelnen Arbeitsschritte im Arbeitsblatt nicht in der Art und Weise bei den Schülern ankommen, wie es geplant war, zeigt das Ergebnis der Frage Post1.7, s. Abb. 5.1c: Nur 25,00 % der Schüler können den Bereich der Spannung die zum Fangen der Bärlappsporen an den Elektroden anliegt, richtig angeben. Bei den 30,56 % der Schüler die angegeben haben, dass die benötigte Spannung zwischen 1 – 20 V liegt, kann man spekulieren, dass sie den zwischen geschalteten Transformator vergaßen und den Spannungsbereich der zur Verfügung gestellten Spannungsquelle angaben. Bei den restlichen 44,44 % ist nicht klar, womit sie ihre Angabe begründen könnten. Hinzu kommt, dass die mittlere Sicherheit bei den Antworten zwischen 70 % und 80 % liegt, was andeutet, dass die Schüler die Antworten nicht lediglich geraten haben. Jedenfalls ist davon auszugehen, dass ein großer Anteil der Schüler es nicht geschafft hat, den Transfer von der Berechnung und Messung des Verstärkungsfaktors des Transformators zu der Angabe eines Spannungsbereiches mit dem Bärlappsporen gefangen werden können, zu erbringen.

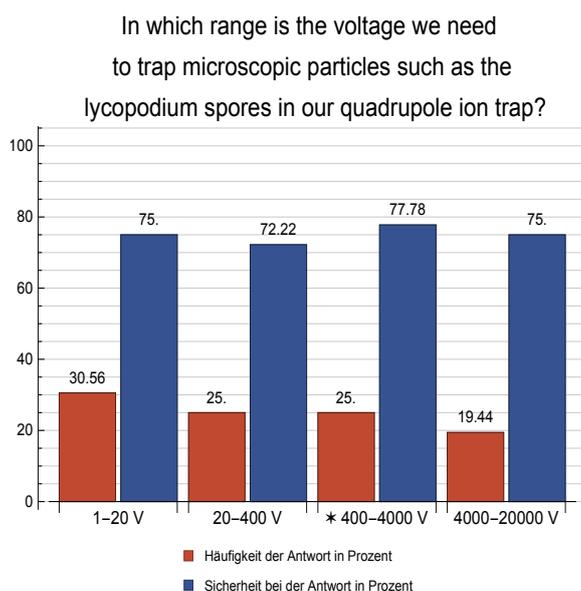
5.1.2. Auswertung: Paulfallen in der Forschung

Im zweiten Block des Fragebogenabschnitts wird nach Paulfallen bzw. im *Pre*-Test allgemein nach Teilchenfallen in der Forschung gefragt. Dass diese genutzt werden, um Teilcheneigenschaften zu untersuchen, ist den Schülern sowohl vor, als auch nach dem Paulfallen Experiment bewusst (*Pre*: 91,67 %, *Post*: 94,44 %). Die Sicherheit bei dieser Antwort ist im *Post*-Test (84,57 %) gegenüber dem *Pre*-Test (71,21 %) noch einmal gestiegen (vgl. Tabelle 5.1, Pre2.1, Post2.1 und Abb. A.19a und A.19b). Das ein wichtiger



(a) Pre-Test, Frage 1.2, (N=36),
* = richtige Antwort

(b) Post-Test, Frage 1.4, (N=36),
* = richtige Antwort



(c) Post-Test, Frage 1.7, (N=36),
* = richtige Antwort

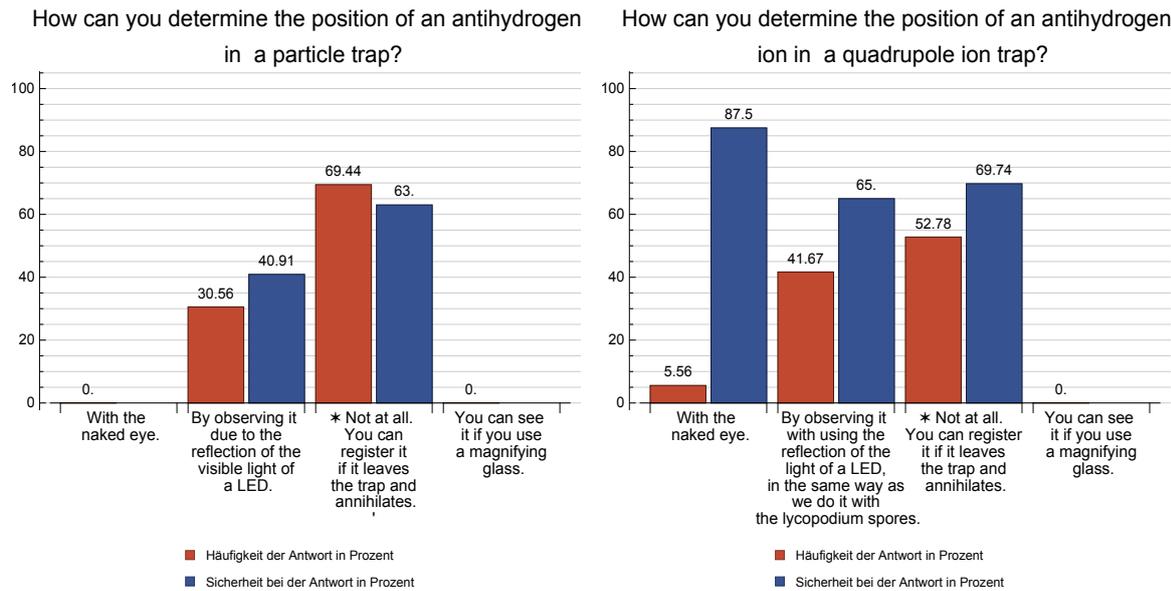
Abb. 5.1.: Grafiken zu den Verständnisfragen, die weniger als 80 % der Schüler richtig beantworteten.

Unterschied zwischen der makroskopischen Falle, die im S’Cool LAB genutzt wird, und einer Falle in der Forschung das Vakuum in einer Forschungsfalle ist, lernen die Schüler in dem Versuch. (Siehe Tabelle 5.1, Pre2.2 und Post2.2 und Abb. A.19c und A.19d). Schwierigkeiten haben die Schüler mit der Frage zur Beobachtung von Teilchen in der Falle. Beim Vergleich der Antworten im *Pre*- und *Post*-Test (s. Abb. 5.2a und 5.2b), geht hervor, dass sich die Schüler im *Pre*-Test wie zu erwarten mit ihren Antworten nicht so sicher sind wie im *Post*-Test. Allerdings geben im *Pre*-Test mit 69,44 % mehr Schüler die richtige Antwort als im *Post*-Test (52,78 %). Dafür glauben im *Post*-Test mehr Schüler als im *Pre*-Test, dass man die Position eines Antiwasserstoffions durch die Reflexion des Lichts einer LED bestimmen kann.

Dies könnte darauf hin deuten, dass die Schüler nicht verstehen, warum man die Bärlappsporen sehen kann, wenn man sie mit einer LED beleuchtet, oder sie sich nicht vorstellen können, dass ein Antiwasserstoffion so viel kleiner ist, dass man es mit dieser Methode nicht betrachten kann.

5.1.3. Auswertung: Unterschiede zwischen makroskopischen Paulfallen und Paulfallen für Elementarteilchen

Viele Schüler (77,78 %) glaubten bereits vor dem Versuch, dass die physikalischen Prinzipien, die in der Paulfalle im S’Cool LAB makroskopische Teilchen fangen, auch in der echten Forschung zum Fangen von Elementarteilchen genutzt werden. Nach dem Versuch geben 91,67 % dies Antwort an. Die Schüler haben also verstanden, dass das zu Grunde liegende Prinzip das selbe ist. Wenn es um die Unterschiede geht, fällt es den Schülern schwerer, eine richtige Antwort zu geben, wie die folgende Auswertung zeigt. Die zweite Frage in diesem Block zielt auf einen dieser Unterschiede ab. Die richtige Antwort auf die Frage ob die Teilchen von den gleichen Kräften beeinflusst werden, ist „*Nein*“. Die makroskopischen Bärlappsporen bewegen sich nicht um den Fallenmittelpunkt, sondern werden durch die Gravitation etwas nach unten gezogen (zur Theorie s. Kapitel 2.1.3). Elementarteilchen sind so leicht, dass dieses Phänomen nicht auftritt. Ihre Position in der Falle wird durch die Gravitation nicht merklich beeinflusst. Im *Pre*-Test glauben 22,2 % der Schüler, dass makroskopische Teilchen und Elementarteilchen in der Falle von unterschiedlichen Kräften beeinflusst werden und sind sich,



(a) Pre-Test, Frage 2.2, (N=36),
* = richtige Antwort

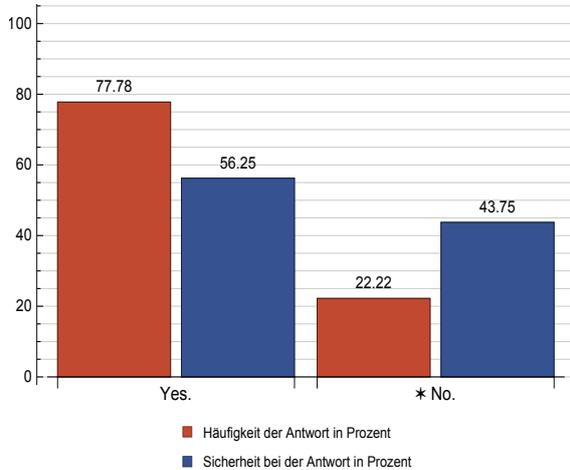
(b) Post-Test, Frage 2.2, (N=36),
* = richtige Antwort

Abb. 5.2.: Grafiken zu den Fragen zu Paulfallen in der Forschung, die weniger als 80 % der Schüler richtig beantworteten.

mit einer durchschnittlichen Sicherheit von 43,75 %, nicht sicher bei ihrer Aussage. Im *Post-Test* antworteten sogar nur 19,44 % der Schüler mit „*Nein*“. Diese sind sich ihrer Aussage im Mittel sicherer (67,85 %) als das Mittel der Sicherheit bei der richtigen Antwort im *Pre-Test* (43,75 %). Da im Voraus vermutet wurde, dass die Schüler mit dieser Frage Probleme haben könnten, wurde nach einer Begründung gefragt, um die Motivation der Schüler für ihre Antwort zu verstehen. Die Antworten wurden kategorisiert und sind in Abb. 5.4a und 5.4b abgebildet. Zudem ist den einzelnen Antwortkategorien beigefügt, wie viele der Schüler mit dieser Antwort die richtige Antwort auf die *Multiple-Choice-Frage* gegeben haben. Hierbei wird deutlich, dass die Schüler den Unterschied zwischen der Frage nach den physikalischen Prinzipien und der Frage nach den Kräften, die die Teilchen beeinflussen, nicht verstehen. Die Schüler beziehen sich darauf, dass die physikalischen Prinzipien immer die selben sind. Dass Gravitation zwar auf Elementarteilchen wirkt, diese aber nicht merklich beeinflusst, ist im Rahmen der

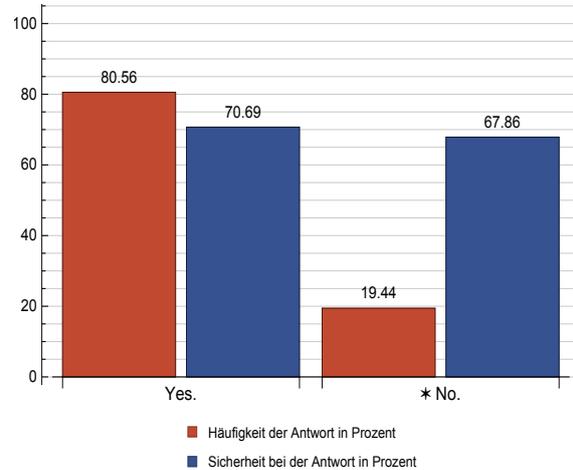
5. Auswertung der Fragebögen

Are elementary particles in a fundamental research trap influenced by the same forces as microscopic particles in the trap we will use?



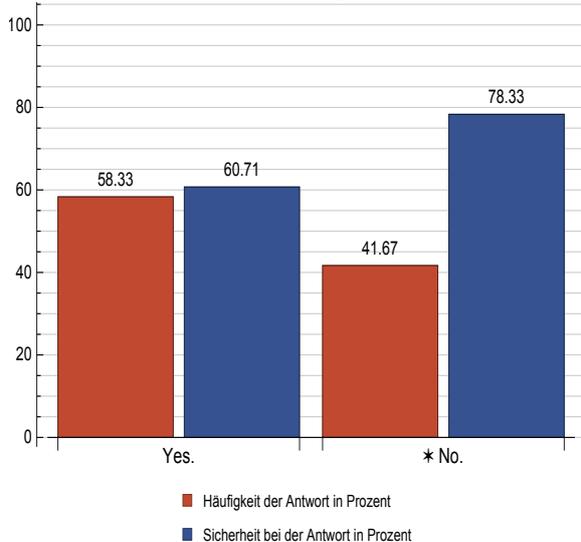
(a) Pre-Test Frage 3.2, (N=36),
* = richtige Antwort

Are elementary particles in a fundamental research trap influenced by the same forces as microscopic particles in our trap are?



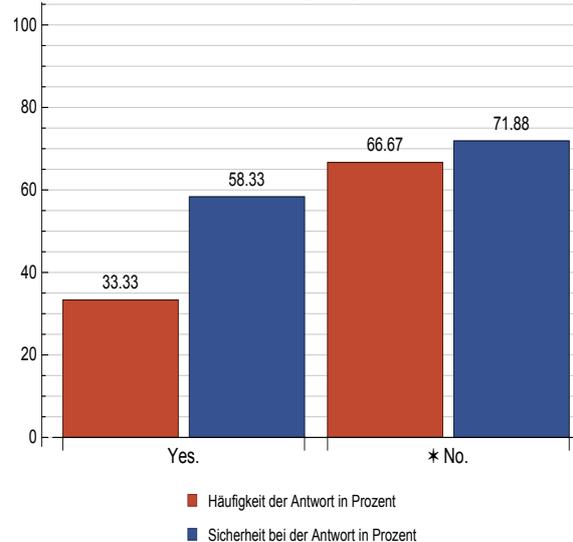
(b) Post-Test, Frage 3.2, (N=36),
* = richtige Antwort

Is it possible to trap elementary particles with our trap?



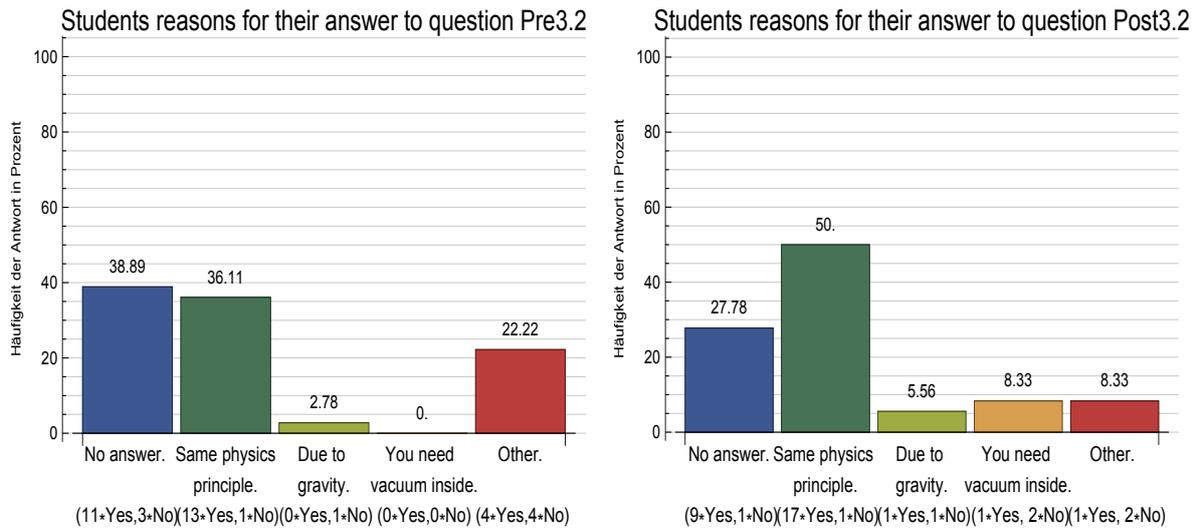
(c) Post-Test, Frage 3.3 (N=36),
* = richtige Antwort

Is it possible to trap antihydrogen ions with our trap?



(d) Post-Test, Frage 3.4, (N=36),
* = richtige Antwort

Abb. 5.3.: Grafiken zu den Fragen zu den Unterschieden zwischen Fällen für makroskopische Partikel und Elementarteilchen, die weniger als 80 % der Schüler richtig beantworteten.



(a) Pre-Test, Begründung zu Pre3.2, (N=36) (b) Post-Test, Begründung zu Post3.2, (N=36)

Abb. 5.4.: Begründungskategorien der Schüler im Pre- und Post-Test, warum auf makroskopische Teilchen in der Falle die gleichen/unterschiedliche Kräfte wirken.

Schülerbefragung evtl. eine zu spezifische Frage gewesen. Im eigentlichen Versuchsablauf ist die Idee den Einfluss der Gravitation zu thematisieren. Da dies aus Zeitgründen nicht angesprochen wurde, ist es nicht verwunderlich, dass die Schüler nicht darüber nachdenken. Es wäre denkbar, dass ein Großteil der Schüler die verschiedenen Themengebiete der Physik nicht verknüpft und wenn es grundlegend um Elektrizitätslehre geht, nicht über Gravitation nachdenkt.

Die letzten beiden Verständnisfragen im *Post-Test* zielen darauf ab, ob die Schüler verstanden haben, dass die im S'Cool LAB genutzte Falle Grenzen hat. Auf die Frage ob Elementarteilchen mit der S'Cool LAB Falle gefangen werden können, geben 41,67 % der Schüler die richtige Antwort: „*Nein*“. Dass Antiwasserstoffionen mit dieser Falle nicht gefangen werden kann ist 66,67 % der Schüler bewusst.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Schüler, wie im voraus erwartet, Schwierigkeiten beim Transfer zwischen der Falle für makroskopische Partikel und der für Elementarteilchen haben. Aufgrund dieser Erwartung wurde während der Versuchseinheit versucht, speziell darauf einzugehen. Die Transferprobleme waren trotzdem auffäl-

lig groß. Dies könnte darauf hinweisen, dass es, in der kurzen Zeit, die die Schüler im S’Cool LAB verbringen, nicht möglich ist, ein tieferes Verständnis für Teilchenphysik aufzubauen und Fehlvorstellungen zu vermindern.

5.2. Kognitive Belastung

J. Schilling gibt in [36] einen Überblick über die „*cognitive load theory*“ (CLT). Diese basiert auf dem Kognitivismus, der davon ausgeht, dass Lernen abhängig vom Vorwissen in dem zu lernenden Bereich und der Lernanleitung ist. Dabei wird der Komplexität des Stoffes und dem Zeitpunkt der Darbietung eine wichtige Rolle zugeschrieben. Die CLT beschäftigt sich damit, wie man bei der Unterrichtsanleitung durch optimale Informationsdarbietung das Lernen verbessern kann. Dabei ist die Belastung des Arbeitsgedächtnisses (Kurzzeitgedächtnis) die entscheidende Komponente im Lernprozess. Während davon ausgegangen wird, dass das Langzeitgedächtnis unbegrenzte Kapazität aufweist, Wissen und Fähigkeiten in Form von Schemata zu kategorisieren, ist die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses auf 3 - 5 wesentliche Informationsaspekte zu gleicher Zeit beschränkt. In [36] werden hierfür zwei verschiedene Erklärungsansätze angesprochen. Der eine geht davon aus, dass sich zu viele Informationen gegenseitig beeinflussen und miteinander interferieren, was zu Verwirrung führt. Der physiologische Erklärungsansatz begründet die beschränkte Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses mit einer begrenzten Anzahl an Neuronen, die zur Erkennung neuer Muster zur Verfügung stehen. Sind die im Langzeitgedächtnis gespeicherten Schemata automatisiert, so entsteht routiniertes Verhalten, das keinen Platz im Arbeitsgedächtnis benötigt. Auf Grundlage der CLT wurden im Fragebogen vier Aussagen über kognitive Belastung während des Experimentes formuliert. Diese Aussagen und deren Bewertung durch die Schüler ist in Abb. 5.5 dargestellt. Bezüglich der Aussagen sollten die Schüler Stellung nehmen. Hierfür konnten sie auf einer sechsstufigen Skala ihre Zustimmung zu den Aussage von „*completely disagree, disagree, disagree a little, agree a little, agree*“ bis „*completely agree*“ ausdrücken. Für die Auswertung wurde die Zustimmung in eine Zahl von Null bis fünf umgerechnet. Hierbei kommt der Aussage „*completely disagree*“ der Wert null zu und „*completely agree*“ der Wert fünf. Um die Ergebnisse leicht auf die sechs Aussagen zurück führen zu können, wird bewusst auf das Umrechnen in eine

Prozentskala verzichtet.

Abbildung. 5.5 zeigt, dass den vier Aussagen insgesamt nicht zugestimmt wird. Dies zeigt, dass die Schüler mit dem Experiment zurecht kamen und nach der CLT Theorie ein langfristiger Lernerfolg möglich ist.

Die ersten beiden Aussagen beziehen sich auf das Equipment des Experimentes. Mit diesem kamen die Schüler nach Aussage des Diagrammes ganz gut zurecht. Die Werte von $1,3 \pm 0,2$, bzw. $1,6 \pm 0,2$ entsprechen einer Zustimmung zwischen „*disagree*“ und „*disagree a little*“. Der Mittelwert zu der Aussage, ob die Schüler Probleme hatten, die Geräte bei ihren Beobachtungen zu nutzen, ist mit $1,7 \pm 0,2$ der höchste und entspricht aufgerundet einer Bewertung mit „*disagree a little*“. Dies könnte daher kommen, dass die Fallen einen sehr behutsamen Umgang voraussetzen. Die Empfindlichkeit gegenüber jeglichen Luftzuges ist eine Herausforderung im Umgang mit dem Experiment. Erfreulich ist, dass es scheinbar gelungen ist, die komplexe Physik hinter der Paulfalle so zu vereinfachen, dass die Schüler sie gut verstehen können. Der Aussage „*Ich hatte Probleme die physikalischen Prinzipien des Experimentes zu verstehen*“ stimmen die Schüler mit nur $1,1 \pm 0,1$ zu, was in etwa der Bewertung „*disagree*“ entspricht.

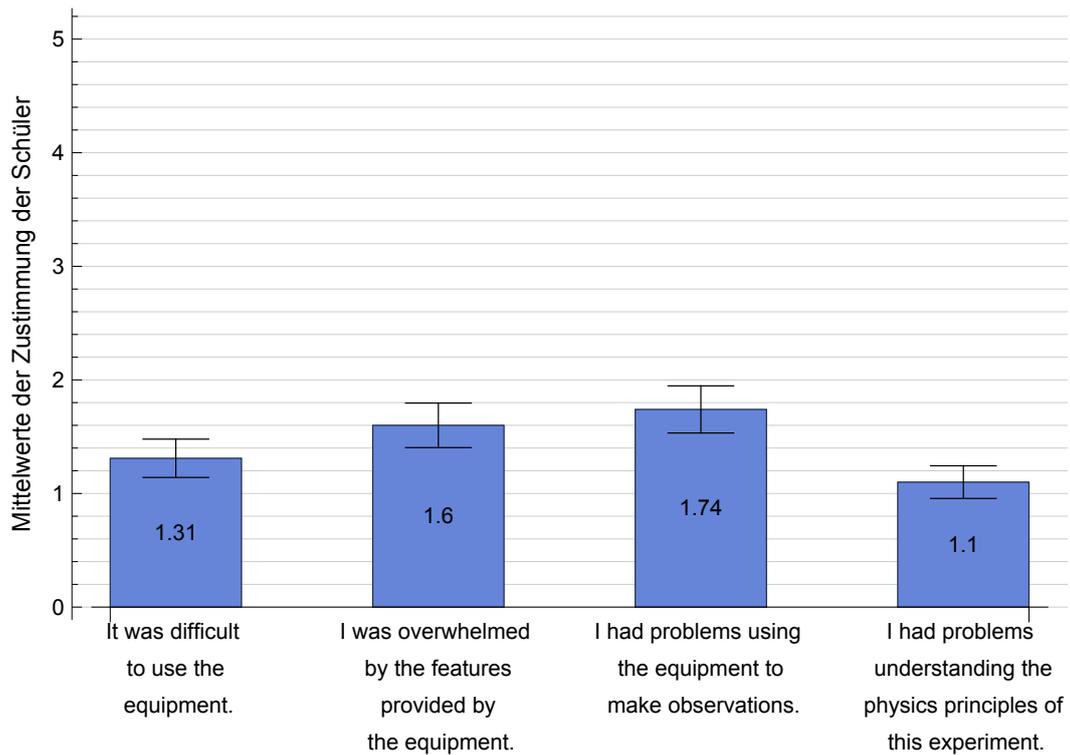


Abb. 5.5.: Mittelwerte der Antworten der Schüler (N=42) auf die Fragen zur kognitive Belastung mit empirischer Standardabweichung. Die Werte der Skala beziehen sich auf „*completely disagree*“ (0), „*disagree*“ (1), „*disagree a little*“ (2), „*agree a little*“ (3), „*agree*“ (4), „*completely agree*“ (5).

5.3. Interesse der Schüler an Physik und dem Paulfallen-Experiment

Im Rahmen der Befragung wurde weiterhin nach dem physikalischen Interesse der Schüler gefragt. Im *Pre-Test* wurde allgemein nach dem Interesse an Physik und Physikunterricht gefragt und im *Post-Test* nach dem Interesse der Schüler an dem zuvor im S’Cool LAB durchgeführten Paulfallen-Versuch. Dabei bewerteten 39 Schüler im *Pre-Test* sechs und im *Post-Test* fünf Aussagen auf Grundlage der in Abschnitt 5.2 beschriebenen sechsstufigen Skala¹. Die Fragen/Aussagen, die in diesem Block bewertet wurden, sind in 5.7a und 5.7b abgebildet. Insgesamt zeigen die Schüler, die ins S’Cool LAB kommen, Interesse an Physik. Dies ist nicht verwunderlich, da die Schüler (zumindest fast) alle Physik als Schwerpunkt in der Oberstufe gewählt haben. Vor dem Versuch liegt der Mittelwert über alle Schüler und alle Interessensfragen bei dem *Pre-Test* bei $3,4 \pm 0,1$ und bei dem *Post-Test* bei $3,7 \pm 0,1$, also jeweils zwischen „agree a little“ und „agree“.

Der Zuwachs des Interesses im *Post-Test*, soll auf seine Signifikanz geprüft werden. Um zu entscheiden mit welchem Test diese Überprüfung durchgeführt werden kann, werden die Mittelwerte der Einzelnen Schüler im *Pre-* bzw. im *Post-Test* auf Normalverteilung getestet. Abb. 5.6a und 5.6b zeigen, dass die Verteilung der Daten nur in sehr grober Näherung einer Normalverteilung entspricht. Auf dieser Grundlage wurde entschieden den Gesamtmittelwert des *Pre-Test* mit dem des *Post-Tests* in einem Wilcoxon Test zu vergleichen. Dieser liefert einen Signifikanzwert von $p = 0,016$ (Teststatistik: $W = 204,5$). Das Interesse hat sich also signifikant gesteigert. Dies ist zwar ein schönes Ergebnis, aber nicht zu hoch zu bewerten, da das allgemeine Interesse durch viele Faktoren beeinflusst sein kann. Um einen echten Erfolg des Experimentes auf das Interesse der Schüler an der Physik zu überprüfen, müsste zumindest noch ein *Follow-up-Test* gemacht werden.

In Abb. 5.7a werden die Mittelwerte über die Zustimmung zu den Fragen aus dem *Pre-Test* dargestellt und in Abb. 5.7b die Zustimmungen im *Post-Test*. Insgesamt stimmen die Schüler den Aussagen zu (s. auch Tabelle 5.2). Bei zwei der Items kann eine signi-

¹ „completely disagree“ (0), „disagree“ (1), „disagree a little“ (2), „agree a little“ (3), „agree“ (4), „completely agree“ (5).

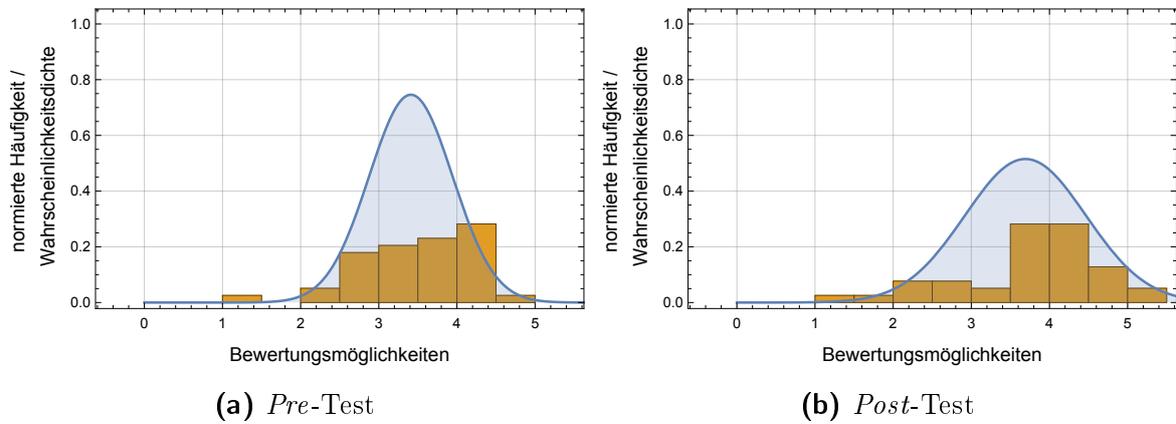


Abb. 5.6.: Histogramme der Mittelwerte der einzelnen Schüler über alle Interessensaussagen im *Pre-* bzw. *Post-*Test und Normalverteilung zum gesamten Mittelwert und der zugehörigen Varianz.

Frage	0	1	2	3	4	5
Mittelwert pre	2,92	3,82	3,74	3,00	3,56	3,41
Standardabweichung pre	0,18	0,13	0,12	0,19	0,18	0,20
Mittelwert post	-	4,03	3,46	3,56	4,18	3,23
Standardabweichung post	-	0,14	0,17	0,21	0,12	0,19
Signifikanz (p) des Wilcoxon-Test	-	0,228	0,163	0,008	0,004	0,472
W-Wert des Wilcoxon-Test	-	109,5	168,0	91,0	80,5	234,0

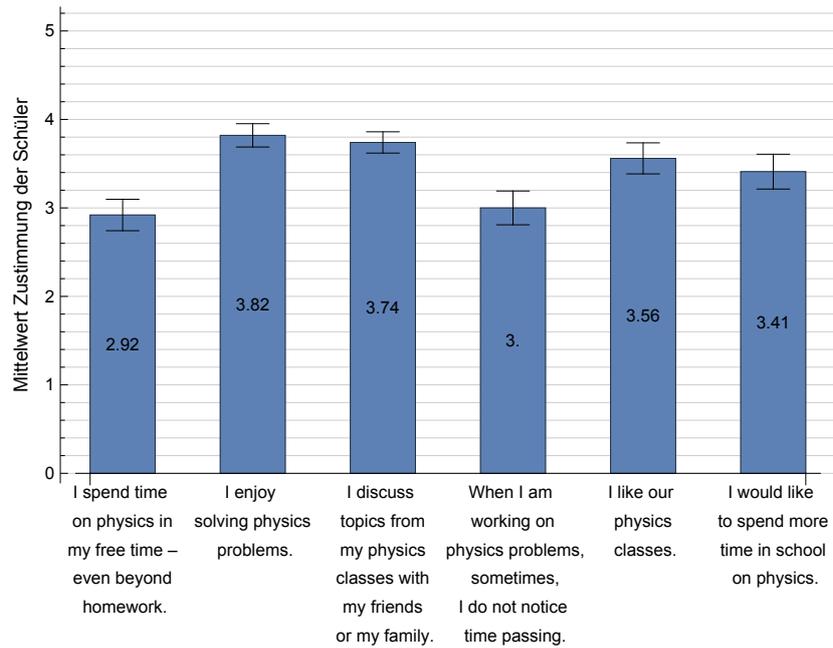
Tabelle 5.2.: Mittelwerte und Standardabweichungen der Antworten auf die Fragen (vgl. Abb. 5.7a und 5.7b) und die Signifikanz der Veränderung der Mittelwerte der einzelnen Fragen bei einem Wilcoxon-Test.

signifikante Steigerung des Mittelwertes mit dem Wilcoxon-Test gezeigt werden. Zum einen zwischen den Items „*When I am working on physics problems, sometimes I do not notice time passing.*“ und „*When I was working on the experiment, I did not notice time passing.*“ (s. Tabelle 5.2, Frage 3, Signifikanz des Wilcoxon-Tests: $p=0.008$). Dass die Schüler das Verstreichen der Zeit weniger stark wahrnehmen, spricht für eine Steigerung des *Flows*² während des Experimentes im S’Cool LAB im Vergleich zu anderen Situationen in denen die Schüler sich mit physikalischen Problemen auseinandersetzen. Da sich zumindest einige Schüler auch in ihrer Freizeit mit Physik beschäftigen (vgl. Tabelle 5.2, Frage 0, Mittelwert pre), bezieht sich dieser Vergleich nicht nur auf den Physikunterricht.

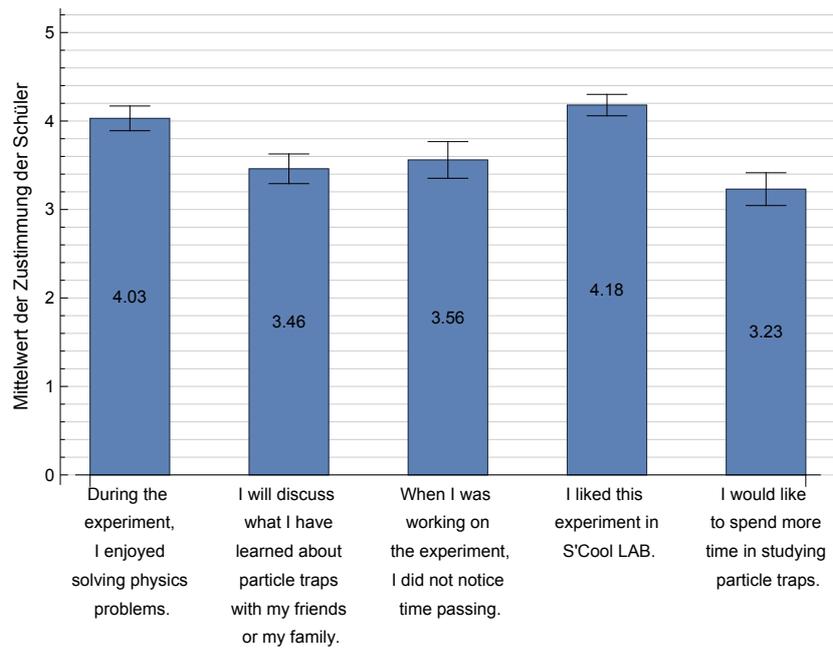
Beim Vergleich wie sehr die Schüler ihren Physikunterricht und das Paulfallen-Experiment im S’Cool LAB mögen, liefert der Wilcoxon-Test ebenfalls eine signifikante Steigerung der Mittelwerte (s. Tabelle 5.2, Frage 4 Signifikanz des Wilcoxon-Tests: $p=0,004$). Das Interesse hat sich also signifikant gesteigert. Dies ist besonders im Hinblick auf die kurze Interventionszeit und die kleine Stichprobengröße ein überraschend gutes Ergebnis. Allerdings darf dieses Ergebnis nicht zu hoch bewertet werden, der beobachtete Effekt ist wie zu erwarten nur sehr klein. Trotz allem bestätigt sich damit zumindest ein kurzfristiger Erfolg der Experimentiersequenz.

²„Flow-Erleben: bes. positives emotionales Erleben bei einer Tätigkeit, das dadurch charakterisiert ist, dass eine Person ganz auf ihr Tun konzentriert ist und darin aufgeht, sich selbst dabei vergisst, das Zeitgefühl weitgehend verloren ist („Die Zeit vergeht wie im Flug“). Dieses emotionale Erleben kann sich dann einstellen, wenn die wahrgenommenen Anforderungen der Tätigkeit den Fähigkeiten entsprechen. Der Anreiz bei einer solchen Handlung liegt nicht in erwarteten Handlungskonsequenzen (extrinsische Motivation), sondern in der Ausführung der Handlung selbst (intrinsische Motivation) [39].“

5. Auswertung der Fragebögen



(a) *Pre-Test*



(b) *Post-Test*

Abb. 5.7.: Mittelwerte der Antworten der Schüler (N=39) auf die Fragen zum Interesse mit empirischer Standardabweichung.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde ein kostengünstiges Selbstbaumodell einer makroskopischen, dreidimensionalen Paulfalle entwickelt und optimiert, welches mit einem 3D-Drucker gedruckt werden kann. Mit dem 3D-Modell und einigen elektronischen Bauteilen, kann die Falle einfach nachgebaut werden. Im S’Cool LAB am CERN wurde die Paulfalle, in einer dafür entworfenen Experimentiereinheit, erfolgreich mit Schülergruppen getestet. Die Auswertung der Fragebögen, die von den Schülern ausgefüllt wurden, zeigt, dass die entwickelte Experimentiereinheit die grundlegende Funktionsweise der Paulfalle gut vermitteln kann. Trotz der Komplexität der Physik auf der die Paulfalle basiert und des Versuchsaufbaus, konnten die wichtigen Konzepte so vereinfacht werden, dass die Schüler sich nicht überfordert fühlten. Dies ging durch die Auswertung der Fragen zur kognitiven Belastung hervor. Um den Schülern ein grundlegendes Verständnis für Elementarteilchen und Antimaterie zu vermitteln, ist die Experimentiereinheit von 75 Minuten jedoch wie erwartet zu kurz. Dies geht aus den Transferfragen zum Vergleich von makroskopischen Fallen und Fallen für Elementarteilchen und Antiteilchen hervor. Der kurze Besuch im S’Cool LAB reicht nicht alleine aus, dass die Schüler die Grundlagen der Teilchenphysik begreifen. Jedoch zeigt sich ein großes Interesse der Schüler an dem Paulfallen-Experiment. Die Auswertung ergibt, dass das Interesse der Schüler am Paulfallen-Experiment signifikant höher ist als das allgemeine Interesse an Physik. Durch das Interesse der Schüler an dem Experiment kann dieses eine Grundlage für eine weitere Auseinandersetzung mit der Teilchenphysik darstellen.

Diese Arbeit ist ein hervorragendes Beispiel für den Einsatz von 3D-Druckern zur Entwicklung von kostengünstigen Experimenten für die Schule. Es ist denkbar mit den Erfahrungen aus der Entwicklung der dreidimensionalen Falle auch noch ein 3D-Modell einer linearen Falle zu entwickeln. Damit könnten in der Experimentiereinheit zu Paulfallen im S’Cool LAB in unterschiedlichen Gruppen die verschiedenen Modelle ange-

wendet und danach Gemeinsamkeiten und Unterschiede verglichen werden. Die Arbeit zeigt das Potential der Entwicklung von 3D-druckbaren Schülerversuchen auf. Dies bietet die Möglichkeit kostengünstig Schülerexperimente im Unterricht zu fördern. Wenn damit eine Steigerung des Interesses der Schüler, wie beim Paulfallen-Experiment im S’Cool LAB, erreicht würde, könnte sich dies positiv auf das allgemeine Physikinteresse von Schülern auswirken.

A. Anhang

A.1. Datenblätter und sonstige Onlinequellen

A.1.1. Geräte

Specifications

Printer and printing properties

Technology	Fused Deposition Modeling (FDM)
Print head	Swappable nozzle
Build volume	223 x 223 x 205 mm
Filament diameter	2.85 mm
Layer resolution	0.25 mm nozzle: 150 to 60 micron 0.40 mm nozzle: 200 to 20 micron 0.60 mm nozzle: 400 to 20 micron 0.80 mm nozzle: 600 to 20 micron
XYZ accuracy	12.5, 12.5, 5 micron
Print head travel speed	30 to 300 mm/s
Build speed	0.25 mm nozzle: up to 8 mm ³ /s 0.40 mm nozzle: up to 16 mm ³ /s 0.60 mm nozzle: up to 23 mm ³ /s 0.80 mm nozzle: up to 24 mm ³ /s
Build plate	Heated glass build plate
Build plate temperature	50 to 100 °C
Build plate leveling	Assisted leveling process
Supported materials	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Nylon, TPU 95A
Nozzle diameter	Included are 0.25, 0.4, 0.6 and 0.8 mm nozzles
Nozzle temperature	180 to 260 °C
Nozzle heat up time	~ 1 minute
Build plate heat up time	< 4 minutes
Operating sound	50 dBA
Connectivity	Standalone 3D printing from SD card (included)

Physical dimensions

Dimensions	342 x 357 x 388 mm
Dimensions (with bowden tube and spool holder)	342 x 493 x 588 mm
Nett weight	11,3 kg
Shipping weight	18,5 kg
Shipping box dimensions	390 x 400 x 565 mm

Power requirements

Input	100 - 240V 4A, 50-60Hz 221 W max.
Output	24V DC, 9.2 A

Ambient conditions

Operating ambient temperature	15 - 32 °C See material specifications for optimal conditions
Nonoperating temperature	0 - 32 °C

Software

Supplied software	Cura, our free print preparation software
Supported OS	macOS, Windows and Linux
File types	STL, OBJ and AMF

Abb. A.1.: Daten zum 3D Drucker Ultimaker2+ von Ultimaker [40].

Abb. A.2.: Datenblatt zum Laser von Conrad [7].

B **BEDIENUNGSANLEITUNG**
www.conrad.com

Laserpointer Grüner Laser

Best.-Nr. 77 63 01

Version 05/11



Dieses Produkt erfüllt die gesetzlichen nationalen und europäischen Anforderungen.

Bestimmungsgemäße Verwendung

Der Laserpointer dient zur Hervorhebung von Details an Gegenständen, Schautafeln u.ä. Ein Deuten auf Personen und Tiere ist nicht erlaubt.

Das Gerät ist ausschließlich für den Batteriebetrieb zugelassen. Eine andere Energieversorgung darf nicht verwendet werden. Der passende Batterietyp ist unter „Technische Daten“ aufgeführt.

Eine andere Verwendung als zuvor beschrieben ist nicht zulässig. Darüber hinaus ist dies mit Gefahren wie z.B. Verletzung der Augen verbunden.

 Die Sicherheitshinweise sind unbedingt zu befolgen.

Sicherheitshinweise

 Bei Schäden, die durch Nichtbeachten dieser Bedienungsanleitung verursacht werden, erlischt die Garantie/Gewährleistung. Für Folgeschäden übernehmen wir keine Haftung.

Bei Sach- oder Personenschäden, die durch unsachgemäße Handhabung oder Nichtbeachten der Sicherheitshinweise verursacht werden, übernehmen wir keine Haftung. In solchen Fällen erlischt die Garantie/Gewährleistung.

Das Symbol mit dem Ausrufezeichen weist auf wichtige Hinweise in der Bedienungsanleitung hin. Lesen Sie bitte vor Inbetriebnahme die komplette Anleitung durch, sie enthält wichtige Hinweise zum korrekten Betrieb.

- Aus Sicherheitsgründen ist das eigenmächtige Umbauen und/oder Verändern des Produktes nicht gestattet.
- Setzen Sie den Laserpointer keinen hohen Temperaturen, hoher Feuchtigkeit oder starken Vibrationen aus.
- Das Gerät und die Batterien sind kein Spielzeug. Kinder und Jugendliche können die Gefahren, die im Umgang mit elektrischen Geräten und Lasern bestehen, nicht einschätzen.
- Beim Betrieb der Lasereinrichtung ist unbedingt darauf zu achten, dass der Laserstrahl so geführt wird, dass keine Person sich im Projektionsbereich befindet und dass ungewollt reflektierte Strahlen (z.B. durch reflektierende Gegenstände) nicht in den Aufenthaltsbereich von Personen gelangen können.
- Laserstrahlung kann gefährlich sein, wenn der Laserstrahl oder eine Reflexion in das ungeschützte Auge gelangt. Informieren Sie sich deshalb bevor Sie die Lasereinrichtung in Betrieb nehmen über die gesetzlichen Bestimmungen und Vorsichtsmaßnahmen für den Betrieb eines derartigen Lasergerätes.
- Blicken Sie nie in den Laserstrahl und richten Sie ihn niemals auf Personen oder Tiere. Laserstrahlung kann zu Augenverletzungen führen.
- Richten Sie den Laserstrahl niemals auf Spiegel oder andere reflektierende Flächen. Der unkontrolliert abgelenkte Strahl könnte Personen oder Tiere treffen.
- Öffnen Sie das Gerät niemals. Einstell- oder Wartungsarbeiten dürfen nur vom ausgebildeten Fachmann, der mit den jeweiligen Gefahren vertraut ist, durchgeführt werden. Unsachgemäß ausgeführte Einstellarbeiten können eine gefährliche Laserstrahlung zur Folge haben.
- Das Produkt ist mit einem Laser der Laserklasse 2 ausgerüstet. Im Lieferumfang befinden sich Laserhinweisschilder in verschiedenen Sprachen. Sollte das Hinweisschild auf dem Laser nicht in Ihrer Landessprache verfasst sein, befestigen Sie bitte das entsprechende Schild auf dem Laser.



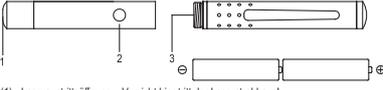
ACHTUNG

LASERSTRAHLUNG
NICHT BLENZEN
STRAHL BLENZEN
LICHTSTREIFEN
BLINDE

Wellenlänge: 532 nm
Max. Ausgangsleistung: 1 mW
LASERKlasse 2
EN 60825-1:2007

- Vorsicht - wenn andere als die hier in der Anleitung angegebenen Bedienungseinrichtungen benutzt oder andere Verfahrensweisen ausgeführt werden, kann dies zu gefährlicher Strahlungsexposition führen.
- Sollten sich Fragen ergeben, die nicht im Laufe der Bedienungsanleitung abgeklärt werden, so setzen Sie sich bitte mit unserer technischen Auskunft oder einem anderen Fachmann in Verbindung.
- Beachten Sie auch die weiteren Sicherheitshinweise in den einzelnen Kapiteln dieser Anleitung.

Einzelteile und Bedienelemente



(1) Laseraustrittsöffnung – Vorsicht hier tritt der Laserstrahl aus!
 (2) Lasertaste
 (3) Batteriefach

Einlegen/Wechsel der Batterien

 Achten Sie beim Einlegen der Batterien auf die richtige Polung.

Lassen Sie Batterien nicht offen herumliegen, es besteht die Gefahr, dass diese von Kindern oder Haustieren verschluckt werden. Suchen Sie im Falle eines Verschluckens sofort einen Arzt auf.

Ausgelaufene oder beschädigte Batterien können bei Berührung mit der Haut Verätzungen verursachen, benutzen Sie deshalb in diesem Fall geeignete Schutzhandschuhe.

Achten Sie darauf, dass die Batterien nicht kurzgeschlossen oder ins Feuer geworfen werden. Sie dürfen außerdem nicht aufgeladen werden. Es besteht Explosionsgefahr.

Mischen Sie niemals Batterien unterschiedlichen Ladezustands oder unterschiedlicher Hersteller.

- Schrauben Sie zum Öffnen des Batteriefachs (3) den Schaft des Laserpointers auseinander.
- Legen Sie zwei neue 1,5V-Microbatterien (AAA) polungsrichtig in das Batteriefach (3) ein. Der Minuspol der Batterien muss zur Laseraustrittsöffnung (1) weisen (siehe auch Bild oben).
- Schrauben Sie den Schaft des Laserpointers wieder zusammen.
- Wenn die Projektion dunkler wird sind die Batterien entladen. Erneuern Sie in diesem Fall die Batterien wie oben beschrieben.

Bedienung

 Richten Sie den Laserstrahl nie direkt auf Personen oder Tiere.

- Mit der Lasertaste (2) wird der Laserpointer ein- und ausgeschaltet.
- Bei gedrückter Lasertaste (2) tritt der Laserstrahl aus der Laseraustrittsöffnung (1) aus.

Entsorgung

 Entsorgen Sie das Produkt am Ende seiner Lebensdauer gemäß den geltenden gesetzlichen Bestimmungen.

Entsorgung von gebrauchten Batterien/Akkus

 Sie als Endverbraucher sind gesetzlich (Batterieverordnung) zur Rückgabe aller gebrauchten Batterien und Akkus verpflichtet; eine Entsorgung über den Hausmüll ist untersagt.

 Schadstoffhaltige Batterien/Akkus sind mit nebenstehenden Symbolen gekennzeichnet, die auf das Verbot der Entsorgung über den Hausmüll hinweisen. Die Bezeichnungen für das ausschlaggebende Schwermetall sind: Cd = Cadmium, Hg = Quecksilber, Pb = Blei. Ihre verbrauchten Batterien/Akkus können Sie unentgeltlich bei den Sammelstellen Ihrer Gemeinde unseren Filialen oder überall dort abgeben, wo Batterien/Akkus verkauft werden.

Sie erfüllen damit die gesetzlichen Verpflichtungen und leisten Ihren Beitrag zum Umweltschutz.

Technische Daten

Betriebsspannung.....3 V/DC
 Batterien.....2 x 1,5 V-Microbatterie (AAA)
 Wellenlänge.....532 nm
 Laserleistung.....max. 1 mW
 Abmessungen.....11,2 x 152 mm
 Masse.....36,5 g
 Betriebsbedingungen.....+15 bis +35 °C
 40 bis 70% rel. Luftfeuchte

CONRAD Diese Bedienungsanleitung ist eine Publikation der Conrad Electronic SE, Klaus-Conrad-Str. 1, D-92240 Hirschau (www.conrad.com).

Alle Rechte einschließlich Übersetzung vorbehalten. Reproduktionen jeder Art, z. B. Fotokopie, Mikroverfilmung, oder die Erfassung in elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Herausgebers. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten.

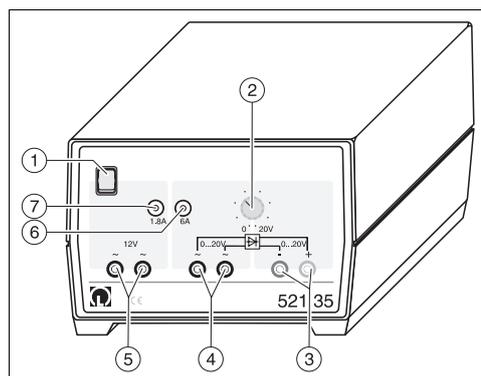
Diese Bedienungsanleitung entspricht dem technischen Stand bei Drucklegung. Änderung in Technik und Ausstattung vorbehalten.

© Copyright 2011 by Conrad Electronic SE.

Abb. A.3.: Datenblatt zur Spannungsquelle von LD Didactic [14].



12/97-Sf-



Gebrauchsanweisung 521 35
Instruction Sheet

Kleinspannungsstelltrafo S (521 35)
Kleinspannungsstelltrafo 115 V (521 351)
Variable Extra-low Voltage
Transformer S (521 35)
Variable Extra-low Voltage
Transformer 115 V (521 351)

Fig. 1

Das Gerät liefert neben kontinuierlich einstellbarer Wechsel- und Gleichspannung (max. 20 V~, belastbar bis 6 A) eine Festspannung von 12 V~ (1,8 A).

This device supplies continuously adjustable AC and DC voltages (max. 20 V AC, maximum load 6 A) as well as a fixed voltage of 12 V AC (1.8 A).

1 Sicherheitshinweise

1 Safety note

- Nach Ansprechen eines der Überstromschutzschalter ⑥ oder ⑦ – angezeigt durch Herausspringen des Sicherungsknopfes – Gerät am Netzschalter ① abschalten; Schaltungsfehler bzw. Ursache der Überlastung beseitigen; danach Sicherungsknopf drücken und Gerät wieder einschalten.
- Zum Schutz der angeschlossenen Geräte den Gleichspannungsausgang ③ nicht zusammen mit den Wechselspannungsausgang ④ in der gleichen Schaltung verwenden (galvanische Verbindung über Brückengleichrichter).
- Falls der auf dem Leistungsschild (Gehäuse-Rückseite) aufgedruckte Wert für die Netzanschlußspannung von dem ortsüblichen Wert abweicht, Gerät zum Umrüsten in transportgerechter Umverpackung an Leybold Didactic schicken.

- In the event that one of the overcurrent circuit breakers ⑥ or ⑦ trips - indicated by the breaker button popping out - switch off the device with the mains switch ①. Eliminate the circuit error or source of the fault, then press the breaker button and switch the device back on.
- To protect connected equipment, do not use the DC output ③ in the same circuit together with the AC output ④ (electrical connection via the rectifiers).
- If the mains voltage value given on the rating plate (rear of device) is different from your local mains voltage, pack the device in appropriate transport packaging and return it to Leybold Didactic for conversion.

2 Beschreibung, technische Daten

2 Description, technical data

- ① Netzschalter mit Betriebsanzeigelampe
- ② Stellknopf für einstellbare Gleich- und Wechselspannungen (Ausgänge ③ und ④)
- ③ Ausgang für kontinuierlich einstellbare (nicht geglättete) Gleichspannung, 0 bis 20 V, belastbar bis 6 A
Restwelligkeit: 48%
- ④ Ausgang für kontinuierlich einstellbare Wechselspannung, 0 bis 20 V, belastbar bis 6 A
- ⑤ Ausgang für feste Wechselspannung 12 V, belastbar bis 1,8 A
- ⑥ Überstromschutzschalter 6 A, thermisch-magnetisch abschaltend, für Ausgänge ③ und ④
- ⑦ Überstromschutzschalter 1,8 A, thermisch abschaltend, für Ausgang ⑤

- ① Mains switch with on-indicator lamp
- ② Knob for setting the adjustable DC and AC voltages (outputs ③ and ④)
- ③ Output for continuously adjustable (unsmoothed) DC voltage, 0 to 20 V, maximum load 6 A
Residual ripple: 48 %
- ④ Output for continuously adjustable AC voltage, 0 to 20 V, maximum load 6 A
- ⑤ Output for fixed AC voltage 12 V, maximum load 1.8 A
- ⑥ Overcurrent circuit breaker 6 A, thermomagnetic cutout, for outputs ③ and ④
- ⑦ Overcurrent circuit breaker 1.8 A, thermal cutout, for output ⑤

Galvanische Verbindung zwischen den Ausgängen:

- Ausgänge ③ und ④ über Brückengleichrichter verbunden.

Farbkennung der Sicherheitsbuchsen:

- Wechselspannungsausgänge: schwarz
- Gleichspannungsausgang: blau (Minus-Pol); rot (Plus-Pol)

Auf der Gehäuse-Rückseite Steckerwanne mit integriertem Sicherungshalter für Primär- und Reservesicherung.

Netzanschlußkabel im Lieferumfang enthalten.

Im Gehäuse-Boden 2 ausklappbare FüÙe zum Neigen des Gerätes.

Weitere technische Daten:

Sicherungen:

- Primärseite: Schmelzsicherung: T 1,25 (521 35)
T 4,0 (521 351)
- Sekundärseite: für variable Ausgänge Überstromschutzschalter, bei 6 A thermisch-magnetisch abschaltend; für Festspannungsausgang Überstromschutzschalter, bei 1,8 A thermisch abschaltend (in einer Umgebungstemperatur von 20 °C)

Netzanschlußspannung: (siehe Leistungsschild auf der Geräte-Rückseite)
Kat.-Nr. 521 35: 230 V; 50/60 Hz
Kat.-Nr. 521 351: 115 V; 50/60 Hz

Leistungsaufnahme: 190 VA (521 35)

Abmessungen: 20 cm x 14 cm x 23 cm
Masse: 6,3 kg

3 Austausch der Primärsicherung

Wert siehe Sicherungsschild auf der Gehäuserückseite.

Einsatz ① mit Fassung für Primärschmelzsicherung ② und Reservesicherung ③ heraushebeln (Fig. 2.1).

Defekte Sicherung ② entfernen und durch die auf richtigen Sicherungswert überprüfte Reservesicherung ③ ersetzen (Fig. 2.2).

Neue Sicherung (Wert siehe Sicherungsschild auf der Gehäuse-Rückseite) als Reservesicherung ③ einsetzen und Einsatz ① wieder einschieben.

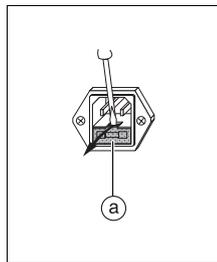


Fig. 2.1

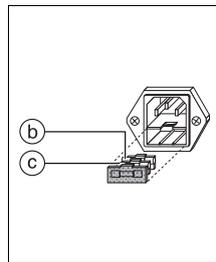


Fig. 2.2

Electrical connection between outputs:

- Outputs ③ and ④ connected via bridge rectifier.

Color-coding of safety sockets:

- AC voltage outputs: black
- DC voltage output: blue (minus-pole); red (plus-pole)

An appliance-plug connector with integrated holder for primary and reserve fuse is located on the rear of the device.

Mains cable included in scope of supply.

Two folding feet in bottom of housing for inclining the unit

Additional technical data:

Protection:

- Primary side: Fuse: T 1,25 (521 35)
T 4,0 (521 351)
- Secondary side: overcurrent circuit breaker for variable outputs, thermomagnetic cutout at 6 A
Overcurrent circuit breaker for fixed-voltage output, thermal cutout at 1.8 A (at an ambient temperature of 20 °C)

Mains voltage: (see mains connection rating plate on rear of device)
Cat. No. 521 35: 230 V; 50/60 Hz
Cat. No. 521 351: 115 V; 50/60 Hz

Power consumption: 190 VA (521 35)

Dimensions: 20 cm x 14 cm x 23 cm
Weight: 6.3 kg

3 Replacing the primary fuse

Refer to fuse protection rating plate on rear of device.

Pry out insert ① with holder for primary fuse ② and spare fuse ③ (Fig. 2.1).

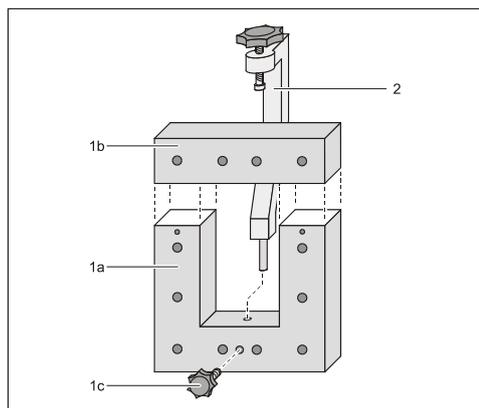
Remove the defective fuse ② and replace it with the spare fuse ③ which has been checked for the correct rating (Fig. 2.2).

Insert a new fuse (see fuse protection rating plate on rear of device for correct rating) as the reserve fuse ③ and slide insert ① back into the device.

Abb. A.4.: Datenblatt zum Eisenkern von LD Didactic [16].



06/05-W97-Set



Gebrauchsanweisung 562 11

U-Kern mit Joch (562 11)
Spannvorrichtung mit Klemmfeder(562 121)

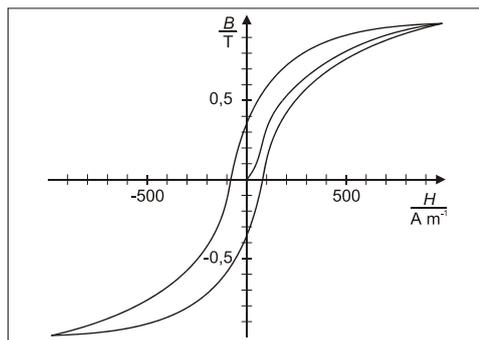
1 U-Kern (1a) mit Joch (1b), Befestigungsschraube (1c)
2 Spannvorrichtung

1 Beschreibung

Der U-Kern mit Joch (562 11) und die Spannvorrichtung (562 12) sind zum Aufbau des zerlegbaren Transformators vorgesehen mit den in Abschnitt 3 angegebenen Spulen vorgesehen.

2 Technische Daten

Querschnitt: 4 cm × 4 cm
U-Kern-Breite bzw. Jochlänge: 15 cm
U-Kern-Höhe: 13 cm
Material: Eisen, geblättert
max. relative Permeabilität μ_r auf der Neukurve: ca. 2200 bei ca. $H = 120 \text{ A m}^{-1}$



Hysteresekurve des U-Kerns mit Joch

3 Geeignete Spulen

Niederspannungsspule $N = 250$	562 13
Niederspannungsspule $N = 480, I = 10 \text{ A}$	562 131
Niederspannungsspule $N = 500$	562 14
Niederspannungsspule $N = 1000$	562 15
Hochspannungsspule $N = 10000$	562 16
Hochspannungsspule $N = 23000$	562 17
Kleinspannungsspule $N = 50$	562 18
Netzspule 230 V	562 21
Netzspule 115 V	562 22

4 Bedienung

- Primär- und Sekundärspule montieren
- Unlackierte Seite des Jochs auf den U-Kern legen.
- Joch mit Hilfe der Spannvorrichtung festklemmen.

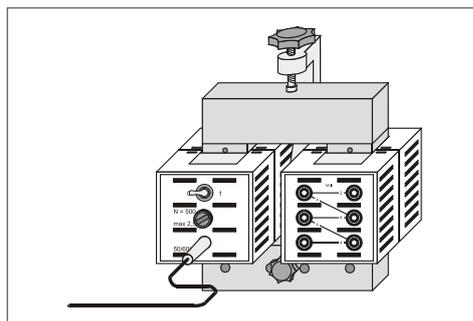
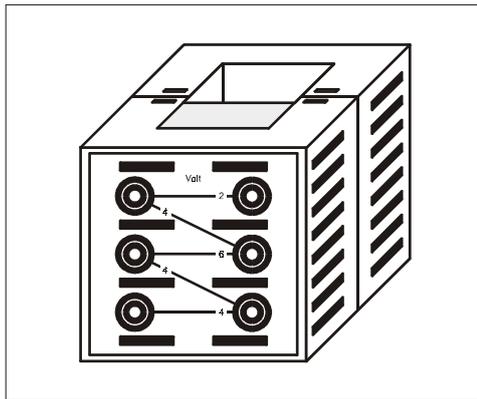


Abb. A.5.: Datenblatt zur Kleinspannungsspule von Leybold [13].

Physik	Chemie · Biologie	Technik	
			Lehr- und Didaktiksysteme LD Didactic GmbH Leyboldstraße 1 · 50354 Hürth

04/01-W97/-Sel



Gebrauchsanweisung 562 18

Kleinspannungsspule, 50 Windungen (562 18)

1 Beschreibung

Die Kleinspannungsspule 50 Windungen ist zur Verwendung mit dem zerlegbaren Transformator vorgesehen. Als Sekundärspule ermöglicht sie zusammen mit der Netzspule 230 V (562 21) bzw. 115 V (562 22) als Primärspule den Aufbau eines Transformators mit einer stufenweise variablen Ausgangsspannung bis ca. 20 V.

2 Technische Daten

Belastbarkeit:	15 A / 20 A (30 min)
Windungszahl:	50
Drahtstärke:	2 mm Ø
Widerstand:	0,08 Ω (bei Raumtemperatur)
Induktivität:	0,1 mH (ohne Eisenkern)
Abmessungen:	8 cm × 8,5 cm × 11 cm

Sicherheitshinweis

Die Kleinspannungsspule wird je nach Betriebsbedingung sehr warm.

- Maximal zulässigen Strom nicht überschreiten.
- Lüftungsschlitze im Gehäuse der Kleinspannungsspule nicht abdecken.

3 Zubehör

1 U-Kern mit Joch	562 11
1 Spannvorrichtung	562 12
1 Netzspule 230 V oder	562 21
1 Netzspule 115 V	562 22

4 Bedienung

Wechselspannungsquelle mit den Ausgangsspannungen ca. 2 V, 4 V, 6 V, ... , 20 V

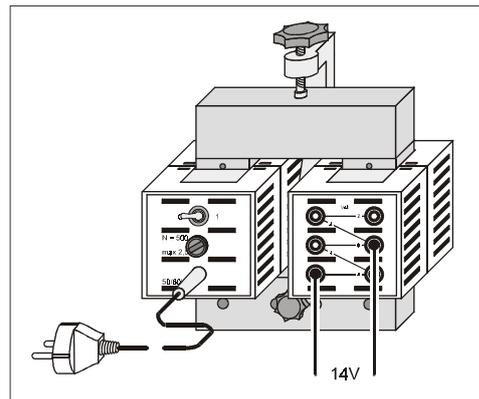
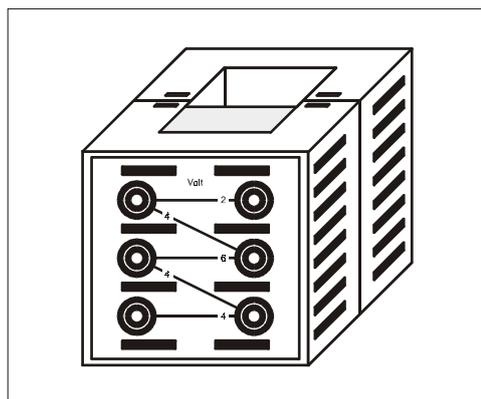


Abb. A.6.: Datenblatt zur Spule mit 10000 Windungen von Leybold [15].



04/01-W97/-Sel



Gebrauchsanweisung 562 18

Kleinspannungsspule, 50 Windungen (562 18)

1 Beschreibung

Die Kleinspannungsspule 50 Windungen ist zur Verwendung mit dem zerlegbaren Transformator vorgesehen. Als Sekundärspule ermöglicht sie zusammen mit der Netzspule 230 V (562 21) bzw. 115 V (562 22) als Primärspule den Aufbau eines Transformators mit einer stufenweise variablen Ausgangsspannung bis ca. 20 V.

2 Technische Daten

Belastbarkeit:	15 A / 20 A (30 min)
Windungszahl:	50
Drahtstärke:	2 mm \varnothing
Widerstand:	0,08 Ω (bei Raumtemperatur)
Induktivität:	0,1 mH (ohne Eisenkern)
Abmessungen:	8 cm \times 8,5 cm \times 11 cm

Sicherheitshinweis

Die Kleinspannungsspule wird je nach Betriebsbedingung sehr warm.

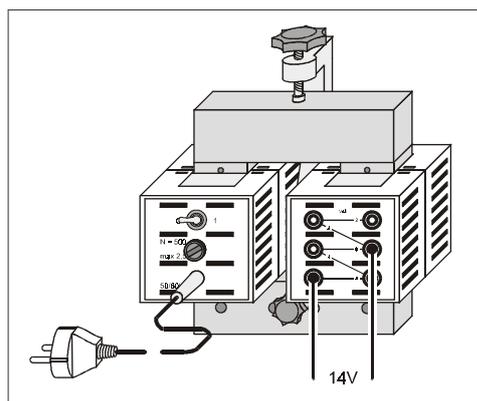
- Maximal zulässigen Strom nicht überschreiten.
- Lüftungsschlitze im Gehäuse der Kleinspannungsspule nicht abdecken.

3 Zubehör

1 U-Kern mit Joch	562 11
1 Spannvorrichtung	562 12
1 Netzspule 230 V oder	562 21
1 Netzspule 115 V	562 22

4 Bedienung

Wechselspannungsquelle mit den Ausgangsspannungen ca. 2 V, 4 V, 6 V, ... , 20 V





Owl
THE INNOVATIVE VISIONARY

[Home](#)
[Car Security](#)
[Microscopy](#)
[Home & Health](#)
[Mobile Accessories](#)
[Power Supplies](#)
[Sports](#)
[iOS & Android](#)



MIRAZOOM MZ-902 9MP (10X-40X, 200X) DIGITAL MICROSCOPE WITH FILTER AND MEASUREMENT FUNCTION





REQUEST A QUOTE

Get a personal quote



BROCHURE DOWNLOAD

Get the brochure of this product



EVENTS

Check the Oowltech news

DESCRIPTION	SPECIFICATIONS	PACKAGE CONTENT	VIDEO
<p>This easy-to-use MIRAZOOM MZ-902 9.0-Megapixel Wired Digital Microscope lets you see high-resolution, enlarged images and videos on your computer, providing 10x-40x and 200x optical magnification. A light control setting adjusts 8 white LED lights allowing quality image capture and videos in AVI format. In addition, the object viewed can be measured using the software included and the measurements stored as part of the picture, meaning it's possible to send images including details of dimensions to colleagues, friends and business partners. A rubberised grip offers steady handheld operation, and a user friendly image processing software are included in the package. The digital microscope connects to your computer with a fast USB 2.0 connection and is powered through its USB connection – no batteries are required.</p> <p>Other uses for the Microscope include:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Classroom teaching aid • Scientific and laboratory research tool including dissection and examination of specimen • Medical analysis such as dermatological examinations • Reading Aid • Industrial Inspection • Computer Parts Inspection • Textile Inspection • Jewelry Inspection • Collections/Coin Inspection • Printing Inspection 			

SHARE THIS PRODUCT





LATEST NEWS



Dragon Boat Races in Foshan, China from 1st of Nov to 2nd of Nov 2014
October 31, 2014 - 3:35 am

BLOG CATEGORIES

All Posts (4)
Events (4)

RECENT COMMENTS

LATEST ADDED PRODUCT

December 8, 2014 - 3:56 am



GOWL TECH 4500mAh PB16-MFI certified Power Bank For iPhone, iPad, Samsung And Smartphone
December 2, 2014 - 11:15 am



GOWL TECH 4500mAh PB13-3-In-1 Power Bank
December 2, 2014 - 10:22 am

OowlTECH

Who We Are

ACTIVITIES

What We Do

NEWS & EVENTS

The Blog

A QUESTION ?

Contact Us

SHARE THIS PAGE





© Copyright - Oowltech 2014-2015 - All rights reserved.

itemap | F.A.Q

Abb. A.7.: Daten zum USB Mikroskop zur Beobachtung der Bärlappsporen in der Falle von [21].

A.1.2. Material zum Fallenbau

Abb. A.8.: Datenblatt zur Conductive Paint von RS [31].



PRODUCT DESCRIPTION

Electric Paint is a nontoxic, water based, water soluble, electrically conductive paint. It can be used in circuits as a painted resistor element, a capacitive electrode or can function as a conductor in designs that can tolerate high resistivity. It is intended for applications with circuits using low DC voltages at low currents. **Electric Paint** adheres to a wide variety of substrates and can be applied using screen printing equipment. Its major benefits include low cost, solubility in water and good screen life. It is black in colour and can be over-painted with any material compatible with a water-based paint.



ADVANTAGES / PRODUCT BENEFITS

- High resistivity
- Nontoxic
- Water-soluble
- Can be used to create capacitive touch and proximity sensors
- Can be used as a potentiometer or resistive circuit element
- Compatible with many standard printing processes
- Low cost

TYPICAL PROPERTIES

Colour /	Black
Viscosity /	Highly viscous and shear sensitive (thixotropic)
Density /	1.16 g/ml
Surface Resistivity /	55 Ω/Sq/50 microns
Vehicle /	Water-based
Drying Temperature /	Electric Paint should be allowed to dry at room temperature for 5 – 15 minutes. Drying time can be reduced by placing Electric Paint under a warm lamp or other low intensity heat source.

See below summary table of typical properties.

PROCESSING AND HANDLING

Screen Printing Equipment /	Manual
Screen Types /	Polyester, stainless steel (43T – 90T gauge mesh)
Typical Cure Conditions /	Room temperature (24°C) for 15 minutes
Typical Circuit Line Width /	0.5 – 10mm (43T-mesh stainless steel screen)
Clean-up Solvent /	Warm water and soap
Surface Resistivity /	32Ω/Sq when using a brush or manual screen printing
Shelf Life /	6 months after opening
Storage /	Electric Paint should be stored, tightly sealed in a clean, stable environment at room temperature. Composition should be thoroughly mixed prior to use.

See below graph to predict resistance using manual screen printing.

Bare Conductive Ltd
First Floor, 98 Commercial St
London E1 6LZ
United Kingdom

tel +44 0 207 650 7977
fax +44 0 203 002 4697
info@bareconductive.com
bareconductive.com

© 2015 / Bare Conductive Ltd.

1



TYPICAL PROPERTIES TABLE

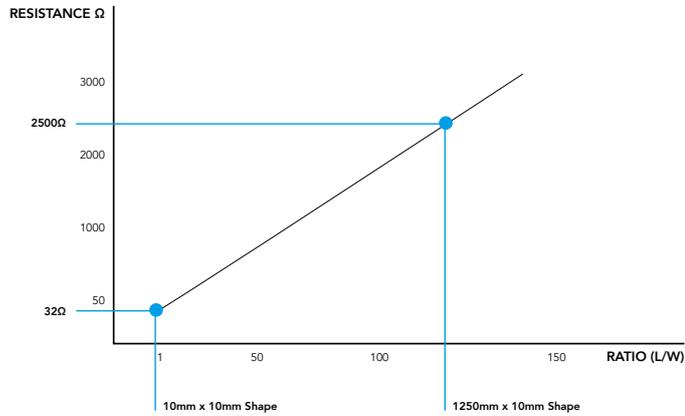
TABLE 1 TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES	
TEST	PROPERTIES
Sheet Resistivity (ohms/sq/50 microns)	55
Density (g/ml)	1.16
TABLE 2 COMPOSITION PROPERTIES	
Viscosity	Thixotropic
Thinner	Water

Table 1 and 2 show anticipated physical properties for **Electric Paint** based on specific controlled experiments in our labs when applied highly accurately. For more realistic values for application of the paint with brushes and screen printing see the below graph and equation. Further notes on working with **Electric Paint** can be found in **Application Notes**.

PROCESSING GRAPH AND EQUATION

When processed using manual screen printing one can expect a surface resistivity of 32 Ω/Sq. The below graph illustrates how resistance changes with line shape and a simple equation can be applied to roughly predict surface resistance:

$$\text{Resistance} = 19.77(\text{length}/\text{width}) + 12$$



Bare Conductive Ltd
 First Floor, 98 Commercial St
 London E1 6LZ
 United Kingdom

tel +44 0 207 650 7977
 fax +44 0 203 002 4697
 info@bareconductive.com
bareconductive.com

© 2015 / Bare Conductive Ltd.

2

Abb. A.9.: Datenblatt zur LED von Reichelt Elektronik [30].



LL-304PGC2E-G4-1BC

DATA SHEET

QC:

ENG:

Prepared By:

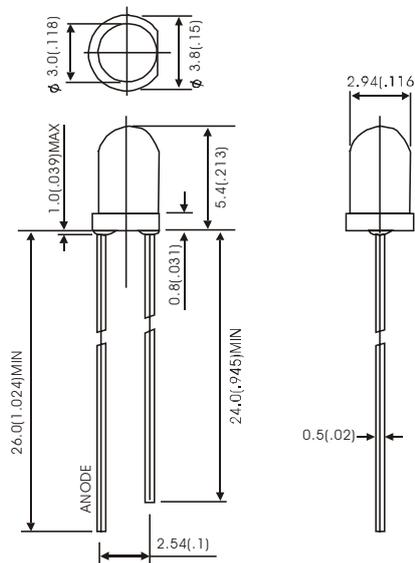
Part No.	LL-304PGC2E-G4-1BC	Spec No.	S/N-040722016S	Page	1 of 1
----------	--------------------	----------	----------------	------	--------



Features

- ◆ High intensity
- ◆ Standard T-1 diameter package
- ◆ Small viewing angle
- ◆ General purpose leads
- ◆ Reliable and rugged

Package Dimension:



Part NO.	Lens Color	Source Color
LL-304PGC2E-G4-1BC	Water Clear	Super Bright True Green

Notes:

1. All dimensions are in millimeters (inches).
2. Tolerance is $\pm 0.25(.010)$ mm unless otherwise noted.
3. Protruded resin under flange is 1.0mm(.04") max
4. Lead spacing is measured where the leads emerge from the package.
5. Specifications are subject to change without notice
6. Caution in ESD:
 Static Electricity and surge damages the LED. It is recommend to use a wrist band or anti-electrostatic glove when handling the LED. All devices, equipment and machinery must be properly grounded.

Part No.	LL-304PGC2E-G4-1BC	Spec No.	S/N-040722016S	Page	2 of 2
----------	--------------------	----------	----------------	------	--------

**Absolute Maximum Ratings at Ta=25°C**

Parameter	MAX.	Unit
Power Dissipation	100	mW
Peak Forward Current (1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width)	100	mA
Continuous Forward Current	35	mA
Derating Linear From 50°C	0.4	mA/°C
Reverse Voltage	5	V
Operating Temperature Range	-40°C to +80°C	
Storage Temperature Range	-40°C to +80°C	
Lead Soldering Temperature [4mm(.157") From Body]	260°C for 5 Seconds	

Electrical Optical Characteristics at Ta=25°C

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Condition
Luminous Intensity	I _v	5000	6000	---	mcd	I _F =20mA (Note 1)
Viewing Angle	2θ _{1/2}	15	20	25	Deg	(Note 2)
Peak Emission Wavelength	λ _p	510	515	520	nm	I _F =20mA
Dominant Wavelength	λ _d	520	525	530	nm	I _F =20mA (Note 3)
Spectral Line Half-Width	Δλ	---	34	---	nm	I _F =20mA
Forward Voltage	V _F	2.8	3.6	4.0	V	I _F =20mA
Reverse Current	I _R	---	---	100	μA	V _R =5V

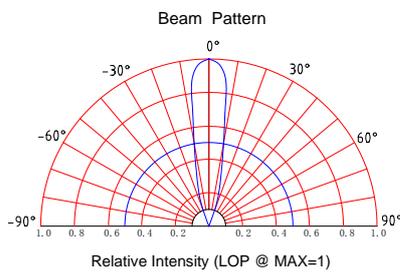
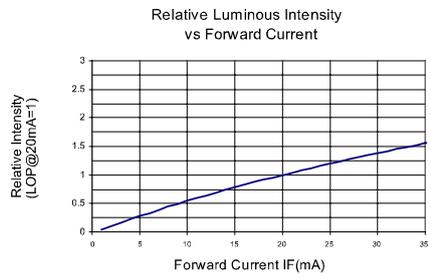
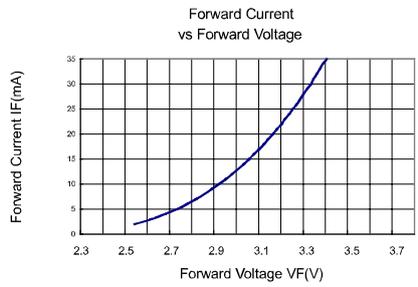
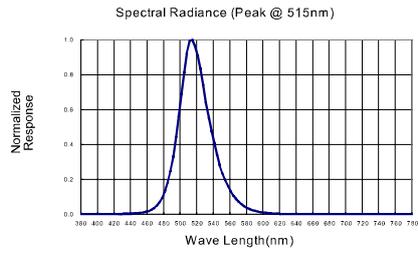
Note:

1. Luminous intensity is measured with a light sensor and filter combination that approximates the CIE eye-response curve.
2. θ_{1/2} is the off-axis angle at which the luminous intensity is half the axial luminous intensity.
3. The dominant wavelength (λ_d) is derived from the CIE chromaticity diagram and represents the single wavelength which defines the color of the device.

Part No.	LL-304PGC2E-G4-1BC	Spec No.	S/N-040722016S	Page	3 of 3
-----------------	---------------------------	-----------------	-----------------------	-------------	---------------



Typical Electrical / Optical Characteristics Curves
 (25°C Ambient Temperature Unless Otherwise Noted)



Part No.	LL-304PGC2E-G4-1BC	Spec No.	S/N-040722016S	Page	4 of 4
----------	--------------------	----------	----------------	------	--------

Abb. A.10.: Datenblatt zum Wippschalter von RS [33].

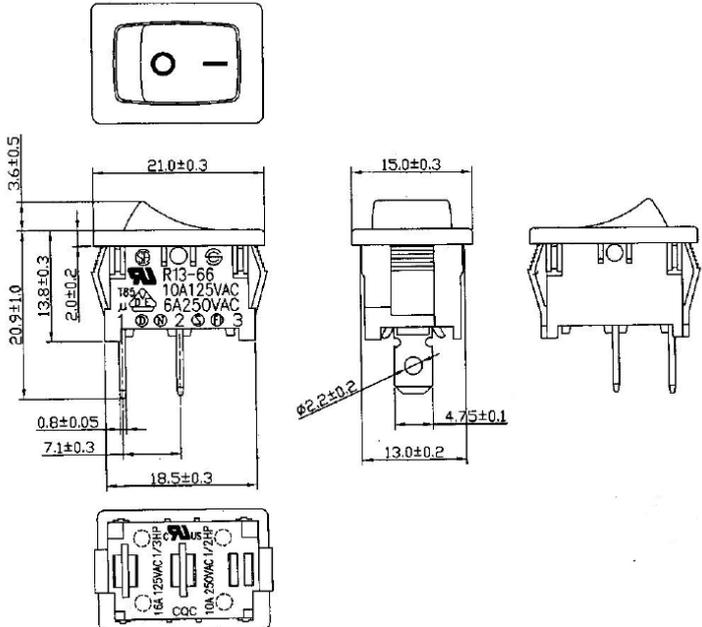
ENGLISH

Datasheet

Black SPST Rocker Switch

RS Stock number [419-754](#)

Dimensions: (mm)



Specifications

- Rating: 10A, 125V, 6A, 250V AC
- Contact R: 50m ohm Max
- Insulation R: DC 500V 100M ohm Min
- Dielectric Strength: AC 1500V 1 minute
- Operating Temperature: -20°C ~ 85°C
- Circuit: 2P SPST ON-OFF

RS, Professionally Approved Products, gives you professional quality parts across all products categories. Our range has been testified by engineers as giving comparable quality to that of the leading brands without paying a premium price.

Abb. A.11.: Datenblatt zu den Widerständen in der Falle von RS [34].

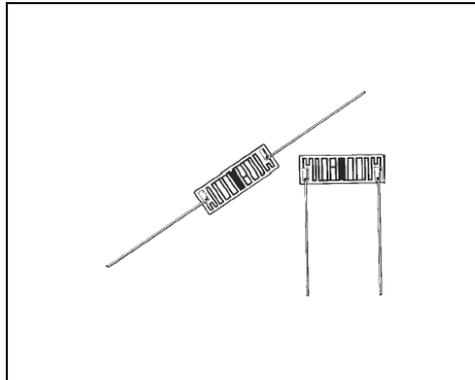


Product – Specification

TYPE HB SERIES

1st April 2003
ISSUE 6

High Value / Voltage Resistors



TYPE HB SERIES

Tyco are pleased to offer the new wider HB range of high value, high voltage resistors. The CGS HBO and HVF ranges and the Holsworthy TFR2 Series were merged into one new important high voltage plate resistor - the HB. This new series offers an epoxy coated package with axial or radial leads, values up to 1 gig ohm, and an operating voltage to 20KV as standard and 30KV to order. Custom designs are particularly welcomed.

KEY FEATURES

- Element Voltage up to 15KV
- Excellent Size to Power Ratio
- Resistance Values up to 1 Gig Ohm
- High Reliability
- Low Noise at Low Values
- Attractively Priced
- Custom Designs Particularly Welcome
- All Sizes Stocked at RS Components

STOCKISTS:

This product is stocked by RS.

Telephone Tyco Passive Product Support Team ++ 44 (0) 1793 572484

Website – www.resistors.tycoelectronics.com

Email – passivesales@tycoelectronics.com

Page 1 of 2



Product – Specification

TYPE HB SERIES

1st April 2003
ISSUE 6

ELECTRICAL

TYPE	Working Voltage KV Maximum DC	Watts at 20°C	Watts at 70°C	Value Range
HBA	1.0	0.8	0.4	1K - 120 Meg
HB1	7.5	2.0	1.0	10K - 1 Gig
HB3	15.0	4.0	2.0	10K - 1 Gig

Resistance Tolerance:		1%, 2%, 5%
Temperature Coefficient:		± 100ppm/°C
Voltage Coefficient:	HBA, HB1 Types Increasing to 0.02ppm/Volt applied at 800K. Increasing to 2.0ppm/Volt applied at 50M. HB3 Type. Increasing to 0.01ppm/Volt applied at 1M0. Increasing to 2.0ppm/Volt applied at 100M.	Negligible up to 100K. Increasing to 1.0ppm/Volt applied at 5M0 Increasing to 8.0ppm/Volt applied at 1000M. Negligible up to 200K. Increasing to 1.0ppm/Volt applied at 10M. Increasing to 8.0ppm/Volt applied at 1000M.
Noise (Quantech):	Dependent on resistor type and ohmic value.	-20db (0.1µ V/V) at lower values. (Up to + 10db (3.3 µ V/V) at higher values.)
Insulation Resistance:	Better than 10 ⁶ Meg ohms at 500V dc. Epoxy Encapsulation only.	
Derating Curve:	Wattage rating at 70°C derates linearly to zero at 150°C	

ENVIRONMENTAL

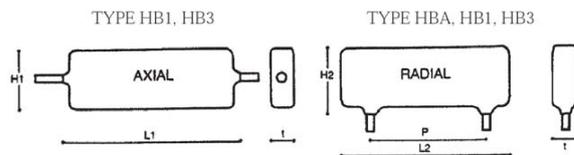
Ambient Temperature Range:	-55°C to +125°C
Load Stability:	Better than 0.5% (1000 hrs. at 70°C)
Long Term Damp Heat:	Better than 0.25% (Steady state 56 days 95% RH at 40°C)
Rapid Change of Temperature:	Better than 0.1% (-55°C to +125°C for 5 cycles)
Resistance to Soldering Heat:	Better than 0.05% (350 °C for 3.5 secs)
Encapsulation:	Conformal coating, Epoxy Resin
Resistor Marking:	Legend printed - Type, Value, Tolerance, Date Code.
Solvent Resistance:	The print will withstand the action of all commonly used industrial cleansing solvents.
Lead Material:	Tinned Copper Wire.
Lead Length:	Minimum 20mm
Lead Diameter:	Nominal 0.63mm

DIMENSIONS

N.B. HB1RE, HB3RE. The following values are stock. For non-stock values we normally seek a print run of 500 pieces.
10K, 100K, 200K, 300K, 1M, 3M, 5M, 10M, 20M, 50M, 100M, 200M, 300M, 500M, 1GIG.

	HBA (HVFI)	HBA1
L1	N/A	28.8 Max
L2	8.0	26.5
H1	N/A	9.2
H2	12.5	10.4
d	2.6	3.0
P Nominal	5.0	22.9
Weight (grms)	0.7	1.35

All Dimensions are nominal and in 'mm' unless otherwise stated. Do not Scale.



HOW TO ORDER

COMMON PART	DISSIPATION AT 70°C	RESISTANCE VALUES	TOLERANCE	TEMPERATURE COEFFICIENT OF RESISTANCE	LEAD STYLES	COATING STYLES
HB	A - 0.4 Watts 1 - 1.0 Watts 3 - 2.0 Watts	1Kohm (1000ohms) 1K0 1Megohm(1,000,000ohms) 1M0	F - 1% G - 2% J - 5%	Z - 100ppm	R - Radial Leads A - Axial Leads (HB1, HB3 Only for Axial Leads)	E - Epoxy Blue Coating

This publication is issued to provide outline information only and (unless specifically agreed to the contrary by the Company in writing) is not to form part of any order or be regarded as a representation relating to the products or service concerned. We reserve the right to alter without notice the specification, design, price or conditions of supply of any product or service. Whilst Tyco Electronics Components products are of the very highest quality and reliability, all electronic components can occasionally be subject to failure. Where failure of a Tyco Electronics Components product could result in life threatening consequences, then the circuit and application must be discussed with the Company. Such areas might include ECG, respiratory and other medical and nuclear applications and any non fail-safe applications circuit.

Telephone Tyco Passive Product Support Team ++ 44 (0) 1793 572484

Website – www.resistors.tycoelectronics.com

Email – passivesales@tycoelectronics.com

Page 2 of 2

Abb. A.12.: Datenblatt zu den Laborsteckerverbindern in der Falle von RS [32].

Advanced Contact Technology

Multi-Contact



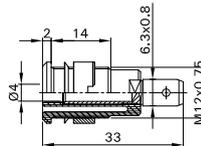
STÄUBLI GROUP

Ø 4 mm-Einbaubuchsen

Ø 4 mm Panel-mount Sockets

Douilles Ø 4 mm à visser

SLB4-F6,3 SLB4-F6,3/N-X



Montagebohrung
Panel drilling
Perçage de panneau



MA 152

Isolierte, starre Ø 4 mm-Buchsen, geeignet zur Aufnahme federnder Ø 4 mm-Stecker mit starrer Isolierhülse. Messingdrehteil, vernickelt oder vergoldet. Montage durch Festschrauben in Bohrungen von Platten oder Gehäusen aus Kunststoff, Metall etc. **Anschluss: Flachstecker 6,3 mm x 0,8 mm.**

Insulated Ø 4 mm rigid sockets accepting spring-loaded Ø 4 mm plugs with rigid insulating sleeve. Machined brass, nickel- or gold-plated. The socket is screwed into predrilled panels of plastic, metal etc. **Flat connecting tab 6.3 mm x 0.8 mm.**

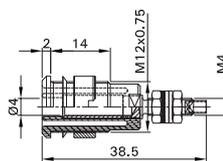
Douilles rigides Ø 4 mm, adaptées à la connexion de fiches Ø 4 mm élastiques à fourreau rigide. Laiton décollété, nickelé ou doré. A visser dans des perçages de panneaux ou de boîtiers plastiques, métalliques... **Raccord plat 6,3 mm x 0,8 mm.**

Typ Type Type	Best.-Nr. Order No. N° de Cde	Bemessungsspannung / -strom Rated voltage / current Tension / intensité assignée	Mitgeliefertes Montagmaterial Supplied assembly material Matériel de fixation livré		*Farben *Colours *Couleurs
---------------------	-------------------------------------	--	---	--	----------------------------------

SLB4-F6,3	23.3060-*	1000 V, CAT III / 32 A	1x MUR/M12x0,75 (→ 194) 1x SSP4 (→ 194)	Au	<table border="1"><tr><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr><tr><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td></tr></table>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
20	21	22	23	24											
25	26	27	28	29											
SLB4-F6,3/N-X	49.7046-*	1000 V, CAT III / 32 A	1x MUR/M12x0,75 (→ 194)	Ni	<table border="1"><tr><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr><tr><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td></tr></table>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
20	21	22	23	24											
25	26	27	28	29											

Zubehör	Accessories	Accessoires
Rohrschlüssel: SS2, SS425 (→ Seite 196) Flachsteckhülse: FSH6,3x0,8 (→ Seite 196)	Tube spanners: SS2, SS425 (→ page 196) Flat connecting receptacle: FSH6,3x0,8 (→ page 196)	Clés spéciales : SS2, SS425 (→ page 196) Cosse plate : FSH6,3x0,8 (→ page 196)

SLB4-G SLB4-G/N-X



Montagebohrung
Panel drilling
Perçage de panneau



MA 152

Isolierte, starre Ø 4 mm-Buchsen, geeignet zur Aufnahme federnder Ø 4 mm-Stecker mit starrer Isolierhülse. Messingdrehteil, vernickelt oder vergoldet. Montage durch Festschrauben in Bohrungen von Platten oder Gehäusen aus Kunststoff, Metall etc. **Anschluss: Gewindebolzen M4 und Lötloch.**

Insulated Ø 4 mm rigid sockets accepting spring-loaded Ø 4 mm plugs with rigid insulating sleeve. Machined brass, nickel- or gold-plated. The socket is screwed into predrilled panels of plastic, metal etc. **Connection: Threaded bolt M4 and soldering hole.**

Douilles rigides Ø 4 mm, adaptées à la connexion de fiches Ø 4 mm élastiques à fourreau rigide. Laiton décollété, nickelé ou doré. A visser dans des perçages de panneaux ou de boîtiers plastiques, métalliques... **Raccord : Embout fileté M4 et fût à souder.**

Typ Type Type	Best.-Nr. Order No. N° de Cde	Bemessungsspannung / -strom Rated voltage / current Tension / intensité assignée	Mitgeliefertes Montagmaterial Supplied assembly material Matériel de fixation livré		*Farben *Colours *Couleurs
---------------------	-------------------------------------	--	---	--	----------------------------------

SLB4-G	23.3020-*	1000 V, CAT III / 32 A	1x MUR/M12x0,75 (→ 194), 1x SSP4 (→ 194) 2x MU0,8D/M4 (→ 193), 2x U/M4 (→ 194), 1x FS/M4 (→ 193)	Au	<table border="1"><tr><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr><tr><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td></tr></table>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
20	21	22	23	24											
25	26	27	28	29											
SLB4-G/N-X	49.7043-*	1000 V, CAT III / 32 A	1x MUR/M12x0,75 (→ 194) 2x MU0,8D/M4N (→ 193)	Ni	<table border="1"><tr><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr><tr><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td></tr></table>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
20	21	22	23	24											
25	26	27	28	29											

Zubehör	Accessories	Accessoires
Rohrschlüssel: SS2, SS425 (→ Seite 196)	Tube spanners: SS2, SS425 (→ page 196)	Clés spéciales : SS2, SS425 (→ page 196)

Herzlich willkommen [My Account](#) | [My Wishlist](#) | [Checkout](#) | [Log In](#) Your Language: [English](#) Your Shopping cart is empty.

PLAY-ZONE[®].CH

Search entire store here... [GO](#)

[Home](#) [Electronic Kits/Access.](#) [Components](#) [Lab Equipment](#) [Audio/Video/Game](#) [Genuss](#) [Stock Clearing](#)

[BLOG.PLAY-ZONE.CH](#)

Home / [Electronic Kits/Access.](#) / [Power Supplies / Kabel / Stecker / Cables / Connectors](#) > / [Plugs / Connectors / Kits and Modules](#) > / [Breakout Boards](#) /

Adafruit JST-PH 2-Pin SMT Right Angle Breakout Board



Adafruit JST-PH 2-Pin SMT Right Angle Breakout Board
 Email to a Friend
 12 pcs. available from stock
Fr.2.50

Buy 5 for Fr.2.30 each and save 8%
 Buy 10 for Fr.1.90 each and save 24%

Qty: [Add to Cart](#) OR [Add to Wishlist](#) / [Add to Compare](#)

Quick Overview
 A simple 2-pin connector soldered onto a breadboard-friendly breakout.

Details
 A simple 2-pin connector soldered onto a breadboard-friendly breakout. This is compatible with the "JST PH 2-pin" connector. Mates perfectly with all our 1-cell LiPoly. We also have simple JST pigtailed that mate with this connector.

Additional Information [Products Review](#)

SKU	ada-1862
Weight	0.0100
Manufacturer	Adafruit Industries

SHARE AND ENJOY!

[Facebook](#) [Twitter](#) [Email](#) [RSS](#) [LinkedIn](#)

Related Products

Check items to add to the cart or select all

-  Cable with JST PH Connectors / 2Pin / Female 40cm
Fr.2.90
 As low as: Fr.2.80
[. Add to Wishlist](#)
-  JST PH Connector with Cable / 2Pin / Female
Fr.1.50
 As low as: Fr.1.35
[. Add to Wishlist](#)

Compare Products

You have no items to compare.

My Cart

You have no items in your shopping cart.

Recently Viewed Products

Polymer Lithium Ion Battery - 2000mAh

Abb. A.13.: Daten dem Breakout Board von PlayZone [27].

Herzlich Willkommen | My Account | My Wishlist | Checkout | Log In | Your Language: English | Your Shopping cart is empty.

PLAY-ZONE[®] CH

Search entire store here... GO

Home | Electronic Kits/Access. | Components | Lab Equipment | Audio/Video/Game | Genuss | Stock Clearing | BLOG.PLAY-ZONE.CH

Home / Electronic Kits/Access. / Power Supplies / Akkus, Charger/Booster /

Polymer Lithium Ion Battery - 2000mAh

Email to a Friend

78 pcs. available from stock

Fr.24.90

Qty: OR

Quick Overview

These are very slim, extremely light weight batteries based on the new Polymer Lithium Ion chemistry. 3.7V at 2000mAh!

MORE VIEW 3

Details

These are very slim, extremely light weight batteries based on the new Polymer Lithium Ion (abbreviated LI-poly, LI-Po, LI-Po, LIP, PLI or LIP) chemistry.

This is the highest energy density currently in production. Each cell outputs a nominal 3.7V at 2000mAh! Comes terminated with a standard 2-pin JST-PH connector - 2mm spacing between pins. These batteries require special charging. Do not attempt to charge these with anything but a specialized Lithium Polymer charger.

Battery includes built-in protection against over voltage, over current, and minimum voltage.

Note: Although these cells are rated for 2C continuous discharge, the wiring and connectors are only rated up to 1A, so be sure to take that into account when determining your power requirements

Dimensions: 5.5mm x 53mm x 59mm

Weight: 36g (1.27oz)

Features:

- 2C continuous discharge
- Excellent long-term self-discharge rates (<8% per month)
- Robust power source under extreme conditions (-25 to 60C)

Additional Information | Product's Review

SKU	P00001583
Weight	0.0300
Manufacturer	OEM

Related Products

Check items to add to the cart or select all

SparkFun Power Cell - LiPo Charger/Booster
Fr.29.90
[Add to Wishlist](#)

Compare Products

You have no items to compare.

My Cart

You have no items in your shopping cart.

Recently Viewed Products

Adafruit JST-PH 2-Pin SMT Right Angle Breakout Board

Abb. A.14.: Daten zum Polymer Lithium Ion Akku von PlayZone [28].

A.1.3. Erste Seiten der Onlinequellen



Abb. A.15.: Erste Seite der Onlinquelle [39].

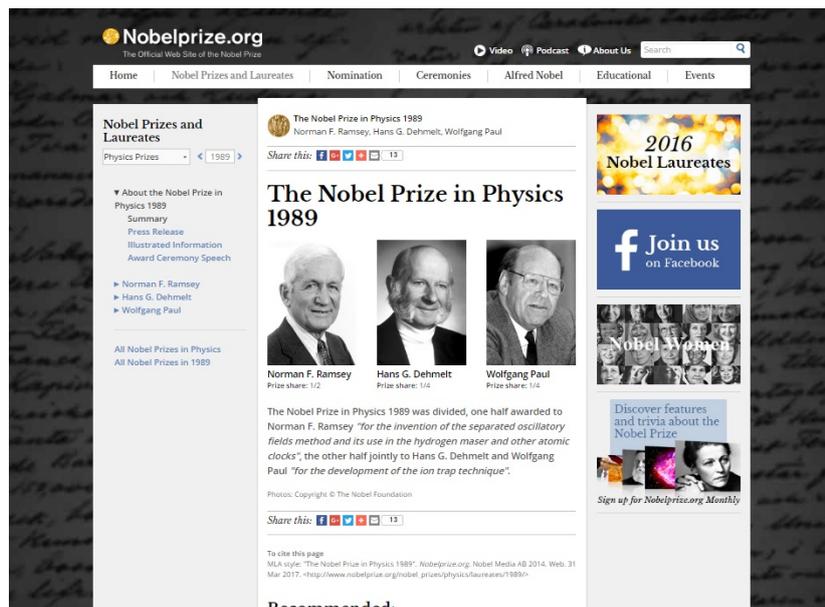


Abb. A.16.: Erste Seite der Onlinquelle [20].

Abb. A.17.: Erste Seite der Onlinequelle [6].

Citation: C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **40**, 100001 (2016)



$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$
 Status: ****

p MASS (atomic mass units u)

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV. See the next data block.

VALUE (u)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
1.007276466879 ± 0.000000000091	MOHR	16	RVUE 2014 CODATA value
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●			
1.007276466812 ± 0.000000000090	MOHR	12	RVUE 2010 CODATA value
1.00727646677 ± 0.000000000010	MOHR	08	RVUE 2006 CODATA value
1.00727646688 ± 0.000000000013	MOHR	05	RVUE 2002 CODATA value
1.00727646688 ± 0.000000000013	MOHR	99	RVUE 1998 CODATA value
1.007276470 ± 0.0000000012	COHEN	87	RVUE 1986 CODATA value

p MASS (MeV)

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV. The conversion from u to MeV, $1 u = 931.494 0054(57) \text{ MeV}/c^2$ (MOHR 16, the 2014 CODATA value), involves the relatively poorly known electronic charge.

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
938.2720813 ± 0.0000058	MOHR	16	RVUE 2014 CODATA value
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●			
938.272046 ± 0.000021	MOHR	12	RVUE 2010 CODATA value
938.272013 ± 0.000023	MOHR	08	RVUE 2006 CODATA value
938.272029 ± 0.000080	MOHR	05	RVUE 2002 CODATA value
938.271998 ± 0.000038	MOHR	99	RVUE 1998 CODATA value
938.27231 ± 0.00028	COHEN	87	RVUE 1986 CODATA value
938.2796 ± 0.0027	COHEN	73	RVUE 1973 CODATA value

$$|m_p - m_{\bar{p}}|/m_p$$

A test of CPT invariance. Note that the comparison of the \bar{p} and p charge-to-mass ratio, given in the next data block, is much better determined.

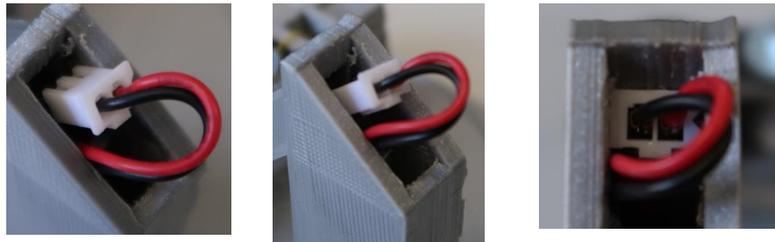
VALUE	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<7 × 10⁻¹⁰	90	¹ HORI	11	SPEC $\bar{p}e^- \text{He atom}$
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
<2 × 10 ⁻⁹	90	¹ HORI	06	SPEC $\bar{p}e^- \text{He atom}$
<1.0 × 10 ⁻⁸	90	¹ HORI	03	SPEC $\bar{p}e^- \text{}^4\text{He}, \bar{p}e^- \text{}^3\text{He}$
<6 × 10 ⁻⁸	90	¹ HORI	01	SPEC $\bar{p}e^- \text{He atom}$
<5 × 10 ⁻⁷		² TORII	99	SPEC $\bar{p}e^- \text{He atom}$

¹HORI 01, HORI 03, HORI 06, and HORI 11 use the more-precisely-known constraint on the \bar{p} charge-to-mass ratio of GABRIELSE 99 (see below) to get their results. Their

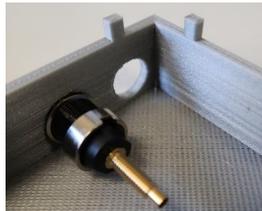
A.2. Bauanleitung

Bauanleitung

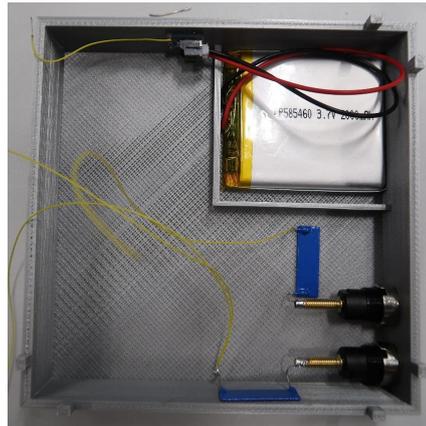
1. Alle Teile ausdrucken.
2. Bearbeiten der Elektroden und des LED Ständers mit einer Feile, sodass sie auf die Stative passen und der LED Stecker in den Ausgang des LED Halters passt.



3. Einbauen der Elektronik in den Boden:
 - a. Multi Contacts einbauen und festschrauben.



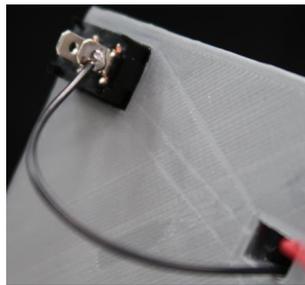
- b. Widerstände zurechtbiegen, Doppelseitiges Klebeband auf den Boden kleben, jeweils an einen Multi Contact anlöten und gleichzeitig festkleben.
 - c. 4 Kabel für Elektroden und Verbindung zwischen Breakout Board und LED Schalter abschneiden und mit dem LötKolben die Isolierung an den Enden abnehmen.
 - d. Kabel für Elektroden anlöten. Zwei an einen Widerstand eines an den anderen.
 - e. Breakoutboard neben Batteriehalterung kleben mit Heißkleber.
 - f. Kurzes Kabel an Minus des Breakout Boards löten.



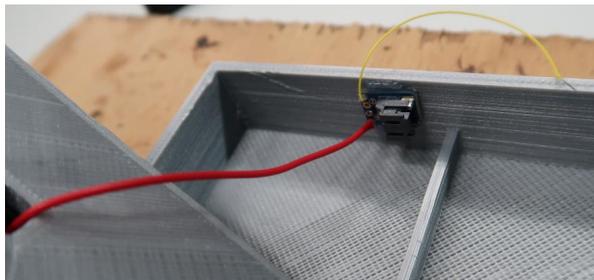
4. LED Ständer auf Stativ stecken und LED Halterung anbringen.



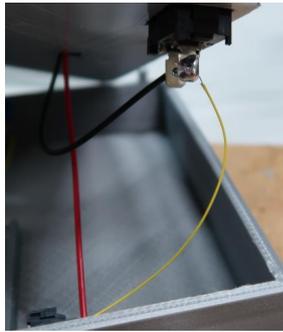
5. Schwarzes Kabel der LED an den Schalter löten.



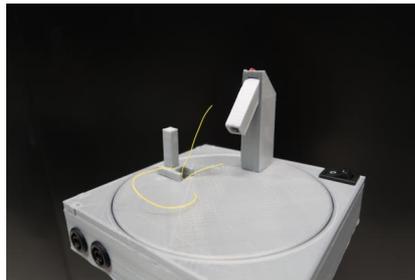
6. Rotes Kabel von LED Halterung an den Plus Pol des Breakout Boards löten.



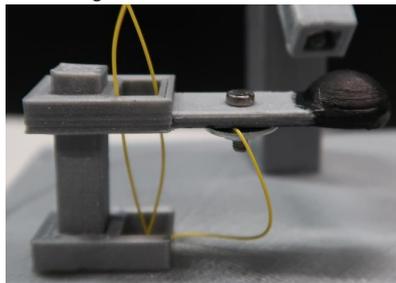
7. Gelbes Kabel vom Breakout Board an die andere Seite des Schalters löten.



8. Kabel für die Elektroden durch dafür vorgesehenes Loch in der Platte führen und Bodenteil und Stativ zusammensetzen.



9. Elektroden anbringen.
- Erstes Zwischenteil auf Ständer stecken.
 - Schraube durch vorgesehenes Loch drehen, Ende des einen Drahtes von dem Widerstand an dem Zwei Drähte befestigt sind um Schraube wickeln, Beilagscheibe darüber legen und festschrauben. Dann auf den Ständer stecken.



- Zwischenteil aufstecken.
- Ringelektrode wie oben beschrieben an dem Kabel das zum anderen Widerstand führt befestigen und anstecken.
- Zwischenteil aufstecken.
- Zweite Kugelelektrode am letzten Kabel befestigen und aufstecken.

A.3. Materialien zum Schülerexperiment

A.3.1. Worksheet



QUADRUPOLE ION TRAP

STUDENT WORKSHEETS

Version 5

en

13/02/17

scollab-info@cern.ch



Warning

When working with quadrupole ion traps you have to follow important safety instructions:



Attention High Voltage

Don't switch on the power supply until your tutor has checked your setup!

Changes in the wiring must be performed only when switched off.

Use touch-proof security cable only.

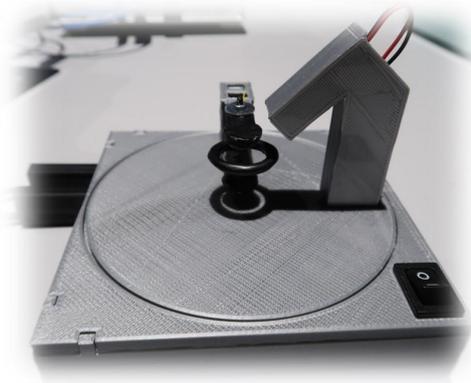
To minimize the current, always integrate a 10 M Ω resistor into your circuit.

Do not touch the electrodes!

Do not destroy the multimeter! That means take out the multimeter for the secondary voltage if you increase the primary voltage over 1 V.

Before switching on, all controls and knobs have to be turned to zero.

Quadrupole ion trap:



Introduction

Your tutor will introduce you to the basics of particle trapping and the details about the equipment used in S'Cool LAB.

Physics

- a) What will we trap with the quadrupole ion traps?
- b) Why are particle traps interesting for particle physics at CERN?
- c) How an ion trap does trap particles?

Technology

- d) What is a transformer and how does it work?
- e) What does DC and AC mean?



Now it's time to set up the experiment!

Follow the instructions step by step. Reading them thoroughly will help you to understand what you should do! In the next two steps you will complete the experimental setup as well as you get tasks to understand the wiring.

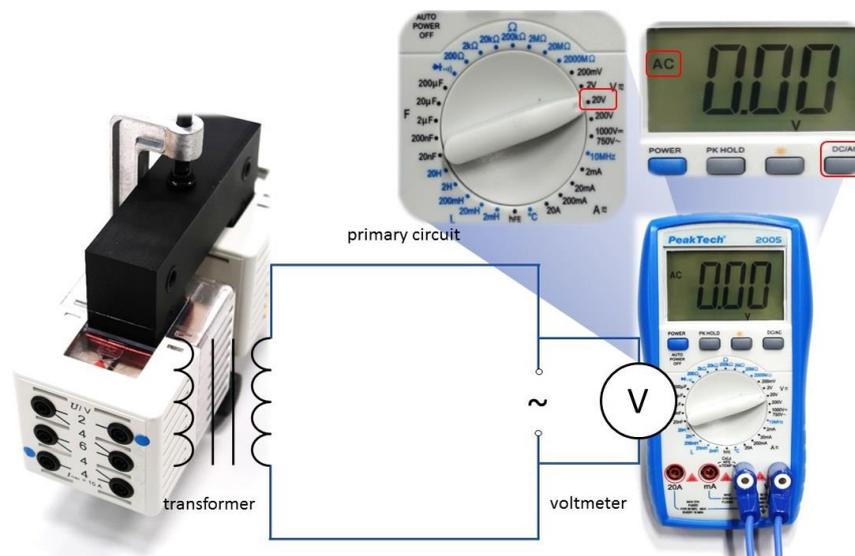
Step 1: Produce a high AC voltage – transformer

To trap particles with an alternating electric (quadrupole) field, we need very high voltages. Therefore, a transformer is used with a primary voltage of 0 - 20 V AC. This voltage is transformed into high voltage - the secondary voltage - by a certain factor. For our setup, the primary voltage is much lower than the secondary voltage.

Task:

Connect the AC power supply with the primary coil of the transformer (look for 2 blue dots). Connect in addition the voltmeter with the blue cables to monitor the primary voltage.

Don't switch the power supply on!





Prediction:

Your transformer is equipped with 2 coils: $N_1 = 50, N_2 = 10000$.

Which amplification factor do you expect?

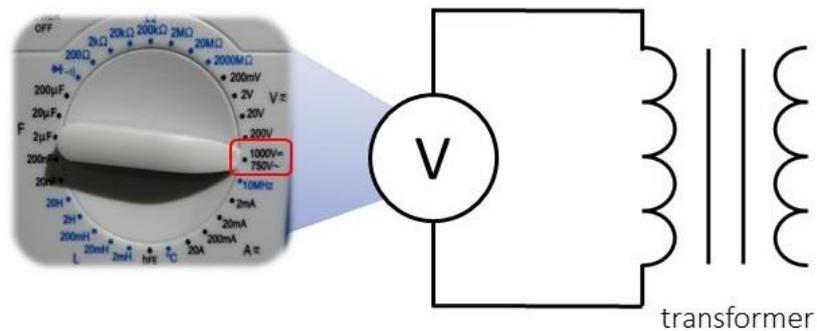
(Do you remember the theoretical formula for the relation between the voltages and the numbers of turns?)

	Student 1	Student 2	Student 3	Student 4
Names:	_____	_____	_____	_____
50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Explain your prediction: *(One sentence /formula is enough!)*

Task:

Now connect a second voltmeter (the one with the black cables) to monitor the secondary voltage. Switch on the primary voltage and increase the voltage to 1 V.





Observation:

What is the measured amplification factor of your transformer?

	Student 1	Student 2	Student 3	Student 4
50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Do your predictions match your observation? If not, why not?



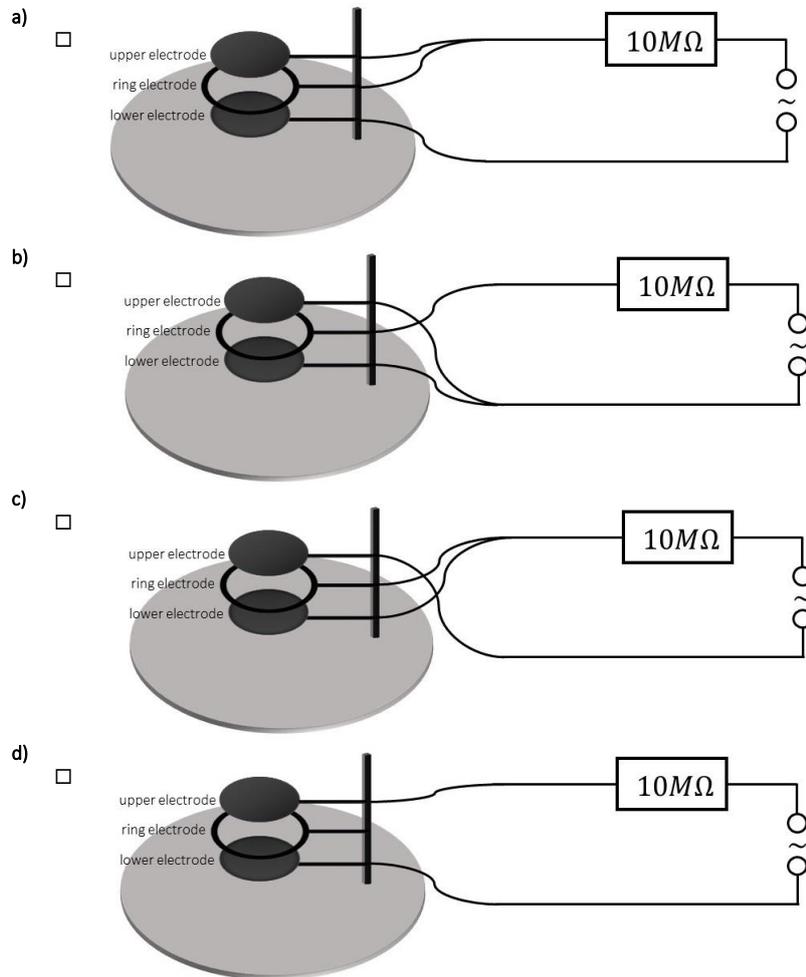
Step 2: Particle trapping – Understand wiring and voltages

We will apply a voltage between the ring electrode in the middle and the upper and lower electrodes to trap particles. That means that the ring electrode is positively charged if the upper and lower electrodes are negatively charged. When the ring electrode is negative, the upper and lower electrodes are positively charged.

Task:

Discuss in your group which sketch represents the wiring of the trap, if you want to have the above described voltage. Decide for one of them. After that explain your reasoning to a tutor.

Hint: We need the $10\text{ M}\Omega$ resistor to limit the current (safety first!). If we only have a high voltage but not a high current, it is not dangerous. The resistor is hidden inside the box below the trap.





Experiment 1: Trapping the spores
 You will now start with trapping and see how the spores behave in the trap.

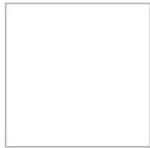
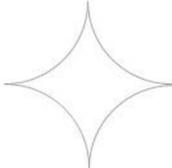
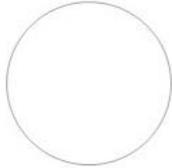


Prediction:

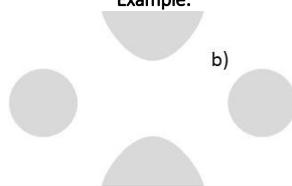
Imagine you place some spores in the centre of the ring electrode. How do you expect them to behave?

Think about how they will be arranged (shape) and where they will be (position).

Decide for one of the **shapes a, b, c, or d** (which are shown bigger than in reality below), and mark the expected **position** of this shape in the sketch of the cross section  below.

a) All at one point	b) rectangular configuration	c) diamond-shaped configuration	d) circular configuration
			

Example:



Student 1



Student 2



Student 3



Student 4





Observation:

Now place some spores in the trap as shown in the introduction, switch on the LED to illuminate them, and find out how they behave.

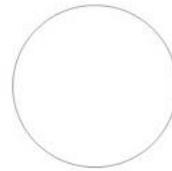
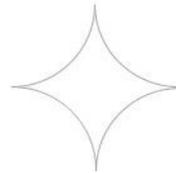
Decide for one of the **shapes a, b, c, or d** (which are shown bigger than in reality below), and mark the observed **position** of this shape in the sketch of the cross section  below.

a)
All at one point

b)
rectangular
configuration

c)
diamond-shaped
configuration

d)
circular configuration



Student 1



Student 2



Student 3



Student 4





Do your predictions match your observation? Try to explain your observations and answer the questions below:

Why is there a certain distance between the spores, and why are they not just all staying close together in the centre of the trap?

Why do you see lines, not small dots?

Why are the spores arranged in the shape you have seen?



Experiment 2: Voltage limits in the trap.

You cannot trap the spores at any voltage. Find the lower and upper limit where the spores fell out of the trap.



Observation:

Read the multimeter for the primary voltage:

Calculate the corresponding secondary voltage which is trapping the particles:

Maximum: _____

Maximum: _____

Minimum: _____

Minimum: _____

1 + 1



OPTIONAL - Calculate:

At the GBAR experiment they trap the antihydrogen ions with a trap with similar metrics than our trap.

Use the formula below to calculate which voltage is needed to trap an antihydrogen ion.

Facts:

- $U = \frac{0.2 m r^2 \omega^2}{q}$
- Electric charge **q** of the proton: $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Mass **m** of a proton or anti-proton: $1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Radius **r** of the GBAR trap: approx. 5 mm
- Frequency **ω** of the AC voltage at GBAR: approx. 200 MHz

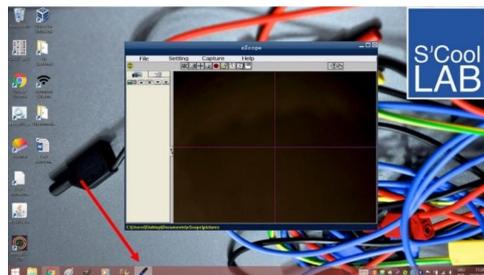
You should obtain approx. 400 V



Last task: Try to record a video of "dancing spores"!
Use the USB-microscopes and the Laptop (username: slabtop, password: Acoolpassword.) to record a video and play it in slow motion.

Instruction: How to use the USB microscope and the software.

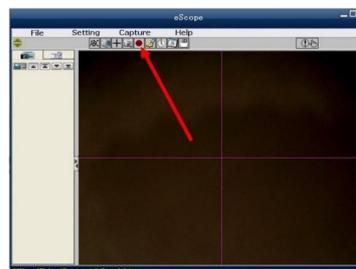
1. Open eScope! (It is attached on the task bar.)



2. Place the USB microscope as close as possible to the electrodes to ensure a good view on the particles. You can adjust the focus using the small blue wheel. The fine tuning might require patience.



3. Once you were able to focus on the spores, record a short video of the spores. Therefore, click the red dot in the tool bar of the program. Change the voltage while recording the video, so that you can have a look on the behaviour of the particles afterwards.

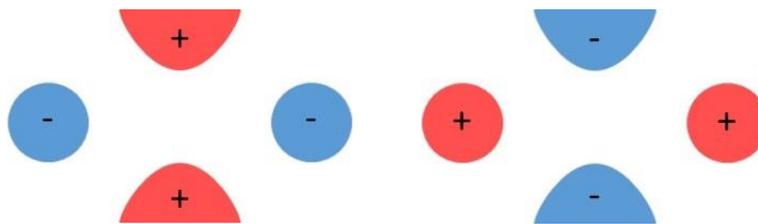




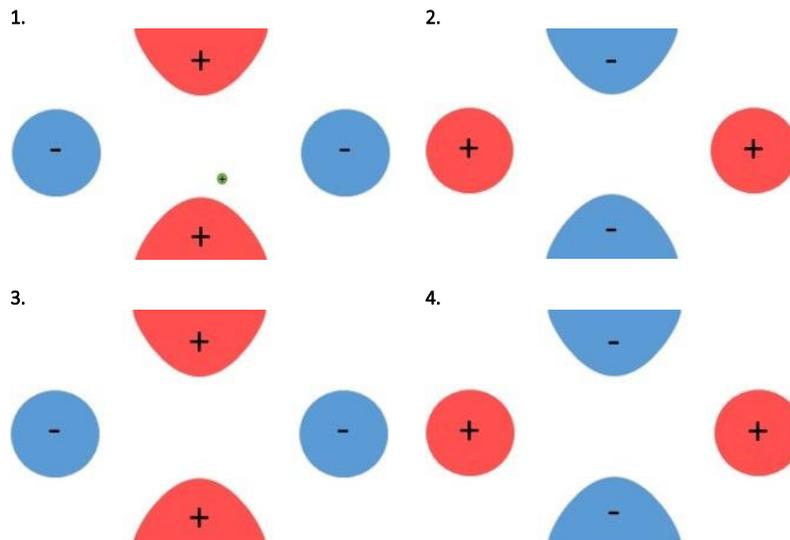
Discussion:

How does the electric field in the trap look like?

Remember the discussion of the field lines between charged spheres in the introduction. Due to the AC voltage the electrodes change their polarity as shown in the figures below. Discuss in your group how the field lines in the trap do look like and draw it in the figure.



Assume one particle in the trap. At the position below. How will it move by changing the polarity of the electrodes? Draw the path of the particle in the following sketch:





OPTIONAL-Experiment: Compensating gravity
 To compensate gravity, we apply an electric DC-voltage between two vertically oriented electrodes - basically this serves as a parallel-plate capacitor.

Task: Connect the upper electrode to the + pole of the DC power supply (use the green/yellow cable for this)
Let your tutor check the wiring!

1 + 1  **OPTIONAL - Calculate:**
 What voltage is needed on a vertical parallel-plate capacitor ($d=14 \text{ mm}$), to compensate the effect of gravity on the spores with the electric field produced?

Facts:

- Electric charge q of the spores: approx. $7 \cdot 10^{-15} \text{ C}$
- Mass m of a spore: approx. $7 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$
- Force on electrically charged particle in the electric field of a plate capacitor:
 $F_e = q \cdot \frac{U}{d}$ U ... Voltage in Volts, d ... distance between the 2 plates in Meter ($d=14 \text{ mm}$)

Help for calculation: Start with $F_e = F_g \Rightarrow q \cdot \frac{U}{d} = m \cdot g$, you should obtain approx. 140 V



Observation:

Now, leave the AC voltage like it is and make sure you have particles in your trap.
Increase the DC voltage slowly and observe how this affects the spores.

How the DC voltage does affects the spores?

Can you explain your observation?

A.3.2. Nachbesprechung

- Did you find out how the electric field in the trap is looking like?
 - Picture! You can see it in the trap.
- What are the particles doing if you have a field like that from a DC voltage? Can you trap particles with that field?
 - They will go on the electrical field line to the electrodes. So you cannot trap the particles.
- What is the difference in our traps?
 - AC voltage!
- So how can you trap the particles?
 - You need an AC voltage. Thereby the electrodes are changing their polarity and the particles decide each moment to go to the other electrode.
 - +/- und Erdung problematisieren mit +/- 10V in Physik gleich wie 0/20 V wichtig ist die Potentialdifferenz.
- Which particles can you trap? – What is the important property?
 - They have to be electrically charged. Otherwise the electric field will not influence them.
- What is the difference between your macroscopic trap and a trap for antiparticles?
 - You need vacuum in the trap otherwise the antiparticles can annihilate with their corresponding particle.
 - (If the used the DC voltage: Elementary particles are far lighter than our spores. That's why you don't need to compensate gravity.)

A.4. Fragebögen

CERN S'Cool LAB Questions about particle traps

S'Cool
LAB



Dear student,

We, the S'Cool LAB team, have prepared this questionnaire to find out what you think about the physics in our particle trap experiment.

Your answers will **remain anonymous** and **this is not a test!**

- For each question, please choose which **ONE** answer you think is correct by putting a cross in the box next to it.
- Please also rate how confident you are in your answer.
- For some questions, we ask you to give a short explanation.
- If you want to change your answer or make a mistake, simply put a new cross in the right place and draw a circle around the new cross.

Many thanks in advance for your help!

Contact:
CERN S'Cool LAB
cern.ch/s-cool-lab

1 How to complete this questionnaire

In this questionnaire you will have always multiple choices for your answer:

What is your favourite animal?	
<input checked="" type="checkbox"/>	Lion.
<input type="checkbox"/>	Horse.
<input type="checkbox"/>	Dog.
<input type="checkbox"/>	Spider.

If you want to change your answer or make a mistake, simply put a new cross in the right place and draw a circle around the new cross.

What is your favourite animal?	
<input checked="" type="checkbox"/>	Lion.
<input type="checkbox"/>	Horse.
<input type="checkbox"/>	Dog.
<input checked="" type="checkbox"/>	Spider.

For each question, we will also ask you how confident you are in your answer. If you are very sure that you gave the right answer, make your cross at "very confident":

How confident are you with your answers?					
not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Very confident

If you just guessed and you really have no idea if your answer is right, make your cross at "not confident at all". Everything else is in between.

If you want to comment on questions or answer in more detail, please use the text field at the very end of the questionnaire.

At this point we would already like to thank you for your help!
We hope you enjoy filling out our questionnaire!

The S'Cool LAB team



2 Identification code

Please mark the respective letter or digit like this:

A		C	...
---	---	---	-----

1. What is the first letter of your first name?
(e.g. *Julia* → J)

A	B	C	D	E	F	G
H	I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T	U
V	W	X	Y	Z	...	

2. How many older sisters do you have?
(e.g. *none* → 0)

0	1	2	3	4	5	
---	---	---	---	---	---	--

3. In which month are you born?
(e.g. *December* → 12)

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12

4. What is the first letter of the first name of your mother? (e.g. *Alexandra* → A)

A	B	C	D	E	F	G
H	I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T	U
V	W	X	Y	Z	...	

5. How many older brothers do you have?
(e.g. *one* → 1)

0	1	2	3	4	5	
---	---	---	---	---	---	--

3 Some questions about you

How old are you?	<input type="checkbox"/> 15 <input type="checkbox"/> 16 <input type="checkbox"/> 17	<input type="checkbox"/> 18 <input type="checkbox"/> 19 <input type="checkbox"/> _____
You are ...	<input type="checkbox"/> female	<input type="checkbox"/> male
What was your grade in Mathematics in your latest grade report?		
What was your grade in Physics in your latest grade report?		
What was your grade in English in your latest grade report?		

4 Particles in a trap

You probably do not know the answers to the following questions. Do not worry about that. We are interested in your ideas about the answers and it is not important to answer them correctly.

4.1 Which property of a particle determines whether or not it is affected by an electric field?

- It has to be magnetic.
- It has to be electrically charged.
- It has to be neutral.
- All particles are affected by electric fields.

How confident are you in your answer?

Not confident at all Very confident

4.2 Which force(s) can be used to trap ions?

(Trapping means to hold particles in a small cage without walls.)

- Magnetic force.
- Electric force.
- Electric and magnetic force.
- Gravitational force.

How confident are you in your answer?

Not confident at all Very confident

5 Current research and particle traps

5.1 What are particle traps used for?						
<input type="checkbox"/>	To build a bomb.					
<input type="checkbox"/>	To investigate the properties of particles.					
<input type="checkbox"/>	To figure out if a particle consists of matter or antimatter					
<input type="checkbox"/>	They are just a nice experiment to watch but it is only for fun without any deeper sense.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

5.2 If you want to trap an antihydrogen ions, what is a very important for the trap?						
<input type="checkbox"/>	You need vacuum inside the trap.					
<input type="checkbox"/>	You need a magnetic field to trap antiparticles.					
<input type="checkbox"/>	You cannot trap antimatter in particle traps.					
<input type="checkbox"/>	You need a very small trap.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

5.3 How can you determine the position of an antihydrogen in a particle trap?						
<input type="checkbox"/>	With the naked eye.					
<input type="checkbox"/>	By observing it due to the reflection of the visible light of a LED.					
<input type="checkbox"/>	Not at all. You can register it if it leaves the trap and annihilates.					
<input type="checkbox"/>	You can see it if you use a magnifying glass.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

6 Differences between our trap in S’Cool LAB and a trap used in fundamental particle research.

We will not trap fundamental particles but far bigger ones. The following questions are about the differences and similarities you expect between fundamental and macroscopic particles.

6.1 Do you trap the particles in a real particle trap with the same physical principle as we will do?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

6.2 Are elementary particles in fundamental research trap influenced by the same forces as microscopic particles in the trap we will use?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident
Explain why you think so:						

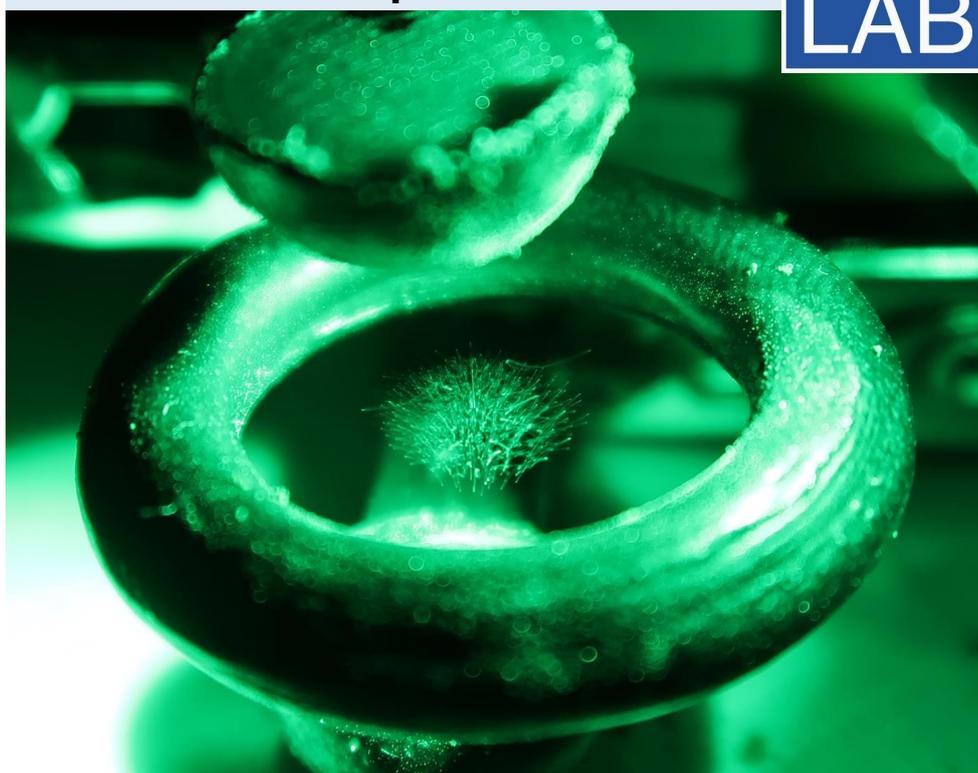
7 How do you like your physics classes?

Please rate the following statements.

	completely disagree	disagree	disagree a little	agree a little	agree	completely agree
I spend time on physics in my free time – even beyond homework.	<input type="checkbox"/>					
I enjoy solving physics problems	<input type="checkbox"/>					
I discuss topics from my physics classes with my friends or my family.	<input type="checkbox"/>					
When I am working on physics problems, sometimes, I do not notice time passing.	<input type="checkbox"/>					
I like our physics classes.	<input type="checkbox"/>					
I would like to spend more time in school on physics.	<input type="checkbox"/>					

CERN S'Cool LAB Questions about quadrupole ion traps

S'Cool
LAB



Dear student,

We, the S'Cool LAB team, have prepared this questionnaire to find out what you think about the physics in our particle trap experiment.

Your answers will **remain anonymous** and **this is not a test!**

- For each question, please choose which **ONE** answer you think is correct by putting a cross in the box next to it.
- Please also rate how confident you are in your answer.
- For some questions, we ask you to give a short explanation.
- If you want to change your answer or make a mistake, simply put a new cross in the right place and draw a circle around the new cross.

Many thanks in advance for your help!

Contact:
CERN S'Cool LAB
cern.ch/s-cool-lab

1 Identification code

Please mark the respective letter or digit like this:

A		C	...
---	---	---	-----

1. What is the first letter of your first name?
(e.g. *Julia* → *J*)

A	B	C	D	E	F	G
H	I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T	U
V	W	X	Y	Z	...	

2. How many older sisters do you have?
(e.g. *none* → *0*)

0	1	2	3	4	5	
---	---	---	---	---	---	--

3. In which month are you born?
(e.g. *December* → *12*)

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12

4. What is the first letter of the first name of your mother? (e.g. *Alexandra* → *A*)

A	B	C	D	E	F	G
H	I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T	U
V	W	X	Y	Z	...	

5. How many older brothers do you have?
(e.g. *one* → *1*)

0	1	2	3	4	5	
---	---	---	---	---	---	--

2 Particles in a quadrupole ion trap

2.1 Which property of a particle determines whether or not it is affected by an electric field?

- It has to be magnetic.
- It has to be electrically charged.
- It has to be neutral.
- All particles are affected by electric fields.

How confident are you in your answer?

Not confident at all Very confident

2.2 Which force(s) hold the particles in the quadrupole ion trap?

(Trapping means to hold particles in a small cage without walls.)

- Magnetic force.
- Electric force.
- Electric and magnetic forces.
- Gravitational force.

How confident are you in your answer?

Not confident at all Very confident

2.3 Which voltage is essential to trap particles in a quadrupole ion trap?

- AC voltage.
- DC voltage.
- Both, AC and DC voltage.
- You do not need a voltage it is the current that holds the particles in the trap.

How confident are you in your answer?

Not confident at all Very confident

2.4 Where is the voltage applied?						
<input type="checkbox"/>	Between the upper and lower electrodes.					
<input type="checkbox"/>	Between the ring electrode and the other electrodes.					
<input type="checkbox"/>	Between the ring electrode and the lower electrode.					
<input type="checkbox"/>	Between the ring electrode and the upper electrode.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

2.5 How does a particle behave in the quadrupole ion trap?						
<input type="checkbox"/>	It stays at a fixed position.					
<input type="checkbox"/>	It flies towards the next electrode and stay there.					
<input type="checkbox"/>	It moves back and forth very fast.					
<input type="checkbox"/>	It falls down.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

2.6 Why does the particle behave like that?						
<input type="checkbox"/>	Due to the electric force which operates along the field lines.					
<input type="checkbox"/>	Due to the equilibrium of forces in the trap.					
<input type="checkbox"/>	Due to the magnetic force.					
<input type="checkbox"/>	Due to gravitation.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

2.7 In which range is the voltage we need to trap microscopic particles such as the lycopodium spores in our quadrupole ion trap?						
<input type="checkbox"/>	1-20 V					
<input type="checkbox"/>	20-400 V					
<input type="checkbox"/>	400-4000 V					
<input type="checkbox"/>	4000-20000 V					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	Very confident				

3 Current research and quadrupole ion traps

3.1 What are particle traps used for?						
<input type="checkbox"/>	To build a bomb.					
<input type="checkbox"/>	To investigate the properties of particles.					
<input type="checkbox"/>	To figure out if a particle consists of matter or antimatter					
<input type="checkbox"/>	They are just a nice experiment to watch but it is only for fun without any deeper sense.					
How confident are you your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

3.2 If you want to trap an antihydrogen ion, which important difference will you need in the experimental setup compared to our setup?						
<input type="checkbox"/>	You need vacuum inside the trap.					
<input type="checkbox"/>	You need a magnetic field to trap antiparticles.					
<input type="checkbox"/>	You cannot trap antimatter in quadrupole ion traps.					
<input type="checkbox"/>	You need a very small trap.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

3.3 How can you determine the position of an antihydrogen ion in a quadrupole ion trap?						
<input type="checkbox"/>	With the naked eye.					
<input type="checkbox"/>	By observing it with using the reflection of the light of a LED, in the same way as we do it with the lycopodium spores.					
<input type="checkbox"/>	Not at all. You can measure it if it leaves the trap and annihilates.					
<input type="checkbox"/>	You can see it if you use a magnifying glass.					
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

4 Differences between our trap in S’Cool LAB and a trap used in fundamental particle research.

In the following questions “our trap” mean the trap you have just used in S’Cool LAB to trap macroscopic particles. We want to know what you think the differences between this macroscopic trap and a trap used in fundamental particle research.

4.1 Do you trap the particles in a real quadrupole ion trap with the same physical principle as we did?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

4.2 Are elementary particles in a fundamental research trap influenced by the same forces as particles in our trap are?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident
Explain why you think so:						

4.3 Is ist possible to trap elementary particles with our trap?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

4.4 Is it possible to trap antihydrogen ions with our trap?						
<input type="checkbox"/> Yes			<input type="checkbox"/> No			
How confident are you in your answer?						
Not confident at all	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Very confident

5 How did you like the particle trap experiment?

Please rate the following statements.

	completely disagree	disagree	disagree a little	agree a little	agree	completely agree
During the experiment, I enjoyed solving physics problems.	<input type="checkbox"/>					
I will discuss what I have learned about particle traps with my friends or my family.	<input type="checkbox"/>					
When I was working on the experiment, I did not notice time passing.	<input type="checkbox"/>					
I liked this experiment in S'Cool LAB.	<input type="checkbox"/>					
I would like to spend more time on studying particle traps.	<input type="checkbox"/>					

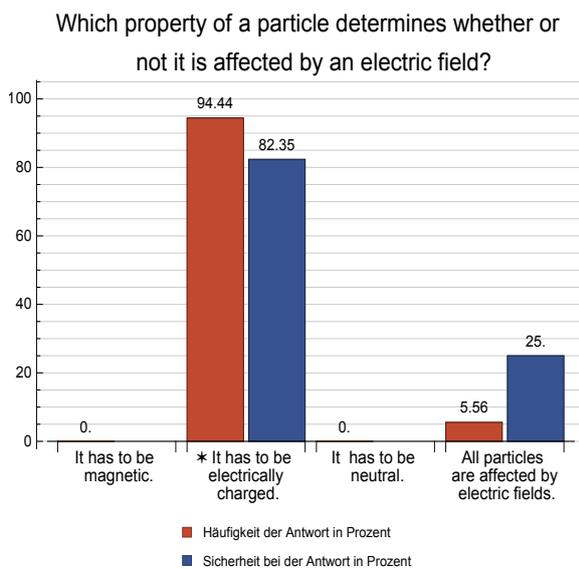
6 Did you feel overwhelmed during the particle trap experiment?

Please rate the following statements.

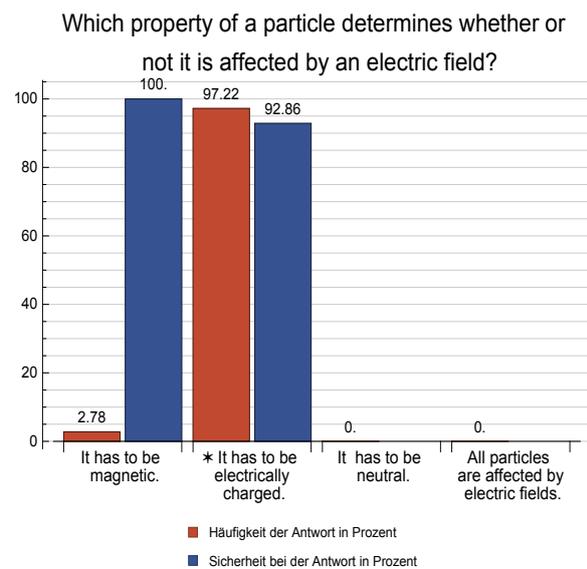
	completely disagree	disagree	disagree a little	agree a little	agree	completely agree
It was difficult to use the equipment.	<input type="checkbox"/>					
I was overwhelmed by the features provided by the equipment.	<input type="checkbox"/>					
I had problems using the equipment to make observations.	<input type="checkbox"/>					
I had problems understanding the physics principles of this experiment.	<input type="checkbox"/>					

A.5. Auswertung der Fragebögen

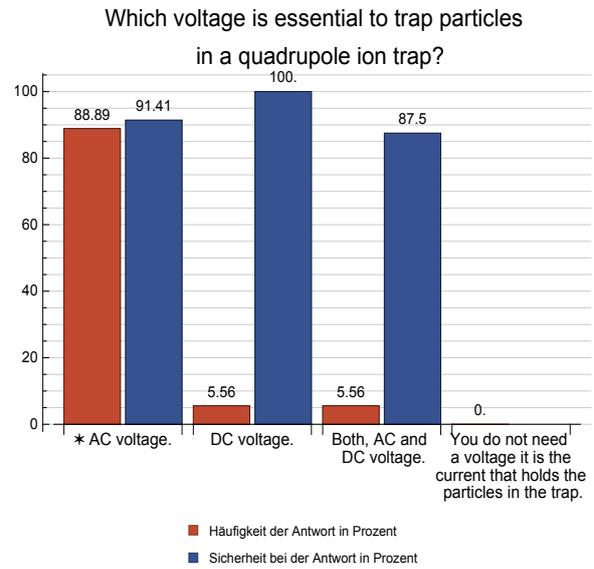
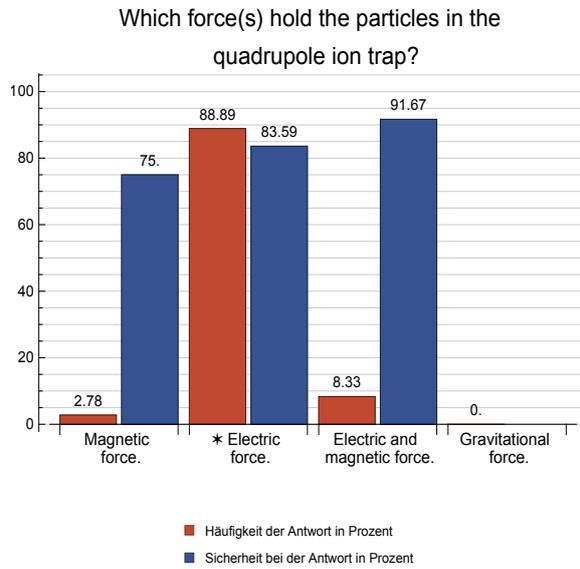
A.5.1. Diagramme physikalisches Verständnis



(a) Pre-Test Frage 1.1, (N=36),
* = richtige Antwort

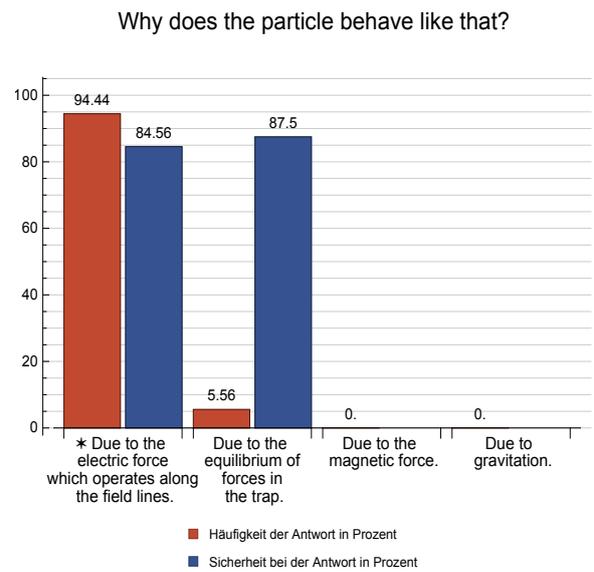
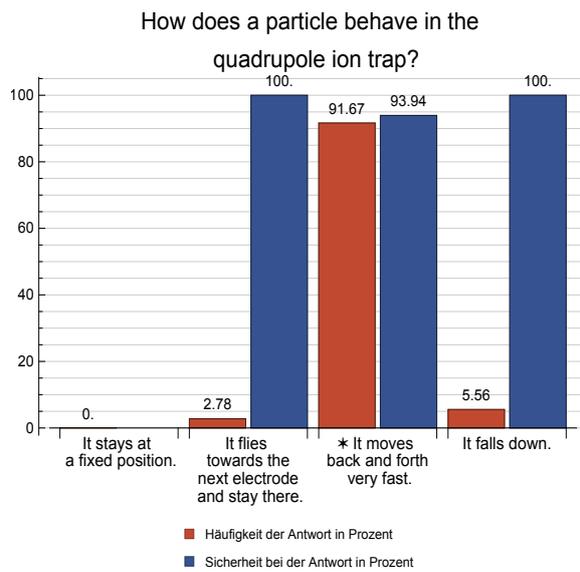


(b) Post-Test, Frage 1.1, (N=36),
* = richtige Antwort



(c) Post-Test, Frage 1.2, (N=36),
* = richtige Antwort

(d) Post-Test, Frage 1.3, (N=36),
* = richtige Antwort

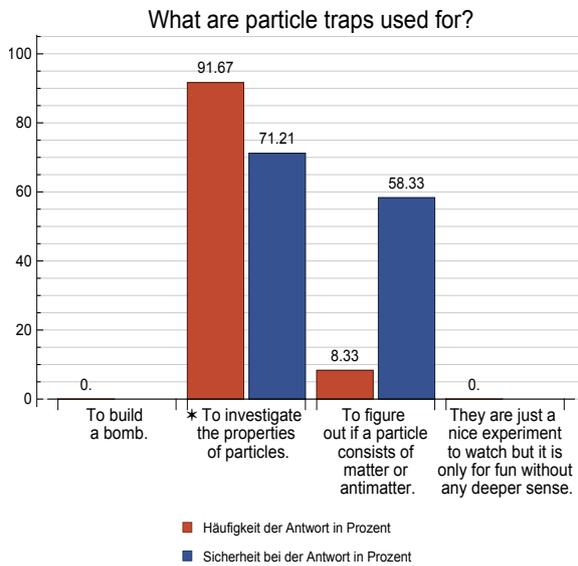


(e) Post-Test, Frage 1.5, (N=36),
* = richtige Antwort

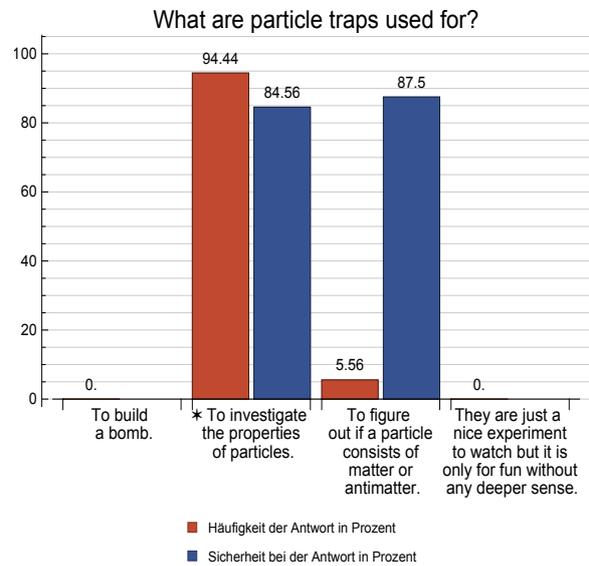
(f) Pre-Test Frage 1.6, (N=36),
* = richtige Antwort

Abb. A.18.: Diagramme zu den Antworten auf die Fragen zum Verständnis der Falle bei denen über 80 % die richtige Antwort gegeben haben.

A.5.2. Diagramme Paulfallen in der Forschung

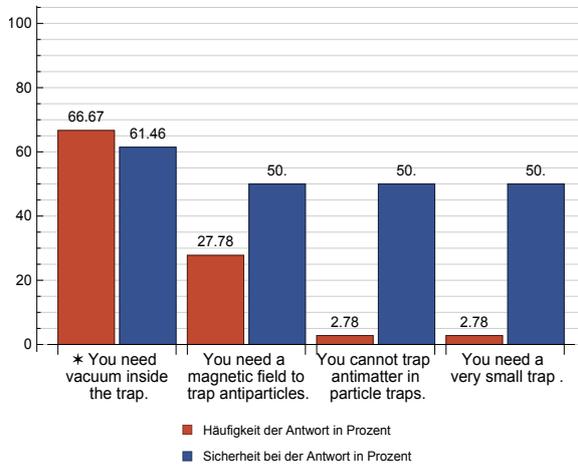


(a) Post-Test, Frage 2.1, (N=36),
* = richtige Antwort



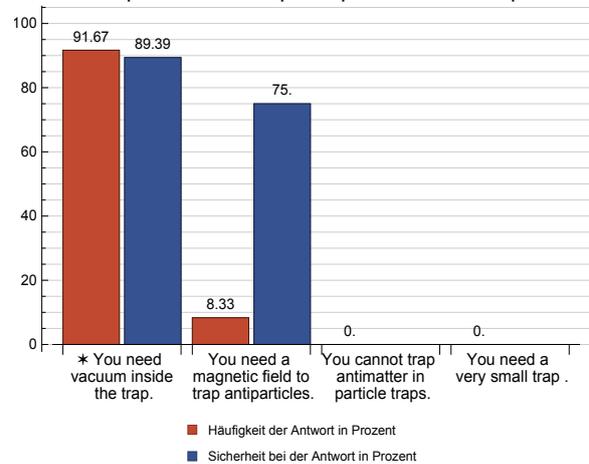
(b) Post-Test, Frage 2.1, (N=36),
* = richtige Antwort

If you want to trap an antihydrogen ions,
what is a very important for the trap?



(c) Pre-Test Frage 2.2, (N=36),
* = richtige Antwort

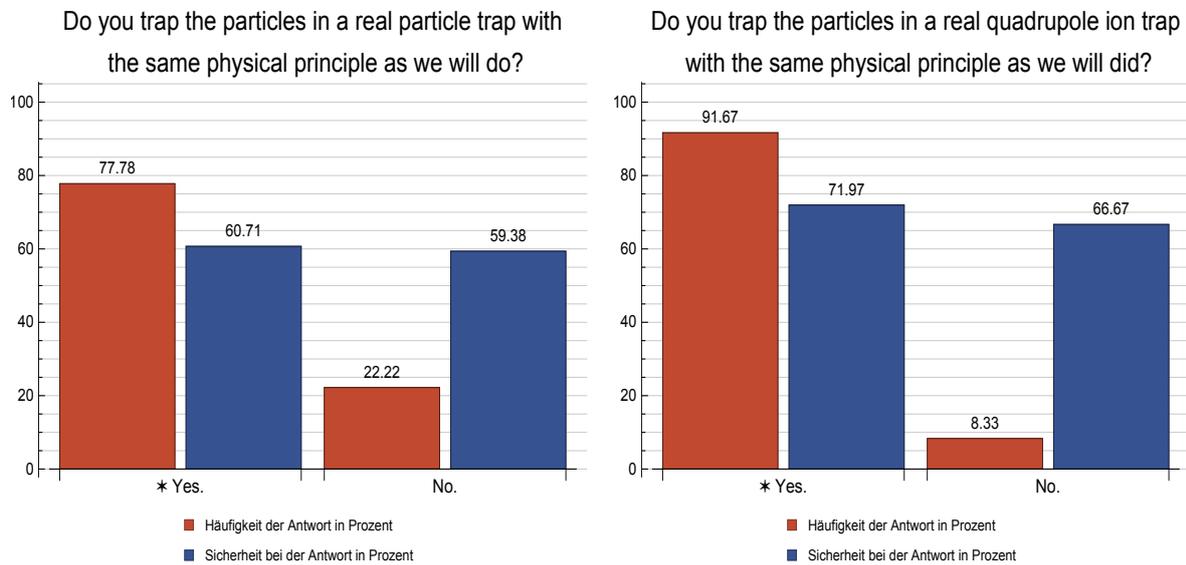
If you want to trap an antihydrogen ion,
which important difference will you need in the
experimental setup compared to our setup?



(d) Post-Test Frage 2.2, (N=36),
* = richtige Antwort

Abb. A.19.: Diagramme zu den Antworten auf die Fragen zu Paulfallen in der Forschung bei denen über 80 % die richtige Antwort gegeben haben.

A.5.3. Diagramme Unterschiede makroskopische Fallen und Elementarteilchen-Fallen



(a) Pre-Test, Frage 3.1, (N=36),

* = richtige Antwort

(b) Post-Test, Frage 3.1, (N=36),

* = richtige Antwort

Abb. A.20.: Diagramme zu den Antworten auf die Fragen zu Unterschieden zwischen makroskopischen Fallen und Fallen für Elementarteilchen bei denen über 80 % die richtige Antwort gegeben haben.

Literaturverzeichnis

- [1] AMOLE, C. ; ASHKEZARI, M. D. ; BAQUERO-RUIZ, M. ; BERTSCHE, W. ; BUTLER, E. ; CAPRA, A. ; CESAR, C. L. ; CHARLTON, M. ; ERIKSSON, S. ; FAJANS, J. ; FRIESEN, T. ; FUJIWARA, M. C. ; GILL, D. R. ; GUTIERREZ, A. ; HANGST, J. S. ; HARDY, W. N. ; HAYDEN, M. E. ; ISAAC, C. A. ; JONSELL, S. ; KURCHANINOV, L. ; LITTLE, A. ; MADSEN, N. ; MCKENNA, J. T. K. ; MENARY, S. ; NAPOLI, S. C. ; NOLAN, P. ; OLIN, A. ; PUSA, P. ; RASMUSSEN, C. . ; ROBICHEAUX, F. ; SARID, E. ; SILVEIRA, D. M. ; SO, C. ; THOMPSON, R. I. ; WERF, D. P. d. ; WURTELE, J. S. ; ZHMOGINOV, A. I. ; CHARMAN, A. E.: Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen. In: *Nature Communications* 4 (2013), S. 1785
- [2] ANDERSON, C. D.: The Positive Electron. In: *Physical Review* 43 (1933), Nr. 6, S. 491–494
- [3] BANERJEE, S. ; LAW, S. E.: Characterization of chargeability of biological particulates by triboelectrification. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 34 (1998), Nr. 6, S. 1201–1205
- [4] BAUR, G. ; BOERO, G. ; BRAUKSIEPE, A. ; BUZZO, A. ; EYRICH, W. ; GEYER, R. ; GRZONKA, D. ; HAUFFE, J. ; KILIAN, K. ; LOVETERE, M. ; MACRI, M. ; MOOSBURGER, M. ; NELLEN, R. ; OELERT, W. ; PASSAGGIO, S. ; POZZO, A. ; RÖHRICH, K. ; SACHS, K. ; SCHEPERS, G. ; SEFZICK, T. ; SIMON, R.S. ; STRATMANN, R. ; STINZING, F. ; WOLKE, M.: Production of antihydrogen. In: *Physics Letters B* 368 (1996), Nr. 3, S. 251–258
- [5] BLECK-NEUHAUS, J.: *Elementare Teilchen*. Springer-Verlag, 2013

- [6] C. PATRIGNANI ET AL. (PARTICLE DATA GROUP): *Chin. Phys. C.* 40, 100001. <http://pdg.lbl.gov/2016/listings/rpp2016-list-p.pdf>. Version: 2016. – zuletzt abgerufen am 25.03.2017
- [7] CONRAD: *Laserpointer Grün*. http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/775000-799999/776301-an-01-ml-LASERPOINTER_GRUENER_LASER_de_en_fr_nl.pdf. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [8] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3*. Springer-Verlag, 2016
- [9] DIRAC, P. A. M.: The Quantum Theory of the Electron. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 117 (1928), Nr. 778, S. 610–624
- [10] DIRAC, P. A. M.: Quantised Singularities in the Electromagnetic Field. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 133 (1931), Nr. 821, S. 60–72
- [11] FLIESSBACH, T.: *Elektrodynamik*. Spektrum Akademischer Verlag, 2012
- [12] IEC 61010-1: *Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 1: General requirements*. 2010
- [13] LD DIDACTIC GMBH: *Kleinspannungsspule, 50 Windungen*. https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/562/56218d.pdf?_ga=1.224374877.737644580.1487500638. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [14] LD DIDACTIC GMBH: *Kleinspannungsstelltrafo*. https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/521/52135de.pdf?_ga=1.169932006.737644580.1487500638. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [15] LD DIDACTIC GMBH: *Spule mit 10000 Windungen*. https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/562/56213de.pdf?_ga=1.132570184.737644580.1487500638. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017

- [16] LD DIDACTIC GMBH: *U-Kern mit Joch und Spannvorrichtung mit Klemmfeder*. https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/562/56211d.pdf?_ga=1.169213159.737644580.1487500638. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [17] L.HILICO ; KARR, J.-P. ; DOUILLET, A. ; INDELICATO, P. ; WOLF, S. ; KALER, F. S.: Preparing single ultra-cold antihydrogen atoms for free-fall in GBAR. In: *International Journal of Modern Physics: Conference Series* 30 (2014), S. 1460269
- [18] MEYN, J.-P.: *Grundlegende Experimentiertechnik im Physikunterricht*. Oldenbourg Verlag, 2013
- [19] MILLER, K. ; LASRY, N. ; CHU, K. ; MAZUR, E.: Role of physics lecture demonstrations in conceptual learning. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 9 (2013), Nr. 2
- [20] NOBELPRIZE.ORG. NOBEL MEDIA AB 2014.: *The Nobel Prize in Physics 1989*. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/. – zuletzt abgerufen am 16.03.2017
- [21] OWL TECH LIMITED: *USB Mikroskop*. <http://owltech.com/portfolio-item/mirazoom-mz-902-9mp-10x-40x-200x-digital-microscope-filter-measurement-function>. – zuletzt abgerufen am 10.03.2017
- [22] PAGE, L. ; ADAMS, N. I.: *Principles of Electricity An Intermediate Text in Electricity and Magnetism*. D. Van Nostrand Company, Inc, 1931
- [23] PAUL, W.: Electromagnetic traps for charged and neutral particles. In: *Rev. Mod. Phys.* 62 (1990), S. 531–540
- [24] PAUL, W. ; OSBERGHAUS, O. ; FISCHER, E.: *Ein Ionenkäfig*. Springer-Verlag, 1958
- [25] PÉREZ, P. ; BANERJEE, D. ; BIRABEN, F. ; BROOK-ROBERGE, D. ; CHARLTON, M. ; CLADÉ, P. ; COMINI, P. ; CRIVELLI, P. ; DALKAROV, O. ; DEBU, P. ; DOUILLET, A. ; DUFOUR, G. ; DUPRÉ, P. ; ERIKSSON, S. ; FROELICH, P. ; GRANDEMANGE, P. ; GUELLATI, S. ; GUÉROUT, R. ; HEINRICH, J. M. ; HERVIEUX, P.-A. ; HILICO,

- L. ; HUSSON, A. ; INDELICATO, P. ; JONSELL, S. ; KARR, J.-P. ; KHABAROVA, K. ; KOLACHEVSKY, N. ; KURODA, N. ; LAMBRECHT, A. ; LEITE, A. M. M. ; LISZKAY, L. ; LUNNEY, D. ; MADSEN, N. ; MANFREDI, G. ; MANSOULIÉ, B. ; MATSUDA, Y. ; MOHRI, A. ; MORTENSEN, T. ; NAGASHIMA, Y. ; NESVIZHEVSKY, V. ; NEZ, F. ; REGENFUS, C. ; REY, J.-M. ; REYMOND, J.-M. ; REYNAUD, S. ; RUBBIA, A. ; SACQUIN, Y. ; SCHMIDT-KALER, F. ; SILLITOE, N. ; STASZCZAK, M. ; SZABO-FOSTER, C. I. ; TORII, H. ; VALLAGE, B. ; VALDES, M. ; WERF, D. P. d. ; VORONIN, A. ; WALZ, J. ; WOLF, S. ; WRONKA, S. ; YAMAZAKI, Y.: The GBAR antimatter gravity experiment. In: *Hyperfine Interactions* 233 (2015), Nr. 1, S. 21–27
- [26] PEREZ, P. ; SACQUIN, Y.: The GBAR experiment: gravitational behaviour of antihydrogen at rest. In: *Classical and Quantum Gravity* 29 (2012), Nr. 18, S. 184008
- [27] PLAYZONE: *Adafruit JST-PH 2-Pin Breakout Board*. http://www.play-zone.ch/en/adafruit-jst-ph-2-pin-breakout-board.html?__from_store=en. – zuletzt abgerufen am 10.03.2017
- [28] PLAYZONE: *Polymer Lithium Ion (LiPo) Akku*. http://www.play-zone.ch/en/polymer-lithium-ion-lipo-akku-2000mah.html?__from_store=en. – zuletzt abgerufen am 10.03.2017
- [29] RASCH, Björn ; HOFMANN, Wilhelm ; FRIESE, Malte ; NAUMANN, Ewald: *Quantitative Methoden Band 2*. Springer Nature, 2010
- [30] REICHELT ELEKTRONIK: *LED 3-6000L GN*. <http://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A500/LL-304PGC2E-G4-1BC.pdf>. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [31] RS: *Bare Conductive ELECTRIC PAINT*. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/133a/0900766b8133a784.pdf>. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [32] RS: *Multi Contact Laborsteckverbinder*. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/002b/0900766b8002b56c.pdf>. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017

- [33] RS: *RS Pro Wippschalter*. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1582/0900766b81582c4e.pdf>. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [34] RS: *Schaltdraht*. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1580/0900766b815800b0.pdf>. – zuletzt abgerufen am 09.03.2017
- [35] SACQUIN, Y.: The GBAR experiment. In: *The European Physical Journal D* 68 (2014), Nr. 2, S. 31
- [36] SCHILLING, J. F.: Cognitive Load Theory of Learning: Underpinnings and Model. In: *International Journal of Athletic Therapy and Training* 21 (2016), Nr. 2, S. 12–16
- [37] SCHMITT, A. ; COBERGER, N. ; WENDT, K.: Teilchenfallen aus dem Baumarkt - Moderne Modellexperimente für die Schule. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* (2010), Nr. 7, S. 44–49
- [38] SCHULZ, S. ; WÖSTENFELD, R. ; KASTL, R. ; SCHMIDT-KALER, F. ; NORDMEIER, V.: Demonstrationsexperimente mit linearen Paulfallen. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* (2009)
- [39] SPRINGER GABLER VERLAG (HERAUSGEBER): *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Flow-Erleben*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/78176/flow-erleben-v4.html>. – zuletzt abgerufen am 30.3.2017
- [40] ULTIMAKER: *Ultimaker2+*. <https://ultimaker.com/file/download/productgroup/Ultimaker%20+%20specification%20sheet.pdf/5819be416ae76.pdf>. – zuletzt abgerufen am 10.03.2017
- [41] WHITE, R. ; GUNSTONE, R.: *Probing Understanding*. The Falmer Press, 1992
- [42] WINTER, H. ; ORTJOHANN, H. W.: Simple demonstration of storing macroscopic particles in a “Paul trap”. In: *American Journal of Physics* 59 (1991), Nr. 9, S. 807–813
- [43] WOLFRAM RESEARCH, INC.: *Mathematica 10.4*

- [44] WUERKER, R. F. ; SHELTON, H. ; LANGMUIR, R. V.: Electrodynamic Containment of Charged Particles. In: *Journal of Applied Physics* 30 (1959), Nr. 3, S. 342

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seite belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von 2 Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

Ort, Datum, Unterschrift